



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ CNC ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΣΕ ΚΕΝΤΡΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ηλιόπουλος Αθανάσιος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βοσνιάκος Γεώργιος Χ.

ΑΘΗΝΑ, 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών από τον φοιτητή Ηλιόπουλο Αθανάσιο, το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον επιβλέποντα της εργασίας και καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, κύριο Γεώργιο Χριστόφορο Βοσνιάκο, για την αμέριστη καθοδήγηση που μου παρείχε αλλά και για την υπομονή και κατανόηση που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συνεργασία μαζί του μου επέτρεψε την απόκτηση νέων γνώσεων στον τομέα των κατεργασιών όπως επίσης και τη δημιουργία τρόπου σκέψης για την αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία TEMMA A.E. και πιο συγκεκριμένα τους κυρίους Εξηντάρη Πάρη και Μυρώνη Ευάγγελο οι οποίοι δέχτηκαν την πρόταση μου για συνεργασία και με τη βοήθεια τους οριστικοποιήθηκε το θέμα της διπλωματικής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Σιμωνίδη Ιάσονα, καθώς ήταν πρόθυμος να με βοηθήσει με οποιαδήποτε απορία ή δυσκολία είχα πάνω στο θέμα.

Κλείνοντας θα ήθελα ευχαριστήσω το συνάδελφο και διδακτορικό φοιτητή του τομέα των Κατεργασιών, κύριο Παπαζέτη Γεώργιο, ο οποίος με τις γνώσεις του βοήθησε στην κατανόηση ενός άγνωστου για μένα αντικειμένου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καταstrώνεται η κατεργασία τεμαχίου υλικού 42CrMo4 σε τρία στάδια: Στο πρώτο στάδιο γίνεται ο προγραμματισμός και η προσομοίωση της αρχικής διαμόρφωσης του τεμαχίου σε λογισμικό CAM. Η αρχική διαμόρφωση αποτελείται από δύο φάσεις (A-B) εκχόνδρισης 2.5D αλλά και 3D γεωμετριών και αποτελείται από αρκετές ξεχωριστές κατεργασίες. Για κάθε κατεργασία παρουσιάζεται η τροχιά του κοπτικού εργαλείου, συγκριτικές εικόνες από το λογισμικό πριν και μετά την αφαίρεση του υλικού αλλά και ο εκάστοτε χρόνος κοπής. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την πρώτη βελτιστοποίηση της πιο χρονοβόρας κατεργασίας εκ των δύο φάσεων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi. Για τη βελτιστοποίηση επιλέχθηκαν να εξετασθούν οι παράγοντες Βάθος Κοπής, Επικάλυψη Διαμέτρου, Τεχνική Κοπής και Διάμετρος Κοπτικού Εργαλείου. Οι τρεις πρώτοι παράγοντες μελετήθηκαν σε τρία επίπεδα, ενώ ο τελευταίος σε δύο. Μέσω της μεθόδου Taguchi προέκυψαν ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων των παραγόντων και μια προσέγγιση του χρόνου κοπής σε αυτά τα επίπεδα, προσέγγιση η οποία επιβεβαιώθηκε στο λογισμικό CAM. Έπειτα, με τη μέθοδο ανάλυσης ANOVA υπολογίσθηκε ποσοστιαία η επίδραση που έχει ο κάθε ένας από τους τέσσερις παράγοντες στο τελικό αποτέλεσμα. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο γίνεται η βελτιστοποίηση τριών συνθηκών κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση ανά οδόντα και βάθος κοπής) με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Οι δύο πρώτες συνθήκες είχαν διατηρηθεί σταθερές κατά τη διάρκεια της πρώτης βελτιστοποίησης, ενώ το βάθος κοπής είχε ελεγχθεί σε συντηρητικά επίπεδα. Αντικειμενική συνάρτηση του γενετικού αλγορίθμου ορίστηκε ο χρόνος κοπής, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη τεχνολογικούς και ποιοτικούς περιορισμούς (μέγιστη ισχύς κοπής, τραχύτητα επιφάνειας, δυναμική ευστάθεια του συστήματος εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο).

ABSTRACT

In the present diploma thesis the machining of a 42CrMo4 part is planned in three separate stages: During the first stage, the programming and simulation of the initial shaping of the part is executed in a CAM software. The initial shaping consists of two roughing phases (A-B) which include both 2.5D and 3D surfaces and it consists of multiple different milling processes. For every process, the cutting toolpath, comparative figures obtained from the CAM software before and after the machining of the material and the equivalent cutting time are presented. The second stage includes the first optimization of the most time consuming process of the two phases, using the Taguchi method. For this optimization the factors that will be examined are Depth of Cut, Overlap, Cutting Technique and Cutter's Diameter. The first three factors were examined in three stages, while the last one was examined in two. Through the Taguchi method the optimal combination of the factor's levels and an approximation of the cutting time using these levels were obtained. This approximation was confirmed by the CAM software. Subsequently, through the ANOVA analysis method, the percentage influence of each of the four factors on the final outcome was calculated. In the third and final stage, three of the cutting conditions (Cutting Speed, Feed per Tooth and Depth of Cut) are optimized through the use of a genetic algorithm. The first two conditions remained constant during the first optimization, while the depth of cut was examined in conservative levels. The objective function of the genetic algorithm was set to be the cutting time, while taking into consideration technological and quality constraints (Maximum Cutting Power, Surface Roughness, and Dynamic Stability of the system Machine-Tool-Part).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ	7
1.1.1)	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	7
1.1.2)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΕΩΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ	8
1.1.3)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ	8
1.1.4)	ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ	11
1.1.5)	ΚΕΝΤΡΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	13
1.2.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM.....	15
1.2.1)	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD	15
1.2.2)	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAM	16
1.3.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ (DESIGN OF EXPERIMENTS Η DOE)	17
1.3.1)	Η ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI	20
1.4.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	29
2.1.	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....	29
2.1.1)	ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ.....	29
2.1.2)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ.....	31
2.1.3)	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	36
2.2.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI	39
2.2.1)	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.....	39
2.2.2)	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	40
2.2.3)	ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	41
2.2.4)	ΕΥΡΩΣΤΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ/ΘΟΡΥΒΟΥ (S/N RATIO)	44
2.3.	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	49
3.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	49
3.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΣΕ CAM	53
4.1.	ΣΧΕΔΙΑΣΗ STOCK ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΕ CAD	53
4.2.	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕ CAM	56

4.2.1)	Α΄ ΦΑΣΗ	56
4.2.2)	Β΄ ΦΑΣΗ	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ CAM		77
5.1.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	78
5.2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ	78
5.3.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	83
5.4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	85
5.5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	87
5.6.	ΑΝΟΝΑ	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ		91
6.1.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	91
6.2.	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ	92
6.3.	ΤΕΧΝΙΚΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	94
6.4.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΕΙΡΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	100
6.5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ		103
7.1	ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
7.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ

Τα διάφορα μεταλλικά προϊόντα που απαντώνται στην βιομηχανία, γνωστά ως μηχανουργικά προϊόντα, παράγονται με κάποια από τις μεθόδους βιομηχανικής παραγωγής ή και με συνδυασμό τους, με τη βοήθεια των εκάστοτε αναγκαίων μέσων παραγωγής, όπως είναι κυρίως οι πάσης φύσεως εργαλειομηχανές και εργαλεία.

Σε αυτές τις μεθόδους παραγωγής συγκαταλέγονται οι μηχανικές κατεργασίες των μετάλλων, καθώς και άλλες μέθοδοι μορφοποίησης. Πλην των μηχανικών κατεργασιών των μετάλλων, οι υπόλοιπες μέθοδοι μορφοποίησης κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αρχέγονες μορφοποιήσεις (χύτευση, κονιομεταλλουργία)
- Εργασίες συνδέσεως μεταλλικών εξαρτημάτων (συγκολλήσεις, κοχλιοσυνδέσεις, ηλώσεις).
- Διεργασίες επικαλύψεως
- Διεργασίες αλλαγής ιδιοτήτων του μετάλλου

1.1.1) ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Ως κατεργασία θεωρείται μια οποιαδήποτε διεργασία στην οποία ένα κομμάτι πρώτης ύλης κόβεται σε ένα τελικό επιθυμητό σχήμα με μία ελεγχόμενη διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Οι διαδικασίες που έχουν το παραπάνω ως κοινό σημείο, δηλαδή την ελεγχόμενη αφαίρεση υλικού, είναι γνωστές ως Κατεργασίες Αφαιρέσεως Υλικού. Οι κατεργασίες αυτές είναι μέρος της κατασκευής πολλών μεταλλικών προϊόντων, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν ως πρώτη ύλη ξύλο, πλαστικό, κεραμικά και σύνθετα υλικά. Εν αντιθέσει οι διαδικασίες ελεγχόμενης προσθήκης υλικού είναι γνωστές ως Κατεργασίες Προσθετικής Κατασκευής, με το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας να αποτελεί η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Η απόλυτη ερμηνεία του όρου «ελεγχόμενη» μπορεί να ποικίλλει, αλλά κατά βάση υποδηλώνει την χρήση εργαλειομηχανής (εκτός των ηλεκτρικών εργαλείων και εργαλείων χειρός).

1.1.2) ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΕΩΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

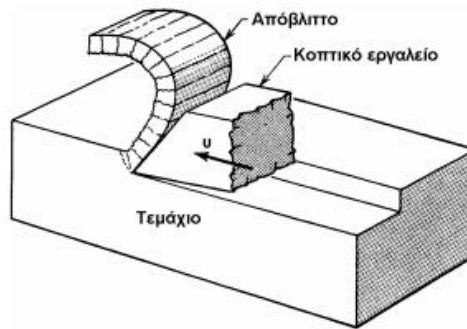
Οι κατεργασίες αφαιρέσεως ομαδοποιούνται στις κατεργασίες κοπής και στις λεγόμενες μη συμβατικές κατεργασίες αφαιρέσεως μετάλλου. Στις τελευταίες η αφαίρεση του μετάλλου δεν λαμβάνει χώρα μηχανικώς με πλαστική παραμόρφωση, αλλά θερμικά, ηλεκτρικά, χημικά ή με άλλον τρόπο. Παρόλα αυτά ανήκουν στην κατηγορία των μηχανικών κατεργασιών.

1.1.3) ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ

Με τις κατεργασίες κοπής, ως μεθόδου παραγωγής μεταλλικών προϊόντων, αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλίττων (γρεζιών) σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλουν ανά κατεργασία. Έτσι, με τις κατεργασίες κοπής προσδίδουμε στο κατεργαζόμενο τεμάχιο την επιθυμητή μορφή και διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και την απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά την χρήση του.

Η κοπή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου εκάστοτε κοπτικού εργαλείου και της συναφούς εργαλειομηχανής. Το κοπτικό εργαλείο πρέπει οπωσδήποτε να είναι αρκετά σκληρότερο από το υλικό που κατεργαζόμαστε. Η εργαλειομηχανή προσδίδει την απαιτούμενη για την κοπή ισχύ και εκτελεί τις αναγκαίες για την μορφοποίηση του κομματιού κινήσεις, τόσο του κομματιού όσο και του εργαλείου. Οι εργαλειομηχανές αυτές δίνουν την δυνατότητα, εκτός της παραγωγής απλών κυλινδρικών ή επίπεδων τεμαχίων και για κατεργασία ειδικών διαμορφώσεων όπως το σπείρωμα, η οδόντωση και γενικά διαφόρων μορφών επιφανειών. Σήμερα, με τη χρήση των εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση (CNC), υπάρχει δυνατότητα κατεργασιών πολύπλοκων επιφανειών με πολύ μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων και μορφής.

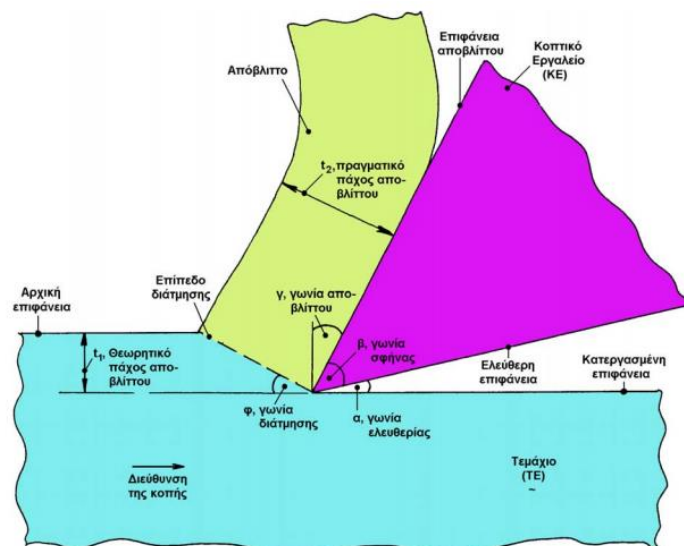
Περαιτέρω, οι κατεργασίες κοπής διακρίνονται σε εκείνες που παράγουν τεμάχια εκ περιστροφής, όπως η τόννευση και σε εκείνες που μπορούν να κατεργαστούν οποιοσδήποτε μορφές, όπως το φραιζάρισμα.



Εικόνα 1.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η κοπή, περιγράφεται από την κινηματική της κατεργασίας και τις σχετικές θέσεις ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο και συνιστά τις συνθήκες κοπής. Σε κάθε περίπτωση κατεργασίας μια κυρίαρχη κίνηση είναι εκείνη που προσφέρει την ισχύ για την κοπή και ονομάζεται κύρια κίνηση κοπής. Δευτερεύουσα κίνηση αποτελεί η κίνηση της πρόωσης που συντηρεί την κατεργασία και δημιουργεί το επιθυμητό σχήμα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες συνθήκες κοπής είναι το αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής, η ταχύτητα κοπής και η ταχύτητα πρόωσης.



Εικόνα 1.2: Οι βασικές έννοιες της κοπής

Μία περαιτέρω διάκριση των ειδών κοπής ακολουθεί τα στάδια τα οποία αποτελούν την συνολική διαδικασία της κατεργασίας του τεμαχίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο διακρίνουμε τα ακόλουθα είδη κοπής:

- ✓ Προκαταρκτική κοπή, που συνίσταται στην αφαίρεση του βλαμμένου εάν υπάρχει, επιφανειακού στρώματος του ακατέργαστου κομματιού, όπως συμβαίνει π.χ. με τα χυτά κομμάτια.
- ✓ Εκχόνδριση, η οποία αποτελεί την αλληλουχία περασμάτων (πάσσων) του κοπτικού (ανάλογα με το στρώμα του μετάλλου που θα πρέπει να αφαιρεθεί) με μια ή περισσότερες κατεργασίες κοπής, ώστε το κομμάτι να πάρει την κατά προσέγγιση μορφή του έτοιμου κομματιού, αφού βεβαίως αφηθεί ένα λεπτό στρώμα μετάλλου για την αποπεράτωση του.
- ✓ Αποπεράτωση ή τελική κατεργασία του κομματιού, που περιλαμβάνει σειρά από κατεργασίες με σκοπό την πρόσδοση σε αυτό των τελικών του διαστάσεων και της τελικής του μορφής, με την επιθυμητή ακρίβεια και ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών του.

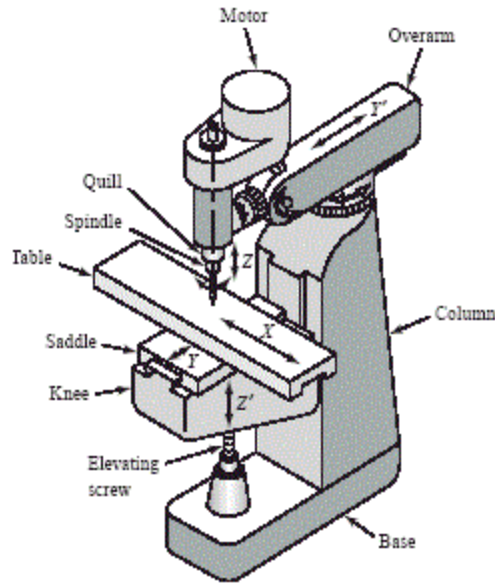
Στην εκχόνδριση η παραγωγικότητα της κατεργασίας είναι υψηλή και η ποιοτική της δυναμικότητα χαμηλή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην αποπεράτωση. Μπορούμε να εφαρμόσουμε ως κανόνα ότι η εκχόνδριση εκτελείται με εκλογή μεγάλης θεωρητικής διατομής του αποβλίττου (πρόωση και βάθος κοπής) και μέσης σχετικά ταχύτητας κοπής, ενώ στην αποπεράτωση, όπου κατά κανόνα ενδιαφέρει πέρα από την ακρίβεια των διαστάσεων και της μορφής και η τραχύτητα επιφάνειας, με υψηλή ταχύτητα κοπής και μικρή πρόωση. Εξυπακούεται ότι, ιδιαίτερα στην εκχόνδριση, θα πρέπει να ελέγχονται τόσο η επάρκεια της ισχύος της εργαλειομηχανής, όσο και η μηχανική αντοχή και οι παραμορφώσεις κρίσιμων μερών της εργαλειομηχανής, του κομματιού, του εργαλείου και των συσκευών και διατάξεων συγκρατήσεως της.

1.1.4) ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ

Μια κατεργασία η οποία θα χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στην παρούσα εργασία, είναι το φραιζάρισμα. Όπως προαναφέρθηκε, το φραιζάρισμα αποτελεί κατηγορία των κατεργασιών κοπής με χαρακτηριστικό τη δυνατότητα κατεργασίας οποιασδήποτε μορφής. Το φραιζάρισμα είναι η διαδικασία κατεργασίας με τη χρήση περιστροφικών κοπτικών εργαλείων με σκοπό την αφαίρεση υλικού από ένα τεμάχιο προωθώντας (ή τροφοδοτώντας) μια κατεύθυνση υπό γωνία με τον άξονα του εργαλείου. Καλύπτει μία μεγάλη ποικιλία διαφορετικών λειτουργιών και μηχανών, σε κλίμακα από μικρά τεμάχια έως μεγάλες, βαριές λειτουργίες φραιζαρίσματος. Είναι μια από τις πιο συνήθεις διαδικασίες στη βιομηχανία και τα μηχανουργεία για κατεργασία εξαρτημάτων σε ακριβή μεγέθη και σχήματα.

Το φραιζάρισμα μπορεί να γίνει σε ένα ευρύ φάσμα εργαλειομηχανών. Η αρχική κατηγορία εργαλειομηχανών για το φραιζάρισμα ήταν η φραιζα. Μετά την εμφάνιση του αριθμητικού ψηφιακού ελέγχου (CNC), οι φραιζες εξελίχθηκαν σε κέντρα κατεργασίας (μηχανές φραιζαρίσματος με αυτόματους εναλλάκτες εργαλείων, γεμιστήρες εργαλείων, κέντρο ελέγχου, σύστημα ψύξης), γενικώς ταξινομημένα ως κατακόρυφα κέντρα κατεργασίας (VMCs) και οριζόντια κέντρα κατεργασίας (HMCs).

Το κοπτικό εργαλείο, όπως προαναφέρθηκε, είναι περιστροφικό και φέρει κατά κύριο λόγο πολλαπλά σημεία κοπής και κατά τη διάρκεια του φραιζαρίσματος κινείται κάθετα στον άξονα του, έτσι ώστε η κοπή να συμβαίνει περιφερειακά του κοπτικού. Καθώς το κοπτικό εργαλείο εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, οι κοπτικές του ακμές (αυλακώσεις ή δόντια) κόβουν επανειλημμένα και εξέρχονται του υλικού, αφαιρώντας ρινίσματα από το τεμάχιο με κάθε πέρασμα. Η περιστροφική αυτή κίνηση έχει ως συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως π.χ. το εργαλείο της τόννευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή. Η κοπή γι' αυτό το λόγο στο φραιζάρισμα λέγεται διακοπτόμενη και ενώ ευνοεί το κοπτικό εργαλείο όσον αφορά την ανάπτυξη των θερμοκρασιών σε αυτό, η απότομη εμπλοκή του εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει ως συνέπεια να καταπονούν το εργαλείο κρουστικά φορτία αυξάνοντας έτσι, ανάλογα με το υλικό του, τον κίνδυνο αστοχίας του.



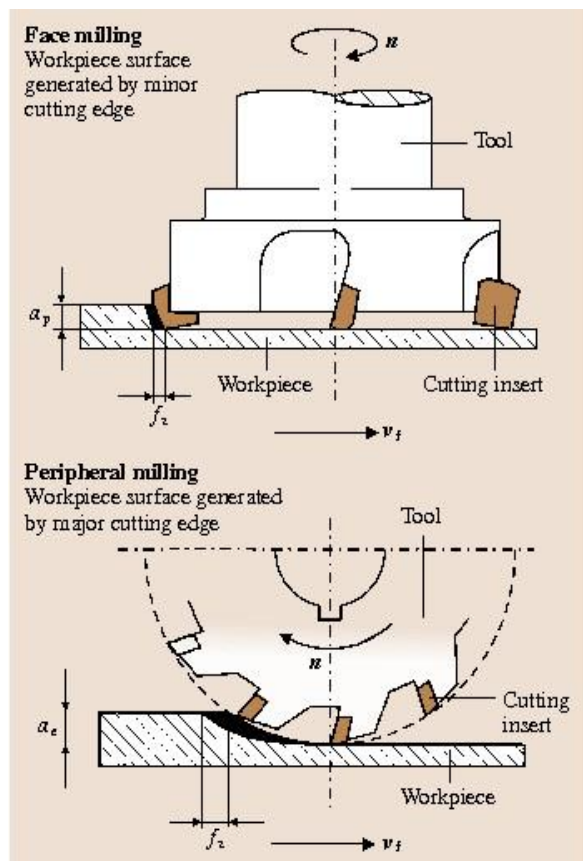
Εικόνα 1.3: Φραιζα

Μπορούμε να διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες φραιζαρίσματος:

- ✓ Περιφερικό Φραιζάρισμα (Peripheral Milling)
- ✓ Μετωπικό Φραιζάρισμα (Face Milling)

Στο μετωπικό φραιζάρισμα, ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει, εκτός των περιφερειακών κοπτικών ακμών του και κοπτικές ακμές στο εμπρός πρόσωπο του.

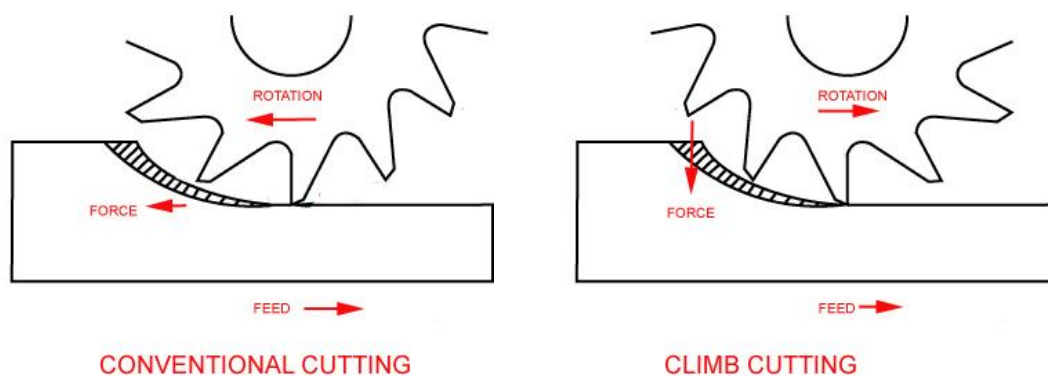
Αντίστοιχα, στο περιφερικό φραιζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει κυλινδρική μορφή, αφαιρώντας τα απόβλιττα από το τεμάχιο με περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές.



Εικόνα 1.4: Μετωπικό (άνω) και περιφερικό (κάτω) φραιζάρισμα

Στο περιφερικό φραιζάρισμα, η πρόωση του τεμαχίου συνήθως είναι αντίθετη στην περιστροφή του εργαλείου αλλά μπορεί και να συμβαίνει το αντίθετο. Η επιλογή αυτή της κίνησης του τεμαχίου διακρίνει το φραιζάρισμα σε:

- ✚ Αντίρροπο φραιζάρισμα (Conventional Milling)
- ✚ Ομόρροπο φραιζάρισμα (Climb Milling)



Εικόνα 1.5: Αντίρροπο και Ομόρροπο φραιζάρισμα

Όπως φαίνεται και από την **Εικόνα 1.5**, στο αντίρροπο φραιζάρισμα, η κοπή ξεκινά από λεπτότερο απόβλιττο και καταλήγει σε χοντρό απόβλιττο, εν αντιθέσει με το ομόρροπο φραιζάρισμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο να δέχεται ισχυρές καταπονήσεις κατά την είσοδο του στο τεμάχιο και έτσι να αυξάνεται ο κίνδυνος θραύσης του. Αντίστοιχα όμως, όπως προκύπτει από την κινηματική, το κοπτικό εργαλείο «πιέζει» το τεμάχιο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι η κοπή είναι πιο σταθερή.

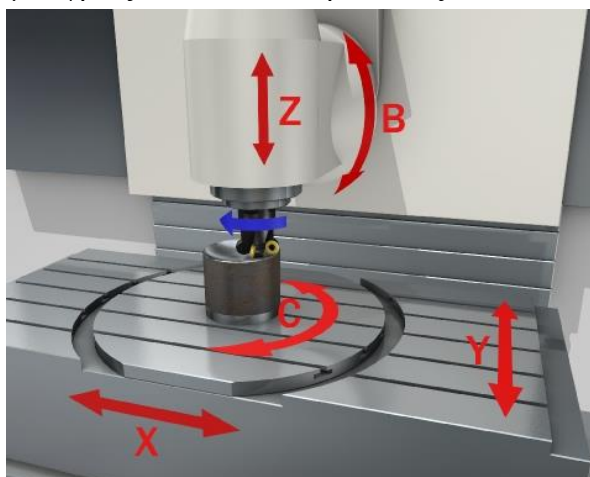
1.1.5) ΚΕΝΤΡΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για την επίτευξη της κατεργασίας του εκάστοτε τεμαχίου απαιτείται και η χρήση της αντίστοιχης εργαλειομηχανής. Μπορεί επομένως να γίνει η εξής διάκριση των εργαλειομηχανών φραιζαρίσματος:

- Οριζόντια φραιζομηχανή
- Κάθετη φραιζομηχανή
- Κέντρο κατεργασίας

Η διαφορά της οριζόντιας από την κάθετη φραιζομηχανή έγκειται στο ότι η πρώτη έχει χαρακτηριστικό ότι ο κύριος άξονας της που μεταφέρει την κίνηση είναι οριζόντιος, σε αντίθεση με την δεύτερη στην οποία ο άξονας κίνησης είναι κάθετος.

Οι σύγχρονες φραιζες με ψηφιακή καθοδήγηση και αυτόματη αλλαγή εργαλείου, ονομάζονται κέντρα κατεργασιών. Τα συγκεκριμένα κέντρα χαρακτηρίζονται και ονομάζονται από το πλήθος των κινήσεων οι οποίες μπορούν να καθοδηγηθούν από ηλεκτρονικό υπολογιστή και το πρόγραμμα καθοδήγησης. Επομένως, μια εργαλειομηχανή η οποία μπορεί και κινεί ταυτόχρονα το τραπέζι στο οριζόντιο επίπεδο, αλλά δεν διαθέτει αυτόματη καθοδήγηση στο κατακόρυφο, ονομάζεται φραιζα 2 αξόνων. Με την είσοδο της αυτόματης καθοδήγησης και στο κατακόρυφο επίπεδο, αλλά όχι ταυτόχρονα με το οριζόντιο, έχουμε εργαλειομηχανή 2 ½ αξόνων. Με την ταυτόχρονη πλέον καθοδήγηση τόσο της οριζοντίου, όσο και της καθέτου κατεύθυνσης, η εργαλειομηχανή κατατάσσεται στις φραιζες 3 αξόνων. Τέλος, αναλόγως της δυνατότητας περιστροφής του τραπεζιού ή της προβοσκίδας που φέρει το εργαλείο, μπορεί μια φραιζα να είναι 4,5 ή και 6 αξόνων.



Εικόνα 1.6: Παράδειγμα αξόνων σε σύγχρονο CNC κέντρο κατεργασιών

Προκειμένου όμως να επιτυγχάνεται η σωστή συγκράτηση των τεμαχίων στις φραιζες και τα κέντρα κατεργασιών, χρησιμοποιούνται ειδικά εξαρτήματα πρόσδεσης που συσφίγγουν το κατεργαζόμενο τεμάχιο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Τέτοια εξαρτήματα χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη ακρίβεια, μια και ο κλασικός τρόπος συγκράτησης που είναι οι μέγγκες, προϋποθέτει σωστή και στιβαρή συγκράτηση της μέγγκες στο τραπέζι της φραιζας και στη συνέχεια σωστή και στιβαρή συγκράτηση του τεμαχίου στη μέγγκε.

1.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM

Τα συστήματα CAD/CAM είναι βασικά προϊόντα της βιομηχανίας γραφικών (Computer Graphics Industry) που έχει σαν κύριο αντικείμενο τη σύνθεση, ανάλυση και επεξεργασία εικονικών παραστάσεων.

1.2.1) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD

Η λέξη CAD αποτελεί ακρωνύμιο του σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design) και είναι η χρήση συστημάτων πληροφορικής για τη δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση ή βελτιστοποίηση ενός σχεδίου. Το λογισμικό CAD χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η παραγωγικότητα του σχεδιαστή, να βελτιωθεί η ποιότητα του σχεδιασμού και να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων για την παραγωγή.

Η χρήση του λογισμικού αυτού στο σχεδιασμό ηλεκτρονικών συστημάτων είναι γνωστή ως ηλεκτρονική αυτοματοποίηση σχεδιασμού. Στον μηχανολογικό σχεδιασμό είναι γνωστή ως μηχανική αυτοματοποίηση σχεδιασμού (MDA) ή σχεδίαση με χρήση υπολογιστή (CAD), η οποία περιλαμβάνει τη διαδικασία δημιουργίας ενός τεχνικού σχεδίου με τη χρήση λογισμικού.

Το λογισμικό CAD για μηχανολογικό σχεδιασμό, χρησιμοποιεί είτε διανυσματικά γραφικά για την απεικόνιση των αντικειμένων της παραδοσιακής σύνταξης, είτε μπορεί να παράγει γραφικά «ράστερ» που δείχνουν συνολικά τα σχεδιαζόμενα αντικείμενα. Εντούτοις περιλαμβάνει περισσότερα από απλά σχήματα. Όπως και στη χειροκίνητη σύνταξη τεχνικών και μηχανολογικών σχεδίων, το αποτέλεσμα του CAD λογισμικού πρέπει να μεταφέρει πληροφορίες όπως υλικά, διεργασίες, διαστάσεις και ανοχές.

Το λογισμικό CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό καμπυλών και σχημάτων σε δισδιάστατο χώρο (2D) ή καμπύλες, επιφάνειες και στερεά σε τρισδιάστατο χώρο (3D).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το CAD λογισμικό SolidWorks της εταιρείας Dassault.

1.2.2) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAM

Αντίστοιχα με το λογισμικό CAD το οποίο επιτρέπει τον σχεδιασμό μηχανολογικών και μη εξαρτημάτων, η προσομοίωση των κατεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μία εργαλειομηχανή, επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού CAM.

Η κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή, όπως δηλώνει η λέξη CAM (Computer Aided Manufacturing), είναι η χρήση λογισμικού για τον έλεγχο εργαλειομηχανών και συναφών εργαλείων κατά την κατασκευή τεμαχίων. Το λογισμικό CAM μπορεί επίσης να αναφέρεται στη χρήση ενός υπολογιστή για τον σχεδιασμό, τη διαχείριση, τη μεταφορά και την αποθήκευση σε μια μονάδας παραγωγής. Ο πρωταρχικός στόχος του είναι να δημιουργήσει μια ταχύτερη διαδικασία παραγωγής και εξαρτημάτων αλλά και εργαλείων με ακριβέστερες διαστάσεις και υλική συνέπεια, η οποία, σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιεί μόνο την απαιτούμενη ποσότητα πρώτης ύλης (ελαχιστοποιώντας έτσι τα απόβλητα), μειώνοντας συγχρόνως την κατανάλωση ενέργειας. Το CAM είναι μια διαδικασία υποβοηθούμενη από υπολογιστή, που ακολουθεί τον σχεδιασμό στον υπολογιστή (CAD) και μερικές φορές και την μηχανολογική ανάλυση σε υπολογιστή CAE (Computer Aided Engineering), καθώς το μοντέλο που παράγεται σε λογισμικό CAD και αναλύεται σε CAE μπορεί να εισαχθεί σε λογισμικό CAM, το οποίο στη συνέχεια ελέγχει την εργαλειομηχανή.

Με τη χρήση του λογισμικού CAM είναι επομένως δυνατός τόσο ο ακριβής έλεγχος όσο και η προσομοίωση της κατεργασίας ενός τεμαχίου. Οι περισσότερες κατεργασίες εξελίσσονται σε πολλαπλά στάδια, σε κάθε ένα από τα οποία υλοποιείται μια ποικιλία βασικών και εξελιγμένων στρατηγικών, ανάλογα με το υλικό και το διαθέσιμο υλικό. Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν τρία διαφορετικά είδη κοπής τα οποία αποτελούν τα πολλαπλά αυτά στάδια (προκαταρκτική κοπή, εκχόνδριση και αποπεράτωση).

Το λογισμικό CAM που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το SolidCam της εταιρείας SolidCam GmbH.

1.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ (DESIGN OF EXPERIMENTS Η DOE)

Ο όρος πείραμα ορίζεται ως μια συστηματική διαδικασία που διεξάγεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες, προκειμένου να προκύψει ένα άγνωστο αποτέλεσμα, να δοκιμαστεί ή να τεκμηριωθεί μια υπόθεση ή να διευκρινιστεί ένα γνωστό φαινόμενο. Όταν αναλύεται μια διαδικασία, είναι συχνή η χρήση πειραμάτων ώστε να αξιολογηθούν ποιες από τις εισόδους της έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα της και ποια είναι τα κατάλληλα επίπεδα αυτών των εισόδων ώστε να επιτευχθεί ένα επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα πειράματα μπορούν να σχεδιαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους προκειμένου να γίνει η συλλογή αυτών των πληροφοριών. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων (DOE) αναφέρεται επίσης ως σχεδιασμένα πειράματα ή πειραματικό σχέδιο, όλοι όμως οι όροι έχουν το ίδιο νόημα.

Ο πειραματικός σχεδιασμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σημείο με το μεγαλύτερο αντίκτυπο, με σκοπό να μειωθεί το κόστος σχεδιασμού επιταχύνοντας τη διαδικασία του σχεδιασμού, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις μεταγενέστερες μηχανολογικές αλλαγές και απλοποιώντας το υλικό του προϊόντος και την εργασία. Τα σχεδιασμένα πειράματα είναι επίσης ισχυρά εργαλεία για την εξοικονόμηση του κόστους παραγωγής, ελαχιστοποιώντας τη διακύμανση της διαδικασίας και μειώνοντας την επαναχρησιμοποίηση, την απόρριψη και την ανάγκη για επιθεώρηση.

Σε κάθε διαδικασία υπάρχουν τρεις πτυχές οι οποίες αναλύονται κατά την διάρκεια ενός σχεδιασμένου πειράματος:

- Παράγοντες ή είσοδοι της διαδικασίας. Οι είσοδοι της διαδικασίας μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως ελεγχόμενες είτε ως ανεξέλεγκτες μεταβλητές. Οι ελεγχόμενες μεταβλητές ονομάζονται παράγοντες, ενώ οι μεταβλητές που δεν μπορούν να ελεγχθούν ονομάζονται θόρυβος. Ο θόρυβος προκαλεί μεταβλητότητα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, υπάρχει ωστόσο δυνατότητα ελέγχου του κατά τη διάρκεια του πειράματος.
- Επίπεδα ή ρυθμίσεις για κάθε παράγοντα του πειράματος. Αποτελούν το σύνολο των διαφορετικών τιμών που μπορεί να λάβει κάθε παράγοντας που συμμετέχει στο πείραμα.

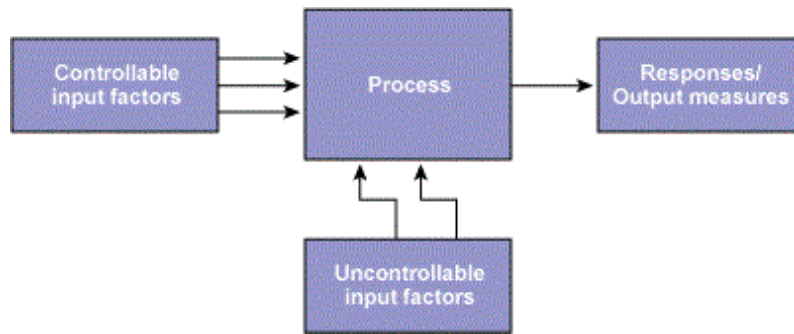
- Αποτέλεσμα ή έξοδος του πειράματος. Οι έξοδοι αποτελούνται από μετρήσιμα αποτελέσματα που επηρεάζονται από τους παράγοντες και τα αντίστοιχα επίπεδα τους. Οι εμπειρογνώμονες αποφεύγουν την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ως προς ένα αποτέλεσμα εις βάρος άλλου. Για αυτόν το λόγο, μετριοούνται και αναλύονται όλα τα σημαντικά αποτελέσματα του πειράματος, ώστε να προσδιορισθούν οι παράγοντες και τα επίπεδά τους που θα παρέχουν το συνολικά βέλτιστο αποτέλεσμα.

Τα σχεδιασμένα πειράματα έχουν πολλές δυνατές χρήσεις στην βελτίωση διεργασιών και προϊόντων, όπως:

- Σύγκριση εναλλακτικών λύσεων, η οποία παρέχει την δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου επιπέδου ενός παράγοντα ,ως προς το δίπτυχο ποιότητα-κόστος, εάν, μέσω του πειράματος, έχει προκύψει το μέγεθος της συμβολής του παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα.
- Προσδιορισμός των σημαντικών εισόδων (Παραγόντων) που επηρεάζουν στο αποτέλεσμα (διαχωρίζοντας τους ζωτικούς λίγους από τους ασήμαντους πολλούς).
- Επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος της διαδικασίας.
- Ελαχιστοποίηση, Μεγιστοποίηση ή Στόχευση ενός αποτελέσματος.
- Μείωση της μεταβλητότητας.
- Βελτίωση της ευρωστίας (robustness) και της καταλληλότητας ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας προκειμένου να χρησιμοποιηθούν υπό μεταβλητές συνθήκες.
- Εξισορρόπηση των συμβιβασμών που πρέπει να γίνουν σε περιπτώσεις που υπάρχουν πολλαπλά κριτήρια ποιότητας που απαιτούν βελτιστοποίηση.

Ο πειραματικός σχεδιασμός επιτυγχάνει αυτές τις βελτιώσεις καθορίζοντας τα εξής:

- Τους παράγοντες που θα δοκιμασθούν
- Τα επίπεδα των εκάστοτε παραγόντων
- Τη δομή και τη διάταξη των πειραματικών «τρεξιμάτων» και συνθηκών



Εικόνα 1.7: Λειτουργία ενός σχεδιασμένου πειράματος

Ένα καλά σχεδιασμένο πείραμα είναι όσο το δυνατόν απλούστερο, επιτυγχάνοντας τις απαιτούμενες πληροφορίες με οικονομικά αποδοτικό και εύκολα αναπαράξιμο τρόπο. Κατά τον σχεδιασμό ενός πειράματος, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε τέσσερα σημεία:

1. Πηγές σφαλμάτων, εκτός του σφάλματος μέτρησης, μπορεί να αποκρύψουν το σωστό αποτέλεσμα. Τα σφάλματα αυτά αποτελούν όλες τις ανεξήγητες παρεκκλίσεις που απαντώνται είτε μέσα σε ένα «τρέξιμο» του πειράματος, είτε μεταξύ διαφορετικών «τρεξιμάτων» και σχετίζονται με την αλλαγή στα επίπεδα των παραγόντων.
2. Οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες οι οποίοι προκαλούν μεταβλητότητα υπό κανονικές συνθήκες πειράματος, αναφέρονται ως «θόρυβος». Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ενσωματωθούν στο πείραμα, έτσι ώστε η μεταβλητότητα που προκαλούν να μην θεωρηθεί τυχαία ή πειραματικό σφάλμα. Βασικό στοιχείο των σχεδιασμένων πειραμάτων είναι η ικανότητα προσδιορισμού παραγόντων και επιπέδων που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των θορύβων.
3. Η συσχέτιση δύο παραγόντων συχνά συγχέεται με την αιτιότητα. Δύο παράγοντες που ποικίλλουν ταυτόχρονα, μπορεί να συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό χωρίς όμως ο ένας να προκαλεί τον άλλον. Μπορεί η συσχέτιση τους να οφείλεται σε έναν τρίτο παράγοντα.
4. Τα συνδυασμένα αποτελέσματα ή οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων απαιτούν προσεκτική σκέψη πριν την διεξαγωγή του πειράματος. Οι παράγοντες μπορούν να δημιουργήσουν μη γραμμικές επιδράσεις, όμως αυτές μπορούν να μελετηθούν μόνο με πολυπλοκότερα πειράματα που περιλαμβάνουν περισσότερα από 2 επίπεδα.

1.3.1) Η ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI

Για να επιτευχθεί ένας πλήρης σχεδιασμός παραγόντων, ο αριθμός των πιθανών σχεδίων, N που προκύπτει είναι: $N = L^m$

Όπου L = ο αριθμός των επιπέδων του κάθε παράγοντα και m = το πλήθος των παραγόντων.

Επομένως για μια διαδικασία που επηρεάζεται από τρεις παράγοντες, δύο επιπέδων ο καθένας, προκύπτουν $2^3 = 8$ διαμορφώσεις του πειράματος. Αυτό αποτελεί ένα εύκολα διαχειρίσιμο παράδειγμα και μπορεί να διερευνηθεί πλήρως, για να αυξηθεί δε η ακρίβεια του, η επιρροή των παραγόντων όσον αφορά την μεταβλητότητα του τελικού αποτελέσματος καθορίζεται έπειτα από στατιστική ανάλυση (ANOVA). Σε περίπτωση όμως που οι παράγοντες και τα επίπεδά τους είναι πολυάριθμοι, μια ενδεδειγμένη έρευνα είναι χρονοβόρα και οικονομικά ασύμφορη. Υπεισέρχονται λοιπόν τεχνικές, όπως τα κλασματικά ή μερικά παραγοντικά πειράματα (fractional or partial factorial experiments), οι οποίες απλοποιούν το πείραμα. Τα κλασματικά πειράματα, ερευνούν μόνο ένα τμήμα όλων των πιθανών συνδυασμών, εξοικονομώντας κατ' αυτόν τον τρόπο χρόνο και χρήμα. Χρειάζεται όμως αυστηρή μαθηματική επεξεργασία, τόσο στο σχεδιασμό του πειράματος, όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Παρ' όλη την ευχρηστία και αποτελεσματικότητά τους, τα κλασματικά πειράματα έχουν τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- ❖ Τα πειράματα καθίστανται δυσκολοχειρίσιστα χρονικά και χρηματικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των παραγόντων,
- ❖ Δύο σχεδιασμοί για το ίδιο πείραμα μπορούν να επιφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα,
- ❖ Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πειράματος με πολλούς παράγοντες, μπορεί να είναι δύσκολη λόγω έλλειψης σαφών οδηγιών σχεδιασμού και ανάλυσης.

Σε αυτό το κομμάτι ο Δρ. Genichi Taguchi, πρότεινε μια καινοτόμο μέθοδο. Απλοποίησε και τυποποίησε τους κλασματικούς παραγοντικούς σχεδιασμούς, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε φορά να προκύπτει το ίδιο αποτέλεσμα.

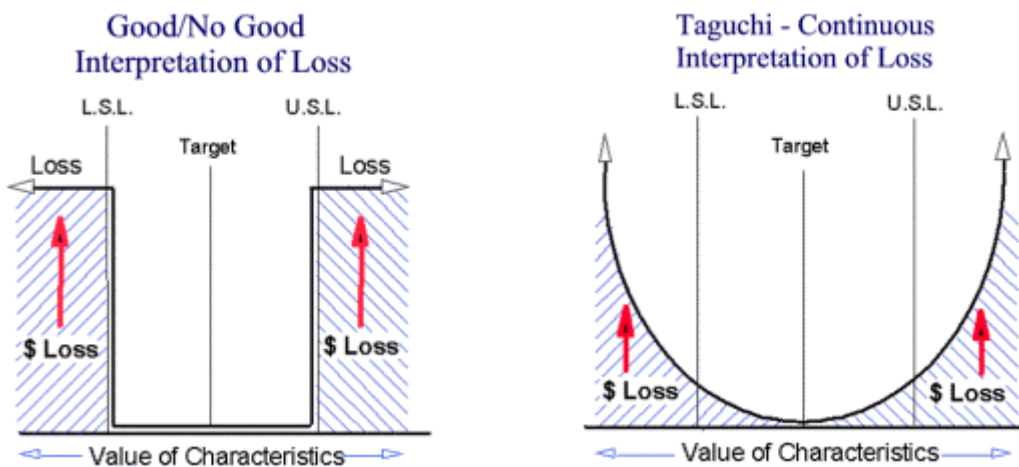
Προκειμένου ο πειραματικός σχεδιασμός να γίνει πιο εύκολος και πιο προσιτός στη βιομηχανία, ο Δρ. Taguchi, πρότεινε να ληφθούν τα εξής υπόψη κατά την εφαρμογή των πειραμάτων:

- Ορισμός της ποιότητας. Ο Δρ. Taguchi όρισε την ποιότητα σε σχέση με την ελάχιστη απώλεια για την κοινωνία. Αυτό με μετρήσιμους μηχανολογικούς όρους σημαίνει συνοχή της απόδοσης. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή, είτε αυτή είναι ένα προϊόν ή μια διαδικασία, είτε είναι ο τρόπος μέτρησης των αποτελεσμάτων, η συνοχή της απόδοσης θεωρείται πρωταρχικό χαρακτηριστικό. Η συνοχή επιτυγχάνεται όταν το αποτέλεσμα βρίσκεται κοντά στο στόχο, με τη μικρότερη απόκλιση. Για την βελτίωση της ποιότητας, ο Taguchi πρότεινε μια προσέγγιση βελτιστοποίησης σε δύο βήματα:
 - ✚ Εύρεση του συνδυασμού των επιπέδων των παραγόντων, που μειώνουν την μεταβλητότητα του αποτελέσματος.
 - ✚ Ρύθμιση των επιπέδων των παραγόντων που φέρνουν το αποτέλεσμα πιο κοντά στο στόχο.
- Τυποποιημένο DoE. Για το σχεδιασμό των πειραμάτων ο Δρ. Taguchi χρησιμοποίησε ένα ειδικό σύνολο πινάκων, που ονομάζονται ορθογώνιες διατάξεις (Orthogonal Arrays ή OA). Οι διατάξεις αυτές αντιπροσωπεύουν τους μικρότερους κλασματικούς παράγοντες και χρησιμοποιούνται για τα πιο κοινά πειράματα.

Experiment Number	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Εικόνα 1.8: Παράδειγμα ορθογώνιας διάταξης (4 παράγοντες-3 επίπεδα)

- Εύρωστη στρατηγική σχεδιασμού (Robust Design Strategy). Προκείμενου να εξαιρεθεί η επιρροή των θορύβων πάνω στα προϊόντα και στις διαδικασίες, ο Δρ. Taguchi ενσωμάτωσε έναν επίσημο τρόπο για να συμπεριληφθούν οι θόρυβοι στην διεξαγωγή του πειράματος. Αυτή η νέα δομή, που αποκαλείται σχεδιασμός εξωτερικών διατάξεων (Outer Array Design), διευκολύνει την διεξαγωγή πειραμάτων μικρότερου μεγέθους για την μελέτη των επιπτώσεων ενός μεγαλύτερου αριθμού θορύβων. Αυτό οδηγεί σε μια επιθυμητή απόδοση με την μέση τιμή να βρίσκεται πολύ κοντά στο στόχο και μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή.
- Συνάρτηση απώλειας. Το μαθηματικό μοντέλο που σχετίζεται με την έννοια της συνάρτησης της απώλειας και προτάθηκε από τον Δρ. Taguchi, επιτρέπει έναν απλό τρόπο για την ποσοτικοποίηση των βελτιώσεων σε νομισματικές μονάδες. Οι έννοιες αυτές μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν την προβλεπόμενη βελτίωση που προκύπτει από το DoE, υπό την έννοια της αναμενόμενης εξοικονόμησης κόστους.



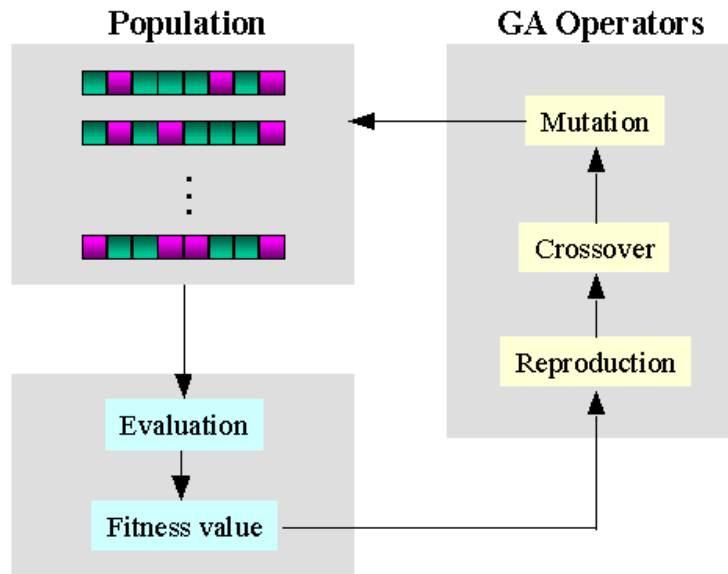
Εικόνα 1.9: Η συνάρτηση απώλειας στην μέθοδο Taguchi συγκριτικά με το σύστημα GO-NO GO

- Ανάλυση σήματος-προς-θόρυβο (Signal-to-Noise Analysis ή S/N Analysis). Για την ανάλυση αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από δοκιμές με πολλά δείγματα, η χρήση του λόγου σήμα/θόρυβος (S/N ratio), αντί της χρήσης των καθαυτό αποτελεσμάτων, διευκολύνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός σχεδιασμένου πειράματος. Επιπροσθέτως, ο λογαριθμικός μετασχηματισμός των αποτελεσμάτων σε αναλογίες S/N, ενδυναμώνει την πρόβλεψη της βελτίωσης των επιδόσεων της ανάλυσης.

1.4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ευρετικές προσεγγίσεις αναζήτησης που έχουν εφαρμογή σε μια ευρεία κλίμακα προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν ως βάση την Δαρβινική θεωρία της εξέλιξης και την φιλοσοφία της επικράτησης του δυνατότερου.

Ο κλασικός γενετικός αλγόριθμος βασίζεται σε ένα σύνολο υποψηφίων λύσεων που αντιπροσωπεύουν μία λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Κάθε μια λύση από αυτό το σύνολο αποτελεί έναν εν δυνάμει υποψήφιο για τη βέλτιστη απάντηση του προβλήματος. Η αναπαράστασή του βέλτιστου αποτελέσματος παίζει σημαντικό ρόλο καθώς υπαγορεύει την επιλογή των γενετικών χειριστών. Εάν οι αναπαραστάσεις είναι συνεχείς ονομάζονται φορείς (vectors), εάν όμως αποτελούνται από δυαδικά ψηφία ονομάζονται χορδές. Οι χειριστές του γενετικού αλγορίθμου παράγουν νέες λύσεις στην επιλεγμένη αναπαράσταση του προβλήματος και επιτρέπουν την αναζήτηση στο χώρο των λύσεων. Η κωδικοποίηση της αναπαράστασης της λύσης του προβλήματος, ονομάζεται γονότυπος (genotype) ή χρωμόσωμα (chromosome). Στην αρχή του αλγορίθμου, ένα σύνολο πιθανών λύσεων, το οποίο ονομάζεται πληθυσμός, αρχικοποιείται. Η προετοιμασία αυτή θα πρέπει όσο το δυνατόν να γίνεται με τυχαία επιλογή σε όλο το φάσμα των λύσεων ή να ενσωματώνει και να μοντελοποιεί γνώση που βασίζεται στην εμπειρία. Η αναπαράσταση καθορίζει τη διαδικασία της αρχικοποίησης. Στην συνέχεια, η κύρια επαναληπτική διαδικασία για κάθε γενιά του γενετικού αλγορίθμου δημιουργεί νέους απογόνους (υποψήφιας λύσεις) με την διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης έως ότου να τερματιστεί ο πληθυσμός.



Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου

- Διασταύρωση (Crossover): Η διασταύρωση είναι ένας από τους χειριστές του γενετικού αλγορίθμου που επιτρέπει το συνδυασμό γενετικού υλικού μεταξύ δύο ή περισσότερων λύσεων. Οι χειριστές της διασταύρωσης του γενετικού αλγορίθμου, εφαρμόζουν ένα μηχανισμό που αναμιγνύει το γενετικό υλικό των «γονέων». Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, για αναπαράσταση με χορδή, είναι η διασταύρωση στο «n» σημείο. Διαχωρίζει δυο λύσεις σε ένα «n» σημείο της χορδής τους και εναλλάσσει τα δύο τμήματα, δημιουργώντας έτσι μια νέα λύση. Σε περίπτωση συνεχούς αναπαράστασης, οι χειριστές προσανατολίζονται σε αριθμητικές λειτουργίες. Η αριθμητική διασταύρωση, υπολογίζει τον αριθμητικό μέσο όρο όλων των γονικών λύσεων ανά συνιστώσα. Η κυρίαρχη διασταύρωση επιλέγει διαδοχικά κάθε συστατικό από μία γονική λύση. Πολλοί γενετικοί αλγόριθμοι απλοποιούν το βήμα της διασταύρωσης επιλέγοντας τυχαία τους γονείς με ομοιόμορφη κατανομή.
- Μετάλλαξη (Mutation): Ο δεύτερος πρωταγωνιστής στους γενετικούς αλγορίθμους, είναι η μετάλλαξη. Οι χειριστές της, αλλάζουν μια λύση με το να την διαταράσσουν. Η μετάλλαξη βασίζεται σε τυχαίες αλλαγές, ενώ η ισχύς αυτής της διατάραξης ονομάζεται ρυθμός μετάλλαξης. Σε συνεχής χώρους λύσεων, η μετάλλαξη είναι γνωστή ως βήμα.

Κάθε χειριστής μετάλλαξης πληροί τρεις προϋποθέσεις:

- 1) Προσβασιμότητα. Κάθε σημείο στον χώρο των λύσεων, πρέπει να είναι προσβάσιμο από ένα άλλο, αυθαίρετο σημείο του χώρου. Ένα παράδειγμα το οποίο περιπλέκει την εκπλήρωση αυτής της προϋπόθεσης είναι οι περιορισμοί (constraints), οι οποίοι συρρικνώνουν τον χώρο των λύσεων σε ένα υποσύνολο. Θα πρέπει όμως να υπάρχει έστω και μία ελάχιστη πιθανότητα να πλησιαστεί οποιοδήποτε σημείο στο χώρο των λύσεων, αλλιώς μειώνονται οι πιθανότητες εύρεσης του βέλτιστου αποτελέσματος.
- 2) Αμεροληψία. Ο χειριστής της μετάλλαξης δεν θα πρέπει να παρασύρει την αναζήτηση προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, τουλάχιστον σε χώρους λύσεων άνευ περιορισμών. Στις περιπτώσεις, αντίθετα, που υπάρχουν περιορισμοί, η προτίμηση του χειριστή μπορεί να επιφέρει πλεονεκτήματα.
- 3) Δυνατότητα κλιμάκωσης. Κάθε χειριστής, πρέπει να προσφέρει το βαθμό ελευθερίας του οποίου η δύναμη είναι προσαρμόσιμη. Αυτό συνήθως είναι εφικτό για χειριστές που βασίζονται σε πιθανοτικές κατανομές.

Η εφαρμογή των χειριστών της μετάλλαξης εξαρτάται από την αναπτυχθείσα αναπαράσταση. Για τις χορδές, χρησιμοποιείται συνήθως η τεχνική «bit flip». Η συγκεκριμένη μετάλλαξη εναλλάσσει ένα μηδενικό δυαδικό ψηφίο της χορδής με ένα μοναδιαίο και αντίστροφα με μία καθορισμένη πιθανότητα, η οποία παίζει το ρόλο του ρυθμού μετάλλαξης. Κατά κύριο λόγο ο ρυθμός επιλέγεται ανάλογα με το μέγεθος της χορδής, εάν δηλαδή η χορδή έχει μήκος N , ο ρυθμός μετάλλαξης είναι $1/N$. Εάν η αναπαράσταση είναι μια λίστα ή μία χορδή αυθαίρετων στοιχείων, η μετάλλαξη επιλέγει τυχαία την αντικατάσταση κάθε στοιχείου. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως τυχαία επαναφορά. Για συνεχείς αναπαραστάσεις, ο πιο δημοφιλής χειριστής, είναι η μετάλλαξη Gaussian.

- Χαρτογράφηση του γονότυπου-φαινότυπου (Genotype-Phenotype Mapping): Έπειτα από τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, ο νέος πληθυσμός των απογόνων πρέπει να αξιολογηθεί. Κάθε υπονήφια λύση πρέπει να αξιολογηθεί όσον αφορά την ικανότητά της να επιλύει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Αναλόγως με την αναπαράσταση, μια χαρτογράφηση του χρωμοσώματος, ο γονότυπος, που στην πραγματική λύση χαρακτηρίζεται ως φαινότυπος, είναι απαραίτητη. Η χαρτογράφηση αυτή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απροκατάληπτη. Για παράδειγμα, μια προκατειλημμένη χαρτογράφηση θα μπορούσε να χαρτογραφήσει το μεγαλύτερο μέρος του χώρου-γονότυπου σε ένα μικρό σύνολο φαινοτύπων. Η χαρτογράφηση γονότυπου-φαινότυπου δεν απαιτείται πάντοτε. Για παράδειγμα, στην συνεχή βελτιστοποίηση, ο γονότυπος αποτελεί την ίδια την λύση. Πολλές άλλες όμως εξελικτικές διαδικασίες μοντελοποίησης απαιτούν αυτήν τη χαρτογράφηση.
- Καταλληλότητα (Fitness): Σε αυτό το βήμα, ο φαινότυπος μιας λύσης, αξιολογείται σύμφωνα με μια συνάρτηση καταλληλότητας. Η συνάρτηση αυτή μετρά την ποιότητα των λύσεων που έχουν προκύψει από το γενετικό αλγόριθμο. Ο σχεδιασμός της συνάρτησης αποτελεί μέρος της διαδικασίας της μοντελοποίησης. Σε περιπτώσεις πολλαπλών στόχων (multi-objective optimization), που πρέπει να βελτιστοποιηθούν παράλληλα, μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση καταλληλότητας για κάθε μεμονωμένο στόχο, για παράδειγμα υπολογίζοντας το σταθμισμένο σύνολο. Μια σημαντική πτυχή είναι η δίκαιη αξιολόγηση της ποιότητας των λύσεων. Κατά συνέπεια, η επιλογή των ποινών για τις λύσεις που είναι ανέφικτες αλλά και η επιλογή της κατάλληλης βαρύτητας για την πολλαπλή βελτιστοποίηση είναι σημαντικός σχεδιαστικός στόχος. Η απόδοση του γενετικού αλγορίθμου μετράται με τον σύνολο των απαιτούμενων συναρτήσεων καταλληλότητας έως ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση.

- Επιλογή (Selection): Για να επιτραπεί η σύγκλιση προς τις βέλτιστες συνθήκες, οι καλύτερες λύσεις-απόγονοι θα πρέπει να επιλεγούν ως γονικές λύσεις για την επόμενη γενιά. Η επιλογή αυτή γίνεται βάσει των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας για την κάθε λύση. Στα προβλήματα ελαχιστοποίησης, προτιμώνται χαμηλές τιμές της συνάρτησης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε προβλήματα μεγιστοποίησης. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο αυτών προβλημάτων καθίσταται εύκολη με την προσθήκη αρνητικού ή θετικού συμβόλου αντίστοιχα. Παραδείγματα μεθόδων επιλογής είναι τα εξής:

- ✓ Ελιτιστική επιλογή (elitist selection), στην οποία οι χειριστές επιλέγουν τις καλύτερες λύσεις-απογόνους και τις χρησιμοποιούν ως γονικές.

- ✓ Επιλογή Plus (Plus selection), στην οποία επιλέγονται X βέλτιστες λύσεις-απόγονοι μαζί με τον Y αριθμό γονικών λύσεων που οδήγησαν στην δημιουργία τους.

- ✓ Τροχός Ρουλέτας (Roulette Wheel), ή γνωστός και ως αναλογική επιλογή καταλληλότητας, ο οποίος επιλέγει τυχαία από τις γονικές λύσεις με ομοιόμορφη κατανομή. Η πιθανότητα της επιλογής, εξαρτάται από την καταλληλότητα της λύσης. Για τον σκοπό αυτό, η σχετική καταλληλότητα των λύσεων κανονικοποιείται με το άθροισμα όλων των τιμών καταλληλότητας του πληθυσμού.

- ✓ Επιλογή τουρνουά (Tournament Selection), στην οποία επιλέγεται τυχαία μια σειρά λύσεων και σε αυτό το υποσύνολο του ανταγωνισμού, επιλέγονται οι καλύτερες λύσεις ως νέοι γονείς. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί με χρήση αναλογικής επιλογής καταλληλότητας.

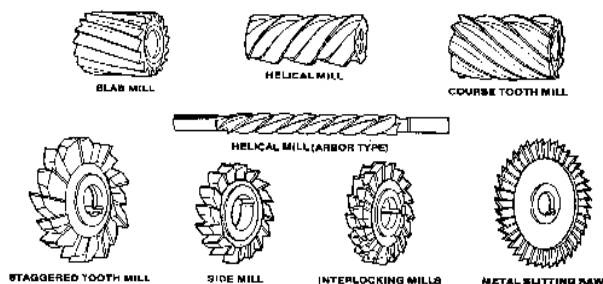
- Τερματισμός (Termination): Η συνθήκη τερματισμού ορίζει πότε θα τερματίσει ο κύριος εξελικτικός βρόχος. Ο γενετικός αλγόριθμος συχνά «τρέχει» για έναν ορισμένο αριθμό γενεών, το οποίο εξυπηρετεί πολλές περιπτώσεις που ο χρόνος και το κόστος που απαιτεί η συνάρτηση καταλληλότητας είναι ασύμφορα. Μια έτερη συνθήκη τερματισμού είναι η σύγκλιση της διαδικασίας. Εάν κατά την σύγκλιση, στην οποία παρατηρείται μείωση της προόδου της βελτίωσης, δεν υπάρχει ιδιαίτερη πρόοδος, η διαδικασία σταματά. Η έλλειψη προόδου μπορεί βέβαια να σημαίνει ότι ο αλγόριθμος έχει κολλήσει σε τοπικό ελάχιστο, χωρίς προφανώς να υπάρχει δυνατότητα να βρει το ολικό. Για να αποφευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται στρατηγικές επανεκκίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

2.1.1) ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Η διάκριση των κοπτικών εργαλείων γίνεται αρχικά με βάση την εργαλειομηχανή στην οποία κατεργάζονται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα κοπτικά εργαλεία για μία οριζόντια φραιζομηχανή διαφέρουν από αυτά μιας κάθετης. Για το πρώτο είδος φραιζομηχανών χρησιμοποιούνται κυρίως περιφερικοί ή κυλινδρικοί κοπτήρες με ελικοειδή δόντια. Στις κάθετες φραιζομηχανές χρησιμοποιούνται, αντιθέτως, δισκοειδείς κοπτήρες όπως παρουσιάζονται και στο παρακάτω σχήμα.

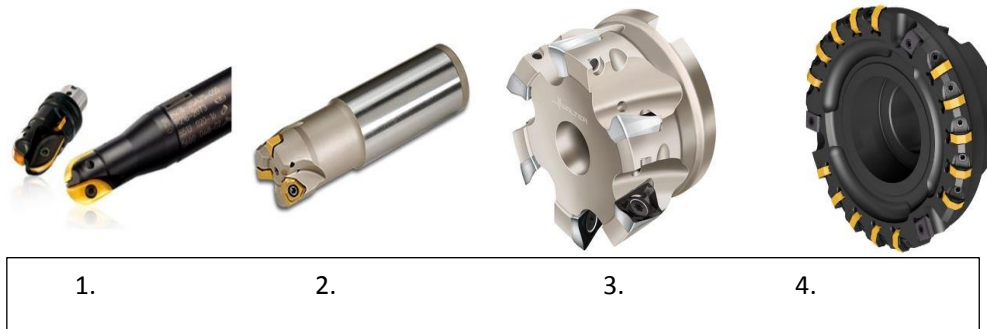


Εικόνα 2.1: Κοπτικά εργαλεία για οριζόντιο (άνω) και κάθετο (κάτω) φραιζάρισμα

Τα σύγχρονα όμως κέντρα κατεργασιών έχουν, όπως προαναφέρθηκε, την δυνατότητα ελέγχου της κίνησης σε πολλαπλούς άξονες καθώς και αυτόματους εναλλάκτες εργαλείων. Η δυνατότητά τους επομένως να εκτελούν διαφόρων ειδών κατεργασίες, έχει καθορίσει και την μορφή των εργαλείων που χρησιμοποιούν. Στο κεφάλαιο της εισαγωγής στις κατεργασίες κοπής, αναλύθηκαν τα στάδια τα οποία περνά η κατεργασία ενός τεμαχίου μέχρι την ολοκλήρωσή της. Σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια απαιτούνται τα κατάλληλα κοπτικά εργαλεία, προκειμένου ο χρόνος, αλλά και η ποιότητα της κατεργασίας να είναι βέλτιστα. Επομένως ένα κέντρο κατεργασιών διαθέτει διαφορετικά κοπτικά εργαλεία για εκχόνδριση ή αποπεράτωση, μετωπικό ή περιφερικό φραιζάρισμα, επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες.

Η αρχική διάκριση των κοπτικών εργαλείων γίνεται με βάση το εάν φέρουν ένθετα πλακίδια (inserts) ή εάν αποτελούνται από συμπαγές υλικό (solid). Στην πρώτη περίπτωση ονομάζονται στελέχη ή μανέλες, ενώ στη δεύτερη κονδυλοφόρα εργαλεία ή κονδύλια.

- Στελέχη φραιζαρίσματος με ένθετα (Indexable cutters). Η κατηγορία των στελεχών χαρακτηρίζεται από τα κοπτικά πλακίδια τα οποία προσδένονται πάνω στο στέλεχος και αλλάζουν έπειτα από πιθανή φθορά ή αστοχία. Η μορφή των στελεχών φραιζαρίσματος διαφέρει ανάλογα με την κατεργασία που εκτελούν όπως διακρίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2: Στελέχη με ένθετα πλακίδια για 1) Αποπεράτωση με ακτίνα 2) Αποπεράτωση 3) Εκχόνδριση 4) Μετωπικό φραιζάρισμα

- Κονδυλοφόρα εργαλεία ή κονδύλια (Solid End Mills). Τα κονδύλια χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατεργασίες φραιζαρίσματος και πολλές φορές και στα τελικά στάδια κατεργασίας διαμορφώσεων. Τα εργαλεία αυτά αποτελούνται από ένα κυλινδρικό σώμα που κατά μήκος του αναπτύσσεται μία ή περισσότερες κοπτικές ακμές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε κατεργασίες εκχόνδρισης, φινιρίσματος αλλά και ειδικών διαμορφώσεων όπως τα κονδύλια με σφαιρική απόληξη (ball nose end mills) στα οποία το κυλινδρικό σώμα καταλήγει σε ημισφαιρικό τμήμα όπου πάνω του αναπτύσσεται η κοπτική ακμή με την ελίκωση.



Εικόνα 2.3: Διάφοροι τύποι κονδυλιών

Τα δύο πιο συχνά υλικά κοπτικών εργαλείων είναι ο ταχυγάλυβας (HSS) και το καρβίδιο (carbide).

2.1.2) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ

1) **Ταχύτητα Κοπής:** Εκφράζει το ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση που είναι η περιστροφή του εργαλείου. Η ταχύτητα κοπής δίνεται από τον τύπο:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

Όπου: D: Διάμετρος κοπτικού εργαλείου (mm)

n: Ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου (RPM)

2) **Πρόωση:** Είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο και ονομάζεται ταχύτητα πρόωσης. Συνήθως η κίνηση της πρόωσης είναι στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι εκφράζεται ως ταχύτητα κίνησης του. Η επιλογή της ταχύτητας πρόωσης εξαρτάται από το κοπτικό εργαλείο, το κατεργαζόμενο υλικό, το βάθος κοπής και την επιδιωκόμενη ποιότητα επιφανείας. Η πρόωση στο φραιζάρισμα δίνεται με δύο μορφές:

✚ **Πρόωση ανά λεπτό f_{min}** (mm/min): είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο σε ένα λεπτό.

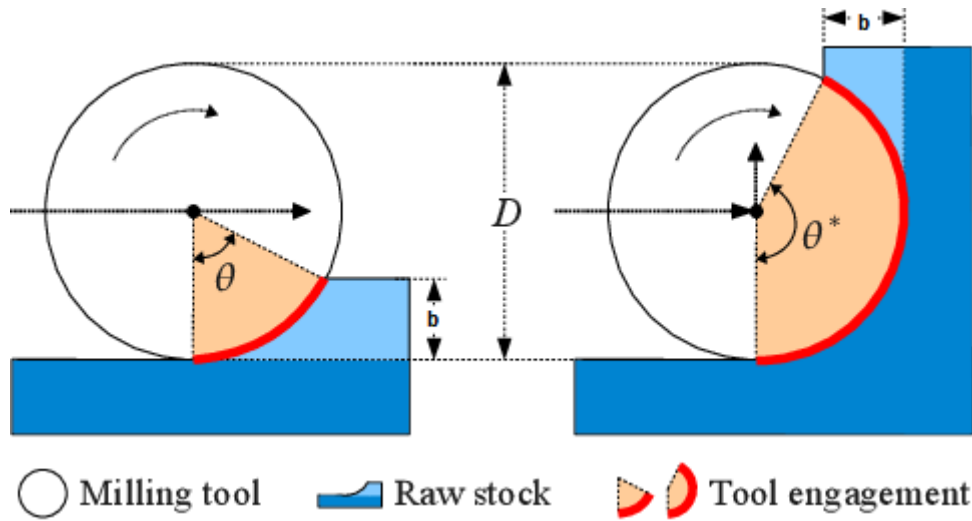
✚ **Πρόωση ανά δόντι f_z** (mm/tooth): είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο, στο χρονικό διάστημα από την εισχώρηση ενός δοντιού της φραιζας, μέχρι την εισχώρηση του επόμενου.

Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές προώσεις είναι η εξής:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n \quad (2)$$

Όπου: z: αριθμός οδόντων του κοπτικού εργαλείου

3) **Γωνία επαφής:** Η γωνία επαφής στο περιφερικό φραιζάρισμα είναι η γωνία του τόξου στο οποίο υπάρχει κοπή και προκύπτει συναρτήσει του βάθους κοπής b και της διαμέτρου του κοπτικού D .



Εικόνα 2.4: Γωνία επαφής στο περιφερικό φραιζάρισμα

Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\cos \theta = 1 - \left(\frac{2 \cdot b}{D} \right) \quad (3)$$

4) **Μέσο πάχος αποβλίττου:** Το απόβλιττο κατά την κατεργασία του περιφερικού φραιζαρίσματος μεταβάλλεται αυξανόμενο ή μειούμενο, ανάλογα εάν το φραιζάρισμα είναι αντίρροπο ή ομόρροπο αντίστοιχα. Στο αντίρροπο φραιζάρισμα το απόβλιττο ξεκινά από μηδενικό πάχος και αυξάνεται συνεχώς, πράγμα το οποίο έχει ως συνέπεια την ομαλή κατεργασία χωρίς ένταση για το δόντι. Αντίθετα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα, το απόβλιττο ξεκινά με το μέγιστο πάχος του, γεγονός που σημαίνει μια ξαφνική κρουστική καταπόνηση στο κοπτικό δόντι. Για υπολογισμούς συχνά χρησιμοποιείται η τιμή του μέσου πάχους αποβλίττου που μπορεί να δώσει εικόνα για τις μέσες δυνάμεις κοπής.

$$h_m = \frac{360^\circ}{\pi \cdot \theta} \cdot \frac{b}{D} \cdot f_z \cdot \text{sink} \quad (4)$$

Όπου: h_m : το μέσο πάχος αποβλίττου (mm)
 θ : η γωνία επαφής ($^\circ$)
 b : βάθος κοπής (mm)
 f_z : πρόωση ανά οδόντα (mm/tooth)
 κ : 90° – λ για κοπτήρα με γωνία ελίκωσης λ και για ευθέα δόντια $\kappa=90^\circ$

5) Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (Material Removal Rate ή MRR): Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού εκφράζει τον όγκο του υλικού που κατεργάζεται ανά μονάδα χρόνου.

$$\theta = \frac{b \cdot B \cdot f_{min}}{1000} \text{ (cm}^3/\text{min)} \quad (5)$$

Όπου: B : πλάτος κοπής (mm)

6) Ισχύς Κοπής: Η ισχύς που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του φραιζαρίσματος προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_c = \frac{b \cdot B \cdot f_{min}}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} \cdot K_c \text{ (kW)} \quad (6)$$

Όπου: η : Συντελεστής απόδοσης εργαλειομηχανής

K_c : Ειδική ισχύς κοπής (kW)

- Ειδική Ισχύς Κοπής: Η ειδική ισχύς της κοπής μπορεί να οριστεί ως η δύναμη F_c , στην κατεύθυνση της κοπής, που απαιτείται για να κόψει περιοχή αποβλίττου 1 mm^2 που έχει πάχος 1 mm . Η τιμή της διαφέρει για τις διαφορετικές κατηγορίες υλικών, αλλά υπάρχει διαφορά και μέσα στις ίδιες τις κατηγορίες. Ακολουθεί πίνακας της εταιρείας Mitsubishi με χαρακτηριστικές τιμές του K_c , ανάλογα με τη σύσταση του κατεργαζόμενου υλικού και την πρόωση ανά οδόντα.

Workpiece material	Tensile strength (MPa) and hardness	Specific Cutting Force Kc(MPa)				
		0.1(mm/tooth)	0.2(mm/tooth)	0.3(mm/tooth)	0.4(mm/tooth)	0.6(mm/tooth)
Mild Steel	520	2200	1950	1820	1700	1580
Medium Steel	620	1980	1800	1730	1600	1570
Hard Steel	720	2520	2200	2040	1850	1740
Tool Steel	670	1980	1800	1730	1700	1600
Tool Steel	770	2030	1800	1750	1700	1580
Chrome Manganese Steel	770	2300	2000	1880	1750	1660
Chrome Manganese Steel	630	2750	2300	2060	1800	1780
Chrome Molybdenum Steel	730	2540	2250	2140	2000	1800
Chrome Molybdenum Steel	600	2180	2000	1860	1800	1670
Nickel Chrome Molybdenum Steel	940	2000	1800	1680	1600	1500
Nickel Chrome Molybdenum Steel	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Cast Iron	520	2800	2500	2320	2200	2040
Hard Cast Iron	46HRC	3000	2700	2500	2400	2200
Meehanite Cast Iron	360	2180	2000	1750	1600	1470
Gray Cast Iron	200HB	1750	1400	1240	1050	970
Brass	500	1150	950	800	7000	630
Light Alloy (Al-Mg)	160	580	480	400	350	320
Light Allow (Al-Si)	200	700	600	490	450	390

Εικόνα 2.5: Τυπικές τιμές του Kc

7) **Τραχύτητα Επιφάνειας:** Η κύρια συνιστώσα της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας είναι η τραχύτητα της, η οποία είναι συνάρτηση με την ακρίβεια ή την ανοχή σε ένα εξάρτημα. Οι τύποι υπολογισμού της τραχύτητας εξαρτώνται από τον τύπο του φραιζαρίσματος. Επομένως ισχύει:

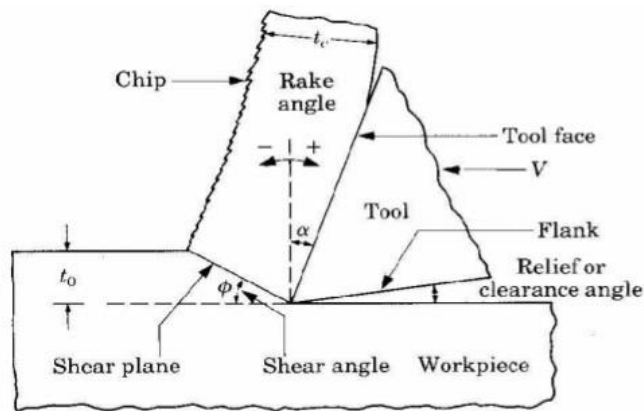
- Μετωπικό φραιζάρισμα: Η θεωρητική μέγιστη τιμή της τραχύτητας κατά το μετωπικό φραιζάρισμα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{max\theta} = \frac{f_z}{\cot\kappa + \tan\kappa'} \quad (7)$$

Όπου: κ: γωνία θέσεως της κύριας κόψης (εξαρτάται από τη γωνία rake)

κ': γωνία θέσεως της δευτερεύουσας κόψης (clearance angle)

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γωνίες της κοπής.



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση των γωνιών της κοπής

- Περιφερικό φραιζάρισμα: Η θεωρητική τραχύτητα (μέγιστη και μέση) στο περιφερικό φραιζάρισμα, με κυκλική τροχιά κοπτικού εκφράζεται ως εξής:

✚ Μέγιστη τραχύτητα:

$$R_{max\theta} \cong 250 \cdot \frac{f_z^2}{4 \cdot D} \text{ (mm)} \quad (8)$$

✚ Μέση τραχύτητα:

$$R_{a\theta} \cong 64,2 \cdot \frac{f_z^2}{D} \text{ (mm)} \quad (9)$$

8) Χρόνος Κοπής: Ο συνολικός χρόνος ο οποίος απαιτείται για την ολοκλήρωση μια κατεργασίας μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω σχέση:

$$T_C = i \cdot \frac{L}{z \cdot n \cdot f_z} \text{ (min)} \quad (10)$$

Όπου: i: ο αριθμός των πάσσων

L: το μήκος κατεργασίας επί του κατεργαζόμενου τεμαχίου που απαιτείται για ένα πάσσο (mm)

2.1.3) ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας φραιζαρίσματος, είναι πιθανή η εμφάνιση κάποιας μορφής μηχανικής ταλάντωσης που οφείλεται στην έλλειψη δυναμικής ακαμψίας στο σύστημα κοπτικό εργαλείο – άτρακτος – τεμάχιο. Οι μηχανικές ταλαντώσεις αυτές διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- ✚ Ελεύθερες ταλαντώσεις, οι οποίες εμφανίζονται όταν το σύστημα μετατοπίζεται από το σημείο ισορροπίας του και αρχίζει να πάλλεται ελεύθερα.
- ✚ Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, που προκαλούνται από εξωτερικά αίτια.
- ✚ Αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις, οι οποίες οφείλονται στην αλληλεπίδραση του κοπτικού εργαλείου και της εργαλειομηχανής με το τεμάχιο, καταναλώνοντας ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ασκείται ένα πλήθος δυνάμεων οι οποίες έχουν αντίκτυπο στη διαμόρφωση του τεμαχίου καθώς προκαλούν δομικές παραμορφώσεις. Οι προκαλούμενες παραμορφώσεις προσδιορίζουν το πάχος του αποβλίττου, το οποίο με τη σειρά του έχει αντίκτυπο στις δυνάμεις κοπής. Δημιουργείται λοιπόν ένας βρόχος, οποίος για ορισμένες συνθήκες κοπής μπορεί να εμφανίσει αστάθεια. Η ασταθής λοιπόν αλληλεπίδραση των δυνάμεων κοπής και των παραμορφώσεων που δημιουργούν, έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης. Στην περίπτωση του φραιζαρίσματος, τέτοια μορφή ταλάντωσης προκαλείται όταν το πάχος του αποβλίττου είναι πολύ μεγάλο ως προς την στιβαρότητα του συστήματος τεμάχιο – κοπτικό εργαλείο – εργαλειομηχανή.

Καθώς οι δύο πρώτες κατηγορίες των ταλαντώσεων είναι πιο εύκολο να αναγνωριστούν και να περιοριστούν, οι αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις αποτελούν σημαίνων κομμάτι της μελέτης μιας κατεργασίας λόγω της πολυπλοκότητας τους αλλά και των σημαντικών επιπτώσεων που έχουν σε αυτήν. Αναφορικά οι σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις που παρατηρούνται σε μία κατεργασία ως απόρροια των αυτοδιεγείρομενων ταλαντώσεων:

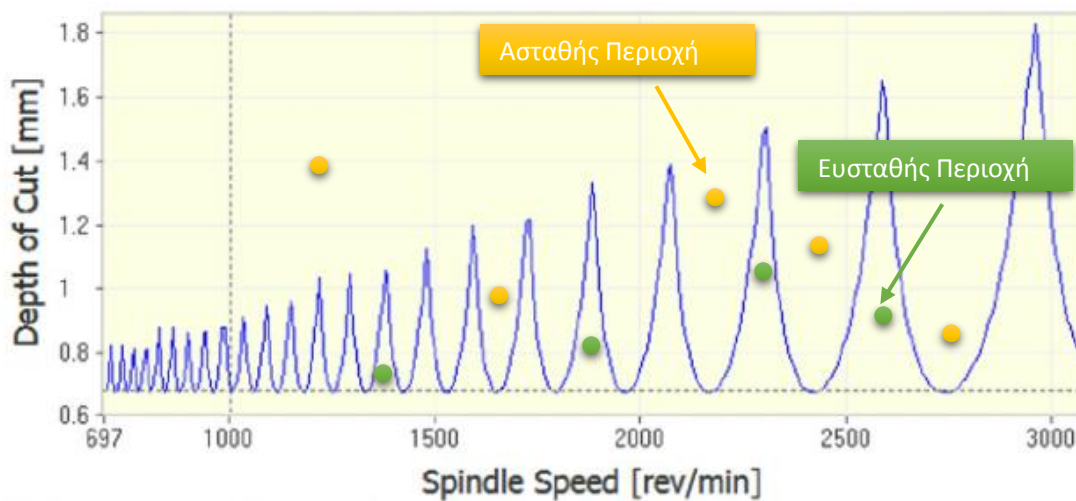
- ❖ Υψηλή τραχύτητα επιφάνειας
- ❖ Υψηλή φθορά του κοπτικού εργαλείου
- ❖ Μείωση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού
- ❖ Αύξηση χρόνου παραγωγής
- ❖ Ανακρίβειες επιφανειών και διαστάσεων

Ο όσο το δυνατόν καλύτερος έλεγχος του φαινομένου είναι ιδιάζουσας σημασίας, προκειμένου να προστατευθεί η παραγωγή ενός τεμαχίου. Λόγω όμως της δυσκολίας ή και αδυναμίας μελέτης του φαινομένου, οι χειριστές καλούνται να επιλέξουν χαμηλότερες συνθήκες κοπής, είτε να προβούν σε διορθωτικές ενέργειες για να εξαλείψουν τα σημάδια που προκλήθηκαν λόγω της ταλάντωσης (chatter), πράγμα το οποίο έχει αντίκτυπο στην παραγωγικότητα.

Μία μέθοδος ελέγχου των ταλαντώσεων, η οποία προσφέρει συνθήκες κοπής που δεν προκαλούν ταλαντώσεις, είναι η δημιουργία διαγραμμάτων λοβών ευστάθειας.

Η δημιουργία τέτοιου διαγράμματος προϋποθέτει την ύπαρξη συνάρτησης μεταφοράς της δομής του συστήματος τεμάχιο-εργαλείο στη ζώνη κοπής. Μέσω αυτής της συνάρτησης μεταφοράς επιλέγονται συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις. Χρησιμοποιώντας αυτές τις συχνότητες υπολογίζεται η ιδιοτιμή της συνάρτησης μεταφοράς. Κατόπιν υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος κοπής δηλαδή το βάθος κοπής στο οποίο ξεκινά η ταλάντωση και η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής.

Επαναλαμβάνοντας τα προηγούμενα βήματα για όλες τις παρατηρηθείσες συχνότητες της ταλάντωσης, προκύπτει ένα διάγραμμα που διαθέτει μια σειρά από οδοντωτούς λοβούς που διασταυρώνονται ο ένας με τον άλλον. Οι λοβοί αυτοί αποτελούν τα όρια εμφάνισης αυτοδιεγερόμενων ταλαντώσεων. Τοπικά σε κάθε λοβό, η κατεργασία είναι σταθερή κάτω από το λοβό και ασταθής πάνω από το λοβό υπό τις αντίστοιχες συνθήκες που τη χαρακτηρίζουν. Επειδή οι λοβοί τέμνονται, ένα σημείο που βρίσκεται κάτω από ένα λοβό, μπορεί ταυτόχρονα να βρίσκεται πάνω από ένα γειτονικό λοβό. Αυτό το σημείο πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ασταθές. Παράδειγμα διαγράμματος λοβών ευστάθειας, ακολουθεί παρακάτω:



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα Λοβών Ευστάθειας

2.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

2.2.1) ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Κάθε προϊόν έχει σχεδιαστεί για να εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Ορισμένα μετρήσιμα χαρακτηριστικά, γενικώς γνωστά ως χαρακτηριστικά ποιότητας, χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν πόσο καλά ένα προϊόν εκτελεί αυτήν την λειτουργία.

Ανεξαρτήτως της μεθόδου με την οποία μετράται η ποιότητα του προϊόντος (είτε με ένα μοναδικό κριτήριο, είτε με συνδυασμό πολλών) η μέτρηση θα πρέπει να διαθέτει ένα από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, τα οποία υποδεικνύουν την προσδοκώμενη κατεύθυνση των αποτελεσμάτων:

- Bigger is better, το οποίο επιδιώκει την μεγιστοποίηση του αποτελέσματος
- Smaller is better, το οποίο επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του αποτελέσματος
- Nominal is best, το οποίο επιδιώκει την απόκτηση συγκεκριμένης τιμής-στόχου

Η προσέγγιση της μεθόδου Taguchi για την ενίσχυση της ποιότητας ακολουθεί δύο βήματα:

- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του προϊόντος ή της διαδικασίας
- Κατασκευή του σχεδιασμού ώστε να είναι ανεπηρέαστο από τους μη ελεγχόμενους παράγοντες (ευρωστία).

Η μέθοδος αυτή προσπαθεί να επιτύχει την ποιότητα με το να μειώσει την απόκλιση γύρω από την επιζητούμενη τιμή. Η εξάλειψη των όρων που προκαλούν την απόκλιση αυτή συνήθως είναι ασύμφορη. Αντ' αυτού, η μέθοδος Taguchi, επιτυγχάνει μία λύση με χαμηλό ή καθόλου κόστος, μέσω του Παραγοντικού Σχεδιασμού. Η απόδοση της μεθόδου αυξάνεται όταν επεξεργάζεται προβλήματα στα οποία συμμετέχουν πολλαπλοί παράγοντες. Η κεντρική της λοιπόν ιδέα είναι να συνδυάσει τους παράγοντες στα κατάλληλα επίπεδα, εντός των αντίστοιχων αποδεκτών ορίων, να παράγει το βέλτιστο αποτέλεσμα και παράλληλα να παρουσιάζει την ελάχιστη απόκλιση από το στόχο.

2.2.2) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Προκειμένου να καθορίσει το βέλτιστο συνδυασμό, η μέθοδος Taguchi, ορίζει την εκτέλεση ενός αριθμού πειραμάτων υπό τις συνθήκες που καθορίζονται από τους κανόνες που την διέπουν. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η διεξαγωγή όλων των πειραμάτων που καλύπτουν το συνολικό εύρος των πιθανών συνδυασμών μεταξύ των παραγόντων είναι συχνά δύσκολη και ασύμφορη. Για την εξασφάλιση οικονομικότερων πειραμάτων, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τις ορθογώνιες διατάξεις (OAs). Η χρήση αυτών των διατάξεων βοηθά στον προσδιορισμό του ελάχιστου αναγκαίου αριθμού πειραμάτων για ένα σετ παραγόντων. Υπάρχουν καθορισμένες διατάξεις οι οποίες επαρκούν στις περιπτώσεις που το πλήθος των επιπέδων είναι σταθερό και οι διασταυρώσεις των παραγόντων είναι ασήμαντες. Σε περιπτώσεις ωστόσο, όπου είτε οι παράγοντες δεν έχουν τα ίδια επίπεδα είτε διασταυρώνονται, απαιτείται η τροποποίηση των διατάξεων ή η χρήση ειδικά διαμορφωμένων διατάξεων.

FACTORS	LEVELS	TOTAL NUMBER OF EXPERIMENTS	
		FULL FACTORIAL DESIGN	TAGUCHI DESIGN
2	2	4 (2^2)	4
3	2	8 (2^3)	4
4	2	16 (2^4)	8
7	2	128 (2^7)	8
15	2	32,768 (2^{15})	16
4	3	81 (3^4)	9

Εικόνα 2.8: Σύγκριση συνολικά απαιτούμενων πειραμάτων με αριθμό πειραμάτων που απαιτεί η μέθοδος Taguchi ανάλογα με το πλήθος και τα επίπεδα των παραγόντων

2.2.3) ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

- **Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας**

Ο αριθμός του βαθμού ελευθερίας για κάθε παράγοντα είναι κατά ένα μικρότερος από τον αριθμό των επιπέδων του. Για παράδειγμα, ένας παράγοντας με δύο επίπεδα έχει 1 βαθμό ελευθερίας. Η διασταύρωση δύο παραγόντων (έστω δύο παράγοντες A,B) συμβολίζεται ως $A \times B$. Ο υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας που διαθέτει, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τους βαθμούς ελευθερίας των παραγόντων που διασταυρώνονται. Οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας ενός πειράματος ορίζονται ως το άθροισμα των βαθμών ελευθερίας όλων των παραγόντων και των διασταυρώσεων τους.

- **Επιλογή κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης**

Κάθε πείραμα απαιτεί μια ορθογώνια διάταξη η οποία διαθέτει τουλάχιστον ίσους βαθμούς ελευθερίας. Οι βαθμοί ελευθερίας μιας διάταξης είναι κατά μία μικρότεροι από τον αριθμό των πειραμάτων που απαιτείται ή ίσοι με τον αριθμό στηλών της διάταξης. Κατά την επιλογή της διάταξης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι παραπανίσιοι βαθμοί ελευθερίας της διάταξης ισοδυναμούν με πειράματα τα οποία μπορούν να αποφευχθούν, όπως επίσης θα πρέπει να υπολογίζεται ότι αναλόγως το πλήθος των διασταυρώσεων που θα μελετηθούν, διατάξεις που έχουν ίσους βαθμούς ελευθερίας με τους συνολικούς, μπορεί να μην είναι λειτουργικές.

- **Ανάθεση στηλών**

Η ανάθεση των στηλών θα πρέπει να ξεκινά με τις στήλες οι οποίες προορίζονται για την μελέτη των διασταυρώσεων. Η στήλη στην οποία εμφανίζεται η διασταύρωση εξαρτάται από τις στήλες στις οποίες είναι τοποθετημένοι οι διασταυρούμενοι παράγοντες. Η εξάρτηση αυτή ακολουθεί ένα προκαθορισμένο μοτίβο το οποίο παρουσιάζεται μέσω τριγωνικών πινάκων. Η τοποθέτηση των διασταυρώσεων απαιτεί προσοχή καθώς πρέπει να μείνουν ελεύθερες οι αντίστοιχες στήλες για τους παράγοντες.

Orthogonal Array	No. Runs	Max. Factors	Max. of columns at these levels			
			2-level	3-level	4-level	5-level
L4	4	3	3			
L8	8	7	7			
L9	9	4		4		
L12	12	11	11			
L16	16	15	15			
L'16	16	5			5	
L18	18	8	1	7		
L25	25	6				6
L27	27	13		13		
L32	32	31	31			
L'32	32	10	1		9	
L36	36	23	11	12		
L'36	36	16	3	13		
L50	50	12	1			11
L54	54	26	1	25		
L64	64	63	63			
L'64	64	21			21	
L81	81	40		40		

Εικόνα 2.9: Επιλογή διάταξης ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας

These tables give all the possible interacting column relationships that exist for a given OA

Column no.	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2		1	6	7	4	5
3			7	6	5	4
4				1	2	3
5					3	2
6						1

L₈ TRIANGULAR TABLE

Εικόνα 2.10: Τριγωνικός πίνακας διασταυρώσεων για διάταξη L8

Όπως, για παράδειγμα, φαίνεται και από την εικόνα, η διασταύρωση παραγόντων που βρίσκονται στις στήλες 1 και 2, θα εμφανιστεί στη στήλη 3. Σε άλλη περίπτωση που οι παράγοντες τοποθετηθούν στις στήλες 2 και 6, η διασταύρωσή τους θα εμφανιστεί στη στήλη 4.

- **Πείραμα**

Η σειρά με την οποία θα γίνουν τα πειράματα πρέπει να επιλεγεί τυχαία και δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη διασταυρώσεων. Για κάθε συνθήκη ή συνδυασμό θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον ένα «τρέξιμο».

- **Ανάλυση αποτελεσμάτων**

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων εξυπηρετεί τους εξής στόχους:

- Καθορισμός των βέλτιστων συνθηκών,
- Αναγνώριση της προσωπικής επιρροής κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα,
- Υπολογισμός της απόδοσης στις βέλτιστες συνθήκες.

Το προβλεπόμενο αποτέλεσμα θα πρέπει να επαληθεύεται με επιβεβαιωτικά πειράματα.

Μία πρότυπη στατιστική τεχνική, η ανάλυση της διακύμανσης (Analysis of Variance ή ANOVA), είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η τεχνική αυτή δεν αναλύει απευθείας τα δεδομένα, αλλά υπολογίζει την διακύμανση τους. Η εμπιστοσύνη προκύπτει από τη διακύμανση.

Όταν υπολογιστεί η μέση τιμή του κάθε επιπέδου ενός συγκεκριμένου ανεξάρτητου παράγοντα, υπολογίζεται το άθροισμα της τετραγωνικής απόκλισης κάθε μέσης τιμής από τη συνολική μέση τιμή. Το άθροισμα της τετραγωνικής απόκλισης του παράγοντα υποδεικνύει αν η απόδοση του παράγοντα είναι ευαίσθητη στη μεταβολή των επιπέδων. Αν το άθροισμα της τετραγωνικής απόκλισης είναι κοντά στο μηδέν ή πολύ μικρό, συμπεραίνεται ότι ο παράγοντας αυτός δεν επηρεάζει την απόδοση της διαδικασίας. Διεξάγοντας την ανάλυση ευαισθησίας και την ANOVA, είναι δυνατή η διάκριση του ποιος παράγοντας κυριαρχεί πάνω από τους άλλους και την ποσοστιαία του συνεισφορά στο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση της ύπαρξης διασταυρώσεων επέρχεται μια μικρή αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων. Θα πρέπει λοιπόν να γίνει μια ξεχωριστή ανάλυση ANOVA ώστε να εξακριβωθεί ότι η διασταύρωση όντως υπάρχει και κατά πόσο αλλάζει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

2.2.4) ΕΥΡΩΣΤΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ/ΘΟΡΥΒΟΥ (S/N RATIO)

Η ύπαρξη μεταβλητότητας σε ένα πείραμα είναι αναπόφευκτη. Η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων προκαλείται από την επιρροή που έχουν οι ελεγχόμενοι και οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες. Ο πειραματικός σχεδιασμός μπορεί μεν να αναγνωρίσει τους σημαντικούς ελεγχόμενους παράγοντες και να τους ρυθμίσει ώστε να βελτιωθεί η συνοχή της απόδοσης, η μεταβλητότητα όμως κατά κύριο λόγο οφείλεται στους θορύβους. Όταν μια συνθήκη ελέγχεται με παραπάνω από ένα πειράματα, η ύπαρξη των θορύβων θα προκαλέσει μεταβλητότητα στα αποτελέσματα. Όπως όμως επιβάλλουν και οι στατιστικές αρχές, όσες περισσότερες επαναλήψεις γίνουν για μία συνθήκη, τόσο καλύτερες θα είναι οι αποκτηθείσες πληροφορίες για την μεταβλητότητα. Σε αυτό το κομμάτι υπεισέρχεται ο εύρωστος σχεδιασμός, κλειδί του οποίου είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων και των θορύβων. Εφόσον οι θόρυβοι είναι ανεξέλεγκτοι παράγοντες, στόχος του εύρωστου σχεδιασμού είναι η ρύθμιση των επιπέδων των παραγόντων που προκαλούν την ελάχιστη μεταβλητότητα όταν εκτεθούν στους θορύβους. Ο επαναλαμβανόμενος έλεγχος μίας συνθήκης, επιτρέπει τον υπολογισμό ενός δείκτη μεταβλητότητας, το λόγο Σήματος/Θορύβου. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτού του λόγου, τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση του προϊόντος από την επιθυμητή τιμή.

Η συνήθης προσέγγιση για την ανάλυση αποτελεσμάτων πειραμάτων που έχουν γίνει πάνω από μία φορά για την ίδια συνθήκη, είναι ο μέσος όρος. Ο μέσος όρος όμως δεν αντιλαμβάνεται το συνολικό πλήθος των διαθέσιμων πληροφοριών. Ένας δείκτης για τον υπολογισμό της μεταβλητότητας είναι η τυπική απόκλιση. Ζητείται επομένως ένας δείκτης που θα επιτρέπει την μελέτη τόσο του μέσου όρου, όσο και της μεταβλητότητας. Η Μέση Τετραγωνική Απόκλιση (MSD) είναι ένας τέτοιος δείκτης, ορίζεται όμως διαφορετικά για κάθε ξεχωριστό ορισμό ποιότητας. Ο λόγος S/N επομένως είναι ο λογαριθμικός μετασχηματισμός της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, για διευκόλυνση της γραμμικότητας και για την δυνατότητα μελέτης ευρύτερο φάσματος αποτελεσμάτων.

$$S/N = -\log_{10}(MSD)$$

Ανάλογα με τον ορισμό της ποιότητας ο όρος MSD υπολογίζεται ως εξής:

- Smaller is better:

$$MSD = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots)}{n}$$

- Bigger is better:

$$MSD = \frac{((y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots)}{n}$$

- Nominal is best:

$$MSD = \frac{(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots)}{n}$$

Όπου: y_1, y_2, \dots : αποτελέσματα των πειραμάτων

m : επιθυμητή τιμή αποτελέσματος

n : αριθμός επαναλήψεων

2.3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Σκοπός κάθε τεχνικού στις μηχανουργικές κατεργασίες είναι η βελτιστοποίηση της κατεργασίας που πραγματοποιείται, δηλαδή η επιλογή εκείνων των συνθηκών που οδηγούν:

- ❖ Στην επιθυμητή ποιότητα στα κατεργασμένα τεμάχια
- ❖ Στο όσο δυνατόν μικρότερο κόστος για την κατεργασία
- ❖ Στη χρονικά συντομότερη κατεργασία, άρα στη μεγαλύτερη παραγωγικότητα

Όλα αυτά τα ζητούμενα δεν ικανοποιούνται ταυτόχρονα στο μέγιστο βαθμό για κάθε συνδυασμό συνθηκών κοπής και έτσι ο τεχνικός καλείται να επιλέξει εκείνον το συνδυασμό που οδηγεί σε αυτά τα αποτελέσματα που θεωρεί αυτός πιο σημαντικά για το εκάστοτε προϊόν.

Σε κάθε περίπτωση, το κόστος της εκάστοτε κατεργασίας και παραγωγής είναι κοινώς αποδεκτό ότι θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο χωρίς να διακινδυνεύεται η ποιότητα του. Επομένως σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το κόστος, αποτελεί κριτήριο που χρήζει ελαχιστοποίησης. Το κόστος μιας παραγωγής μπορεί να αναλυθεί μέσω πολλών παραγόντων, όπως είναι ο πραγματικός χρόνος κατεργασίας, ο συνολικός αριθμός αλλαγής εργαλείων, χρόνος στησίματος του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή, η κατανάλωση ενέργειας, η φθορά των κοπτικών εργαλείων κ.λπ.. Αντίστοιχα η παραγωγικότητα εκφράζει την αποτελεσματική χρήση των εργαλείων, της μηχανής ακόμα και του προσωπικού.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης έγκειται στην εύρεση των συνθηκών κοπής (ταχύτητα πρόωσης, ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής κ.ο.κ.), οι οποίες θα παράγουν το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς κάποιο από τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✚ Χαρακτηριστικά που εκφράζουν ποιότητα (τραχύτητα επιφάνειας, απομένων όγκος για κατεργασία, κ.λπ.)
- ✚ Χαρακτηριστικά κόστους (συνολικός χρόνος κοπής, φθορά εργαλείων, κ.λπ.)
- ✚ Χαρακτηριστικά παραγωγικότητας (παραχθέντα τεμάχια ανά χρόνο, τεμάχια που απορρίφθηκαν κ.α.)

Η μαθηματικοποίηση της διαδικασίας θα μπορούσε να εκφραστεί ως εξής:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{βέλτιστο}(Q, C, P),$$

όπου x_n είναι οι συνθήκες κοπής, Q τα χαρακτηριστικά ποιότητας, C τα χαρακτηριστικά κόστους και P τα χαρακτηριστικά παραγωγικότητας.

Τα χαρακτηριστικά που θα επιλεγθούν να αντιπροσωπεύσουν το αναλυόμενο πρόβλημα, εκφράζονται με την μορφή συναρτήσεων οι οποίες, στα πλαίσια της βελτιστοποίησης, ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις.

Εκτός από τις αντικειμενικές συναρτήσεις, ενδείκνυται και ένας αριθμός περιορισμών που πρέπει να ικανοποιηθούν για να έχει νόημα η βελτιστοποίηση της κατεργασίας.

Οι περιορισμοί αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- ❖ Τεχνολογικοί περιορισμοί
- ❖ Περιορισμοί ποιότητας

Ο κύριος όγκος των περιορισμών ανήκει στους τεχνολογικούς. Η επιλογή των τεχνολογικών περιορισμών εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος αλλά και από τη δυνατότητα μέτρησης του ίδιου του περιορισμού. Φυσικά όσοι περισσότεροι περιορισμοί συμμετέχουν στη διαδικασία, βελτιώνεται η μαθηματική έκφραση και οριοθέτηση της.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι περιορισμοί είναι οι εξής:

- ✓ Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής
- ✓ Μέγιστη δύναμη κοπής
- ✓ Μέγιστες ταχύτητες πρόωσης και κοπής, είτε σύμφωνα με τα όρια που δίνει ο εκάστοτε κατασκευαστής του εργαλείου, είτε όπως προκύπτει μέσω των υπολοίπων περιορισμών
- ✓ Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου
- ✓ Μέγιστη ισχύς κοπής
- ✓ Τραχύτητα επιφάνειας
- ✓ Φθορά και ζωή κοπτικών εργαλείων, θερμότητα κοπής
- ✓ Ακαμψία της CNC εργαλειομηχανής

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίτευξη της βελτιστοποίησης σε μία κατεργασία, όπως αυτή μόλις παρουσιάστηκε, είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι. Αυτοί οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί σε διαφορετικούς υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψη έναν περιορισμένο αριθμό παραμέτρων για τη διαδικασία, συνήθως πρόωση, ταχύτητα περιστροφής ατράκτου, βάθος και πλάτος κοπής. Τα κύρια πλεονεκτήματα τους έγκειται στην ταχύτητα υπολογισμού τους αλλά και στην δυνατότητα τους να διαχειρίζονται πολύπλοκα προβλήματα.

Το πρώτο βήμα στον γενετικό αλγόριθμο είναι η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων που θα εκπροσωπήσουν το πρόβλημα. Εάν υπάρχει μόνο μια αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή αν αναζητείται βέλτιστη λύση ως προς ένα χαρακτηριστικό, η βελτιστοποίηση ονομάζεται μονού στόχου (Single Objective Optimization). Εάν όμως υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, θα πρέπει να αποφασισθεί ο τύπος της βελτιστοποίησης. Η δεύτερη μορφή βελτιστοποίησης ονομάζεται Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Στόχων (Multi-Objective Optimization). Αυτό το είδος χρησιμοποιεί το κατά Παρέτο βέλτιστο, προσφέροντας έτσι ένα εύρος βέλτιστων λύσεων στον χρήστη για να επιλέξει. Η δεύτερη επιλογή που υπάρχει στις περιπτώσεις με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις είναι η συγχώνευση των συναρτήσεων σε μία, με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας, το συνολικό άθροισμα των οποίων θα ισούται με 1. Η συγχώνευση αυτή επιτυγχάνεται με την κανονικοποίηση των όρων που συμμετέχουν εφόσον αυτοί έχουν διαφορετικής κλίμακας μονάδες μέτρησης. Η κανονικοποίηση γίνεται διαιρώντας τον παράγοντα με έναν άλλον παράγοντα ίδιου τύπου και μονάδας μέτρησης, μεγαλύτερου όμως μεγέθους. Για παράδειγμα, τον εναπομείναντα όγκο μπορούμε να τον κανονικοποιήσουμε διαιρώντας τον με τον συνολικό όγκο του τεμαχίου.

Στο επόμενο βήμα της προετοιμασίας του γενετικού αλγορίθμου, καθορίζονται οι συναρτήσεις οι οποίες εκφράζουν τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος, όπως αναπτύχθηκαν προηγουμένως.

Το τελευταίο βήμα είναι το «τρέξιμο» του στημένου αλγορίθμου. Αυτή η διαδικασία γίνεται με τους διαφορετικούς χειριστές του γενετικού αλγορίθμου (διασταύρωση, μετάλλαξη, καταλληλότητα και επιλογή) οι οποίοι αναλύθηκαν εκτενέστερα στην εισαγωγή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο περιβάλλον της μηχανουργίας, η εύρεση βέλτιστων συνθηκών κοπής είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς οι τελευταίες έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην παραγωγικότητα και άρα στον ανταγωνισμό της εκάστοτε εταιρείας στην αγορά. Λόγω όμως του υψηλού κόστους λειτουργίας των εργαλειομηχανών CNC, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική λειτουργία τους προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το κέρδος της παραγωγής. Καθώς λοιπόν το κόστος μιας κατεργασίας σε CNC εργαλειομηχανή είναι συνυφασμένο με τις συνθήκες της κατεργασίας, οι βέλτιστες αυτές συνθήκες θα πρέπει να ορισθούν πριν την έναρξη της παραγωγής του τεμαχίου. Η εύρεση των συνθηκών κοπής που θα βελτιστοποιήσουν την κατεργασία του τεμαχίου, είναι φυσικό να έχει αποτελέσει ένα μεγάλο πεδίο με το οποίο έχουν ασχοληθεί πολύ ερευνητές. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια ανασκόπηση της ήδη υπάρχουσας βιβλιογραφίας σε θέματα βελτιστοποίησης κατεργασιών με μη συμβατικές μεθόδους.

3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Η μέθοδος Taguchi έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη της επίδρασης και της βελτιστοποίησης των συνθηκών κοπής.

Ο A. Thakre [12] μελετά την επίδραση διαφόρων συνθηκών κοπής (ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής και ροή υγρού κοπής) που έχουν στην τραχύτητα της τελικής επιφάνειας. Η μελέτη έγινε με τη χρήση L9 ορθογώνιου πίνακα, χρησιμοποιώντας 4 παράγοντες σε 3 επίπεδα, εξετάζοντας την επίδραση του κάθε παράγοντα στην τραχύτητα με τη βοήθεια της ANOVA.

Παρόμοια ερεύνα κάνουν και οι M. Sukumar, P. Ramaiah, A. Nagarjuna [10]. Στο συγκεκριμένο άρθρο αναζητείτε ο συνδυασμός των συνθηκών κοπής (ταχύτητα κοπής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής) που θα προσφέρει την μικρότερη τραχύτητα επιφάνειας, χρησιμοποιώντας L16 διάταξη. Οι ίδιες συνθήκες εξετάστηκαν και με σύστημα νευρωνικού δικτύου. Παρόλο που προέκυψαν διαφορετικές τιμές από κάθε μέθοδο, παρατηρήθηκε ότι και τα δύο σετ τιμών είχαν το ίδιο αποτέλεσμα τραχύτητας.

Τη βελτιστοποίηση της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου σε λογισμικό CAM για κατεργασία εκχόνδρισης επιτυγχάνουν οι Vosniakos, G-C., Gkortza, A. and Kontolatis N. [13]. Σε αυτήν την έρευνα, κουβάς υδροστρόβιλου τύπου Pelton χωρίζεται σε περιοχές. Η κατεργασία της κάθε περιοχής μελετάται ξεχωριστά ως προς τρεις παράγοντες (Overlap, Stepdown, Mode) έχοντας ως έξοδο του πειράματος το χρόνο κοπής και τον απομένοντα όγκο υλικού. Η μέθοδος Taguchi σε συνδυασμό με ANOVA αποκαλύπτει τη σπουδαιότητα καθενός εκ των τριών παραγόντων αλλά και τα βέλτιστα επίπεδα τους για κάθε περιοχή.

Οι Vosniakos, G.S. , Kalattas, A. and Siasos, A. [14] ασχολούνται με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της κατεργασίας ελικοειδούς κωνικού γραναζιού. Η έρευνα χωρίστηκε σε δύο κατεργασίες: εκχόνδριση και φινίρισμα. Στην εκχόνδριση ελέγχθηκαν οι παράμετροι Tool Diameter, Multi Passes, Steptover και Path Type. Ως έξοδοι του πειράματος ήταν ο χρόνος κοπής, στον οποίο προστέθηκε μια κανονικοποίηση του απομένοντος όγκου. Για την κατεργασία του φινιρίσματος, στους προηγούμενους τέσσερις παράγοντες προστέθηκαν και οι παράγοντες Cutting Mode, Cut Tolerance και Chaining Tolerance. Ορίστηκε μία συνάρτηση η οποία περιείχε τους κανονικοποιημένους όρους Χρόνος Κοπής, Απομένων Όγκος και Gouge Volume (τον παραπάνω όγκο δηλαδή που αφαιρέθηκε κατά λάθος στο φινίρισμα) με συντελεστές βαρύτητας 40%, 40% και 20% αντίστοιχα. Προέκυψαν τα βέλτιστα επίπεδα των επτά παραγόντων αλλά και της συνάρτησης εξόδου, η τιμή της οποίας επιβεβαιώθηκε με «τρέξιμο» στο λογισμικό CAM.

3.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Μια άλλη πολύ χρήσιμη μη συμβατική μέθοδος για βελτιστοποίηση στις κατεργασίες, είναι ο γενετικός αλγόριθμος και έχει αποτελέσει πεδίο έρευνας πολλών άρθρων και εργασιών.

Η χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί τη βάση της μελέτης των G. Vosniakos, P. Benardos και A. Krimpenis, [3]. Στο κεφάλαιο αυτό, μελετήθηκαν οι συνθήκες κοπής αρχικά τριαξονικής εκχόνδρισης και έπειτα φινιρίσματος τρισδιάστατου τεμαχίου. Για την εκχόνδριση προτάθηκαν οι παρακάτω τεχνικές:

- Γενετικός Αλγόριθμος συνδυασμένος με δύο νευρωνικά δίκτυα. Τα νευρωνικά δίκτυο παρείχε στον γενετικό αλγόριθμο τις τιμές του χρόνου κοπής και του απομένοντος όγκου ο οποίος με τη σειρά του βελτιστοποιούσε τις συνθήκες κοπής.
- Γενετικός αλγόριθμος τύπου Nash. Σε αυτήν την περίπτωση οι εξεταζόμενες συνθήκες χωρίζονται σε δύο ξεχωριστούς αλγορίθμους που ο καθένας τους επιλύεται ως προς μια αντικειμενική συνάρτηση, ο ένας ως προς το χρόνο κοπής και ο άλλος ως προς τον απομένοντα όγκο. Οι βέλτιστες συνθήκες του ενός μεταφέρονται ως σταθερές στον άλλον αλγόριθμο συνεχίζοντας έτσι τους υπολογισμούς. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο κατά Παρέτο βέλτιστο.
- Γενετικός αλγόριθμος και μικρο-γενετικός αλγόριθμος. Ο μικρο-γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει το ύψος των «σκαλοπατιών» της εκχόνδρισης και το μεταφέρει στον κύριο αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τις υπόλοιπες συνθήκες κοπής έχοντας δεδομένο τα πάσα που θα χρειαστούν ως ακέραια τιμή του συνολικού ύψους προς το ύψος των σκαλοπατιών.

Στο στάδιο του φινιρίσματος ως αντικειμενικές συναρτήσεις ορίζονται ο χρόνος κοπής και οι ασκούμενες δυνάμεις κοπής. Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση νευρωνικού δικτύου για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, ενώ στη συνέχεια ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει τις συνθήκες κοπής για βέλτιστο χρόνο.

Χρήση μιας διαφορετικής μεθόδου γίνεται από τους V. Tandon, H. El-Mounayri, H. Kishawy [11] Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Particle Swarm Optimization (PSO) και υπολογίζει τις τιμές των παραμέτρων Διάμετρος εργαλείου, Αριθμός Πάσων, Αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής, Ταχύτητα περιστροφής και ταχύτητα πρόωσης ως προς το κόστος παραγωγής. Η αντικειμενική συνάρτηση του κόστους προκύπτει ως συνδυασμός των συναρτήσεων του χρόνου κοπής και του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια ένα σύστημα νευρωνικού δικτύου, λαμβάνοντας τις βέλτιστες τιμές, υπολογίζει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση δύναμη κοπής. Η μείωση του χρόνου που παρατηρείται με τη μέθοδο PSO είναι μέχρι και της τάξης του 35%.

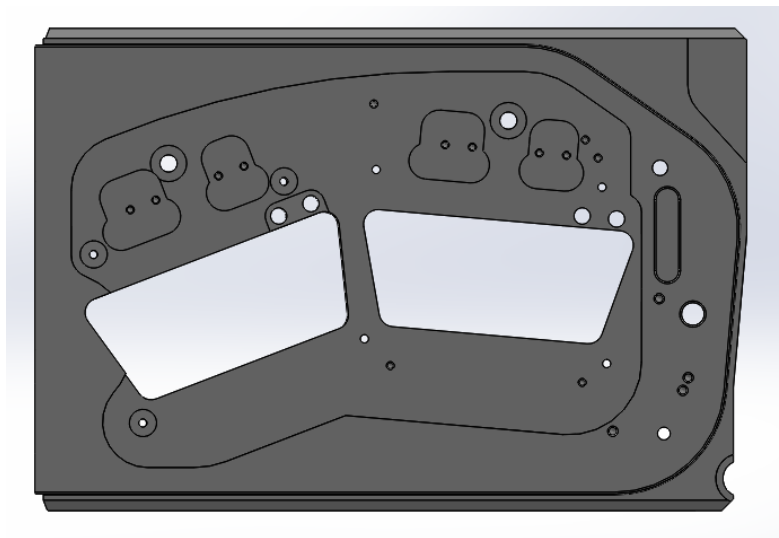
Το άρθρο των N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran [2] εξετάζει τον υπολογισμό της ταχύτητας κοπής και της ταχύτητας πρόωσης ως προς την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού ποσοστού κέρδους της παραγωγής. Το ποσοστό κέρδους υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς τιμής πώλησης-κόστους παραγωγής, προς το συνολικό χρόνο τη παραγωγής. Η βελτιστοποίηση γίνεται με τις τέσσερις διαφορετικές μεθόδους. (Γενετικός αλγόριθμος, Ant Colony, Particle Swarm Optimization και Tabu search) Ο αλγόριθμος περιείχε και τεχνικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί αναφορικά είναι: Ισχύς κοπής, Τραχύτητα επιφάνειας και δυνάμεις κοπής. Στο τέλος του άρθρου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μεθόδων. Προκύπτει λοιπόν ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προήλθαν από τη μέθοδο PSO ενώ δεύτερη σαν μέθοδος έρχεται ο γενετικός αλγόριθμος.

Τέλος οι M.S. Shunmugam, S.V. Bhaskara Reddy, T.T. Narendran [9] εξετάζουν την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής με τη μέθοδο του γενετικού αλγόριθμου, ο οποίος βρίσκει τον βέλτιστο συνδυασμό τιμών σε παραμέτρους όπως ταχύτητα κοπής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής και αριθμός πάσων. Ως περιορισμοί στον αλγόριθμο ορίστηκαν η ζωή του κοπτικού εργαλείου, η ισχύς της κοπής, η τραχύτητα της επιφάνειας και οι δυνάμεις κοπής.

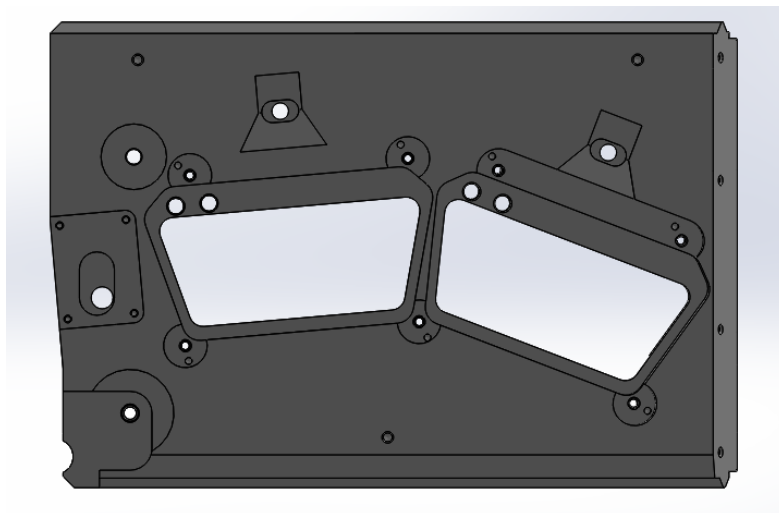
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΣΕ CAM

4.1.ΣΧΕΔΙΑΣΗ STOCK ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΕ CAD

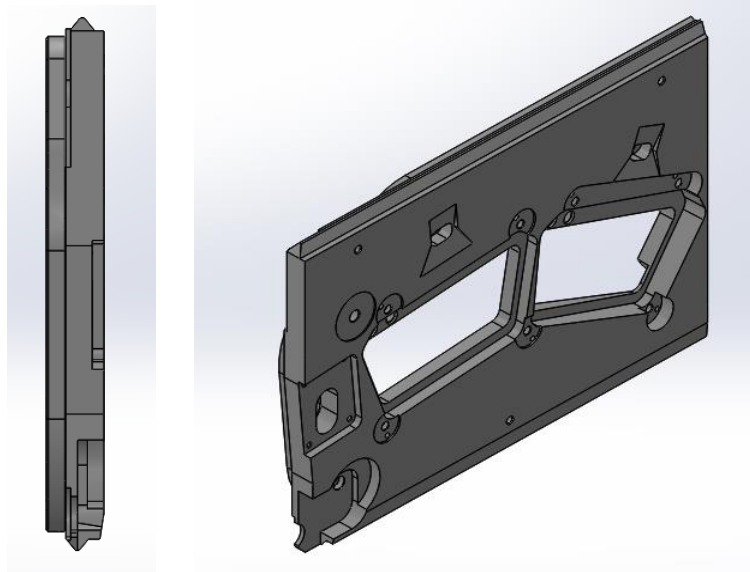
Το τεμάχιο στο οποίο βασίζεται η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί μέρος της παραγωγής της εταιρείας TEMMA A.E.. Για την οργάνωση της προετοιμασίας της προσομοίωσης της κατεργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks. Η αναπαράσταση του τεμαχίου στο λογισμικό παρουσιάζεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 4.1: Άνοψη του τεμαχίου

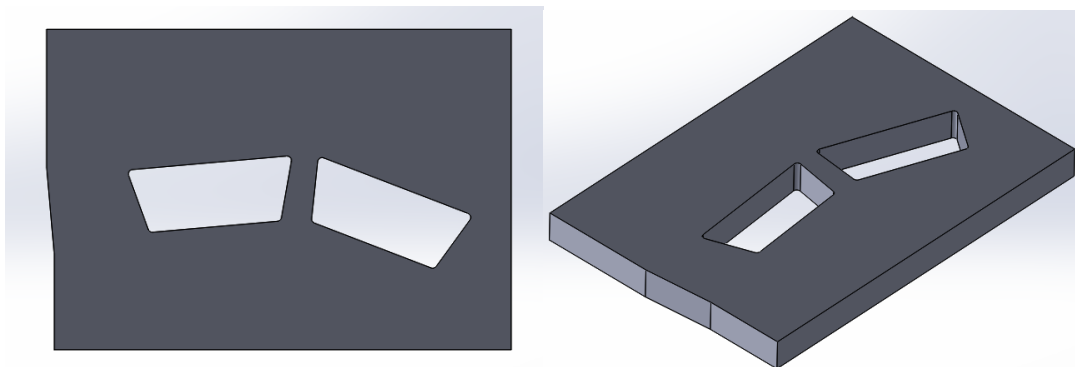


Εικόνα 4.2: Κάτοψη του τεμαχίου



Εικόνα 4.3: Κάτοψη (αριστερά) και τριδιάστατη όψη (δεξιά) της πρώτης ύλης

Το κομμάτι της πρώτης ύλης είναι διαστάσεων $798 \times 550 \times 62 \text{ mm}$. Ο σχεδιασμός του έγινε με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks και παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν:



Εικόνα 4.4: Πλάγια δεξιά και τριδιάστατη όψη του τεμαχίου

Το υλικό του τεμαχίου είναι κράμα ειδικού χάλυβα, με αριθμό 1.7225 και ανήκει στην τάξη 42CrMo4. Η σύσταση του συγκεκριμένου υλικού αναλύεται στο παρακάτω σχήμα:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.38 - 0.45	max 0.4	0.6 - 0.9	max 0.025	max 0.035	0.9 - 1.2	0.15 - 0.3

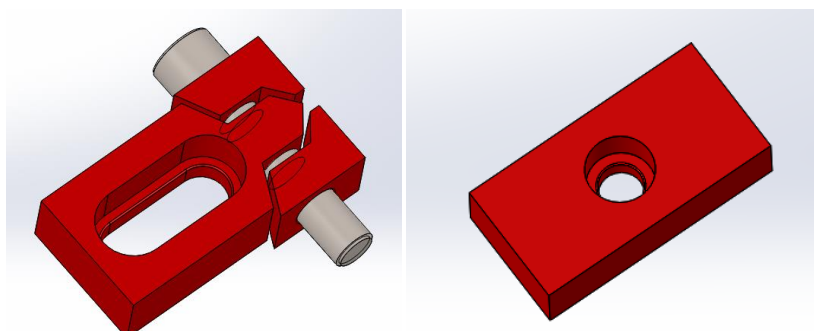
Εικόνα 4.5: Χημική σύσταση του υλικού 42CrMo4

Καθώς δεν απαιτείται κάποια μελέτη του τεμαχίου στον τομέα CAE, δεν λήφθηκε υπόψη το υλικό κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του υλικού stock. Η προσθήκη του υλικού στο τεμάχιο έγινε στη μετέπειτα φάση του προγραμματισμού σε CAM.

Η εργαλειομηχανή η οποία χρησιμοποιείται για την κατεργασία του εν μελέτη τεμαχίου είναι μοντέλο της εταιρείας MAHO, σειράς MAHO MH 1000S. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

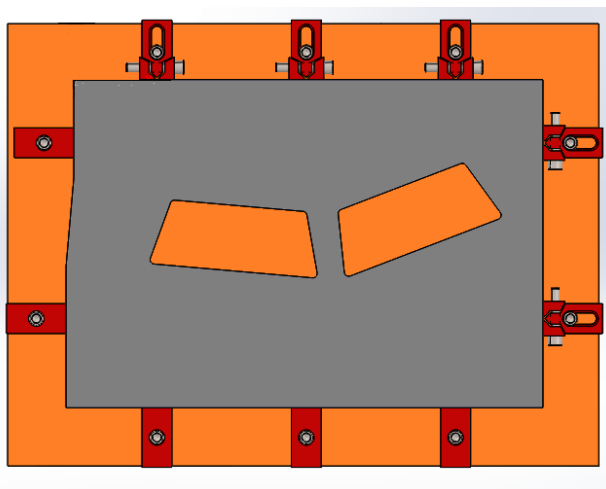
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑ X (mm)	1000
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑ Y (mm)	600
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑ Z (mm)	800
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΟΦΩΝ (RPM)	20 – 4000
ΠΡΟΩΣΗ (m/min)	4.0
ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΡΟΩΣΗ (m/min)	10.0
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	36
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)	50/60
ΙΣΧΥΣ (kW)	22

Όπως όμως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή στα κέντρα κατεργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί η σωστή συγκράτηση του τεμαχίου στο κέντρο κατεργασιών, χρησιμοποιούνται ειδικά εξαρτήματα πρόσδεσης που συσφίγγουν το κατεργαζόμενο τεμάχιο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο ειδών εργαλεία συγκράτησης. Το πρώτο είδος είναι μικρά συμπαγή τεμάχια, τα οποία βιδώνονται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, στις δύο από τις τέσσερις πλευρές του τεμαχίου, ώστε να προσφέρουν μια αρχική συγκράτηση. Στις άλλες δύο πλευρές τοποθετούνται σφιγκτήρες της εταιρείας AMF (σειρά 18-20) οι οποίοι σταθεροποιούν το κομμάτι. Η σχηματική απεικόνιση και των δύο εξαρτημάτων φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4.6: Σφιγκτήρας συγκράτησης (αριστερά) και "μπλοκ" συγκράτησης (δεξιά)

Με την τοποθέτηση της πρώτης ύλης στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και την σταθεροποίησή του με τους σφιγκτήρες, ολοκληρώνεται η φάση του σχεδιασμού και της προετοιμασίας στο CAD.



Εικόνα 4.7: Συνολική άποψη του προσδεμένου τεμαχίου

4.2.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕ CAM

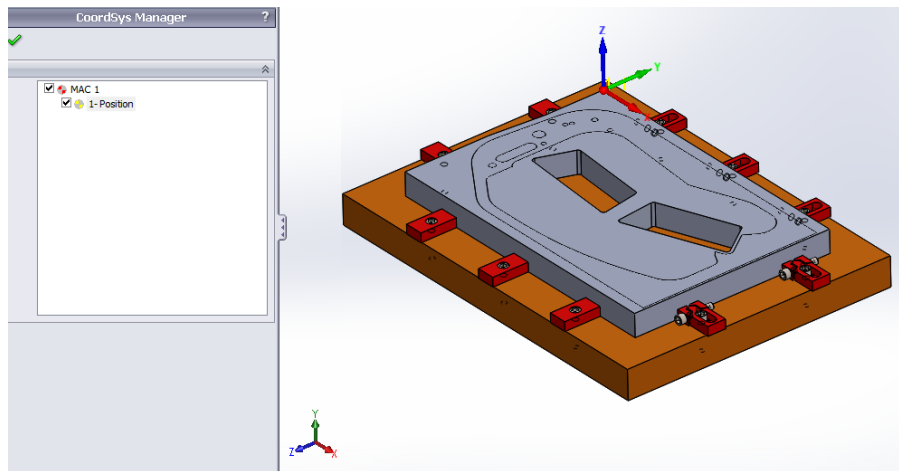
Ο προγραμματισμός της κατεργασίας στο λογισμικό SolidCam διαχωρίζεται σε δύο φάσεις. Οι συγκεκριμένες φάσεις αποτελούν τα δύο διαφορετικά στησίματα του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή, προκειμένου να ολοκληρωθεί η εκχόνδρισή του. Διακρίνουμε λοιπόν τις εξής φάσεις:

- ✚ Α' Φάση εκχόνδρισης
- ✚ Β Φάση εκχόνδρισης

4.2.1) Α' ΦΑΣΗ

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Τα πρώτα βήματα στον προγραμματισμό με χρήση λογισμικού CAM, είναι η επιλογή συστήματος συντεταγμένων, επιλογή υλικού «stock» και η επιλογή του τεμαχίου-στόχου. Τα δύο τελευταία ορίστηκαν σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σχεδιασμού στο SolidWorks. Η επιλογή του συστήματος συντεταγμένων έγινε με βάση το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί η εταιρεία TEMMA για την κατεργασία του τεμαχίου. Το εν λόγω σύστημα (MAC 1 – Position 1) απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



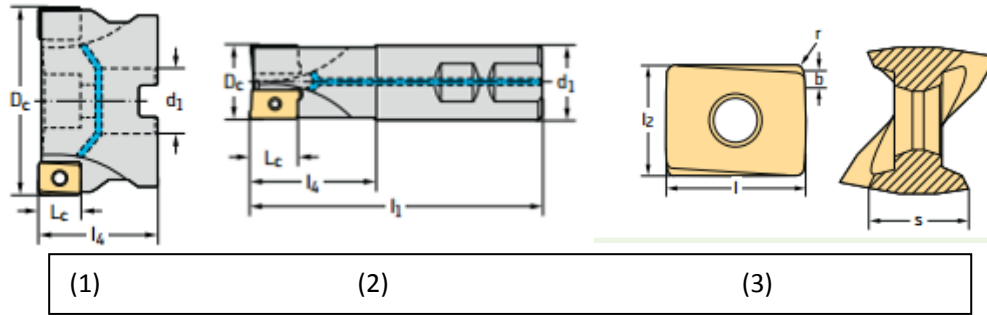
Εικόνα 4.8: Σύστημα συντεταγμένων MAC 1

ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ

Για τον υπολογισμό των δεδομένων της κοπής, το λογισμικό θα πρέπει να γνωρίζει το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Λόγω της απουσίας του υλικού 42CrMo4 από την ήδη υπάρχουσα βιβλιοθήκη υλικών, έγινε η εισαγωγή του στο πρόγραμμα χειροκίνητα. Η ζητούμενα ιδιότητα του υλικού για την εισαγωγή του, ήταν το μέγιστο όριο αντοχής σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength, UTS). Η μέγιστη αυτή τιμή βρέθηκε στην ιστοσελίδα MatWeb και είναι $UTS = 950 \text{ MPa}$ για ακατέργαστο κομμάτι.

ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή των κοπτικών εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Λόγω της φύσης της εκχόνδρισης, στην οποία απαιτείται η αφαίρεση μεγάλου όγκου υλικού σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα, επιλέγονται εργαλεία τα οποία έχουν μεγάλη διάμετρο. Λόγω της σκληρότητας του υλικού, αποφεύχθηκε η χρήση κονδυλιών, αντ' αυτού έγινε ευρεία χρήση φραιζοκεφαλών μεγάλων διαμέτρων. Οι φραιζοκεφαλές είναι της εταιρείας Walter και φέρουν ένθετα. Αναλυτικά τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη φάση της εκχόνδρισης:



Εικόνα 4.9: (1),(2) Σκαριφήματα μανέλας δύο διαφορετικών τύπων, (3) Σκαρίφημα ένθετων πλακιδίων

A/A	D _c (mm)	d ₁ (mm)	l ₄ (mm)	L _c (mm)	z	# ένθετων
1	80	27	50	13	7	7
2	63	27	50	13	6	6
3	40	16	40	13	3	3

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φραιζοκεφαλών τύπου (1)

A/A	D _c (mm)	d ₁ (mm)	l ₄ (mm)	L _c (mm)	l ₁	z	# ένθετων
4	32	32	30	10	110	3	3

Πίνακας 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φραιζοκεφαλών τύπου (2)

Ο τύπος των ένθετων που χρησιμοποιούν οι κεφαλές είναι κοινός και για τις τέσσερις:

l ₂	l	s	b	r	# ακμών	Υλικό
11	13,6	7,94	1,2	0,8	4	Επικαλυμμένο Καρβίδιο

Πίνακας 4.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ένθετων πλακιδίων

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ

Οι συνθήκες κοπής της κατεργασίας καθορίστηκαν με βάση τις προτεινόμενες τιμές για ταχύτητα πρόωσης (f_{min}) και ταχύτητα περιστροφής (n) από τους μηχανουργούς της εταιρείας. Αυτές οι τιμές έχουν προκύψει εμπειρικά και ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της κατεργασίας. Το μέγιστο βάθος κοπής καθ' όλη τη διαδικασία της εκχόνδρισης είναι σταθερό, $b=2$ mm. Σε επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί η μέθοδος βελτιστοποίησής τους με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Ανάλογα λοιπόν με την εκάστοτε κατεργασία, οι συνθήκες κοπής (πρόωση, ταχύτητα περιστροφής) είναι οι κάτωθι:

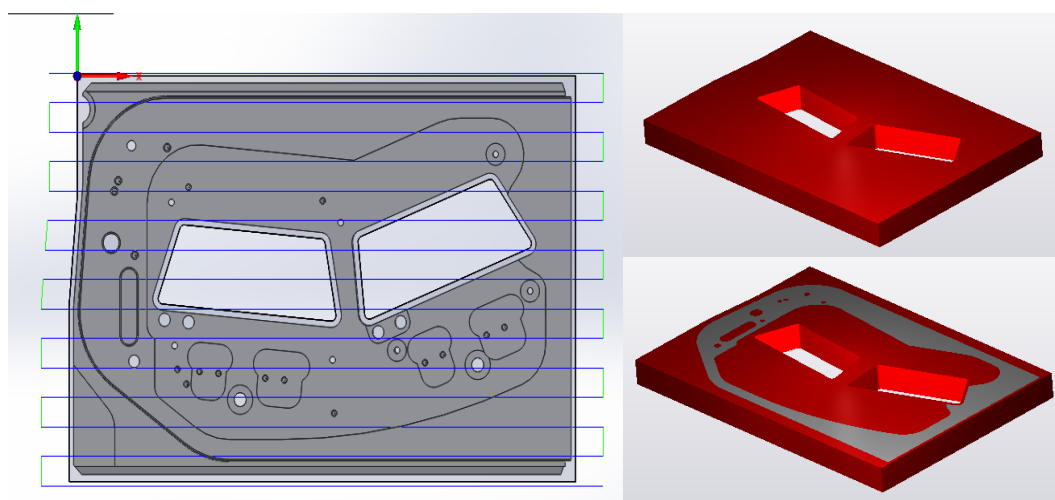
- Μετωπικό φραιζάρισμα: $f_{\min}=2000 \text{ mm/min}$, $n=550 \text{ RPM}$
- Περιφερειακό φραιζάρισμα: $f_{\min}=170 \text{ mm/min}$, $n=550 \text{ RPM}$, $b_{\max}=2\text{mm}$
- Φραιζάρισμα κλειστής κοιλότητας: $f_{\min}=170 \text{ mm/min}$, $n=550 \text{ RPM}$, $b_{\max}=2\text{mm}$

Οι συνθήκες αυτές ισχύουν σε όλη τη διάρκεια της κοπής, εκτός και αν αναφερθούν διαφορετικές για κάποια συγκεκριμένη κατεργασία. Ως μέθοδος περιφερικού φραιζαρίσματος, λόγω της σκληρότητας του υλικού, επιλέχθηκε το αντίρροπο φραιζάρισμα με διαδρομή zig-zag για την εξοικονόμηση χρόνου.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

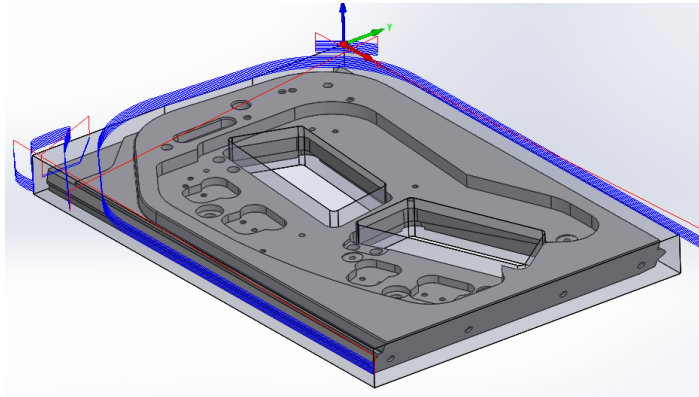
Για την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης της εκχόνδρισης χρειάστηκαν συνολικά 13 διαφορετικές κατεργασίες. Αρχικά ορίστηκαν δύο αποστάσεις, η απόσταση ασφαλείας στην οποία το κοπτικό εργαλείο θα ανέρχεται μετά την κοπή και η απόσταση του «καθαρού» επιπέδου, ενός επιπέδου στο οποίο το εργαλείο είναι ελεύθερο να κινείται με μέγιστη πρόωση ανάμεσα στα πάσσα. Η πρώτη καθορίστηκε στα 2mm, ενώ η δεύτερη στα 10mm κάθετα από την επιφάνεια της πρώτης ύλης.

Κατεργασία A1: Στην πρώτη κατεργασία έγινε μετωπικό φραιζάρισμα συνολικού βάθους κοπής $b=1.5 \text{ mm}$, με σκοπό την εκκαθάριση της πάνω πλευράς του τεμαχίου από την πρώτη ύλη. Επιλέχθηκε τεχνική Hatch με 50% επικάλυψη του κοπτικού και 0° γωνία στην τροχιά του εργαλείου. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαμέτρου 80 mm. Χρόνος κατεργασίας $t_{A1}= 06 \text{ mins } 52 \text{ sec}$.

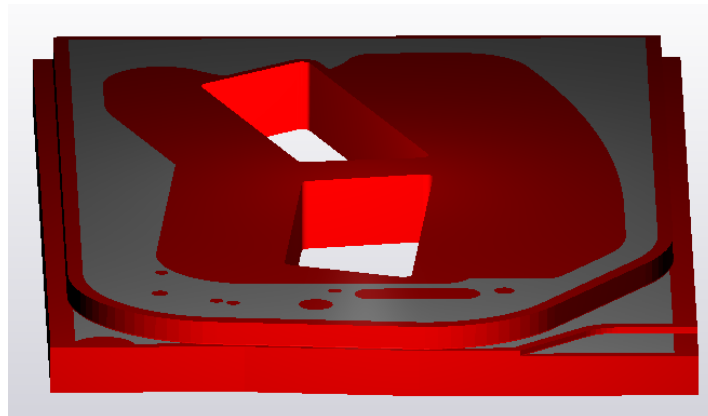


Εικόνα 4.10: Τροχιά εργαλείου (αριστερά), Τεμάχιο προ κατεργασίας (πάνω) και μετά κατεργασίας (κάτω)

Κατεργασίες A2-A3: Οι επόμενες δύο κατεργασίες είναι φραιζάρισμα στην περιφέρεια του τεμαχίου. Το κοπτικό παρέμεινε το ίδιο. Η τεχνική που ακολουθήθηκε είναι το Profile με 60% επικάλυψη της διαμέτρου, ενώ αφαιρέθηκε πρώτη ύλη μέχρι και σε απόσταση 10 mm από την επιθυμητή επιφάνεια. Στην 3^η κατεργασία αυξήθηκε το βάθος της κοπής στα 2.5mm με σκοπό την περάτωσή της με δύο μόνο πάσσα. Ορίσθηκε επίσης δεξιά αντιστάθμιση του εργαλείου. Χρόνος που διανύθηκε: $t_{A2} = 2h 47min$.

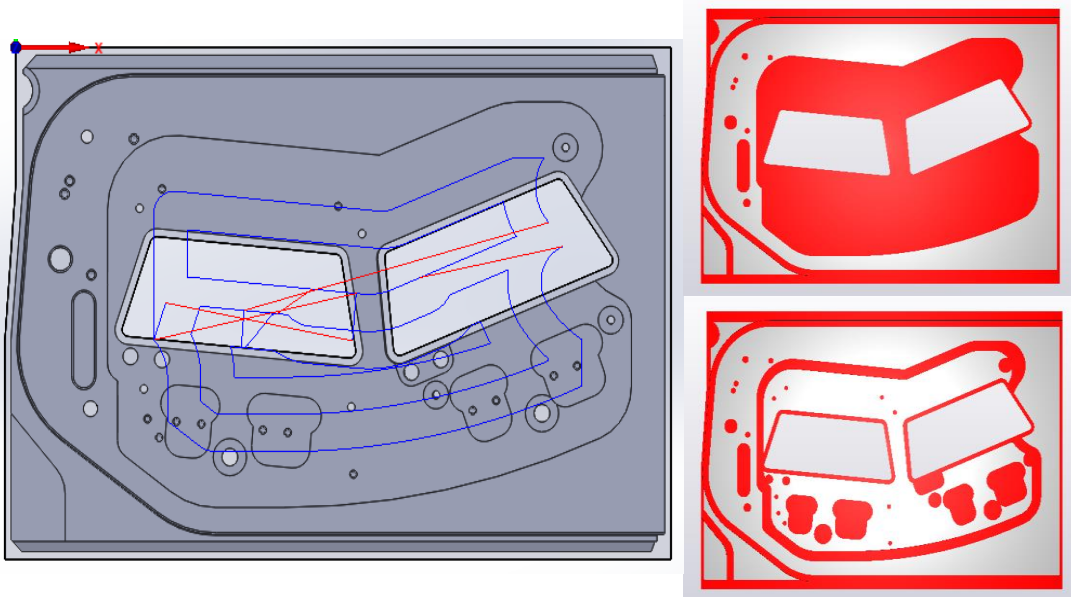


Εικόνα 4.11: Η τροχιά του εργαλείου για τις δύο κατεργασίες



Εικόνα 4.12: Το τεμάχιο μετά την ολοκλήρωση των δύο κατεργασιών

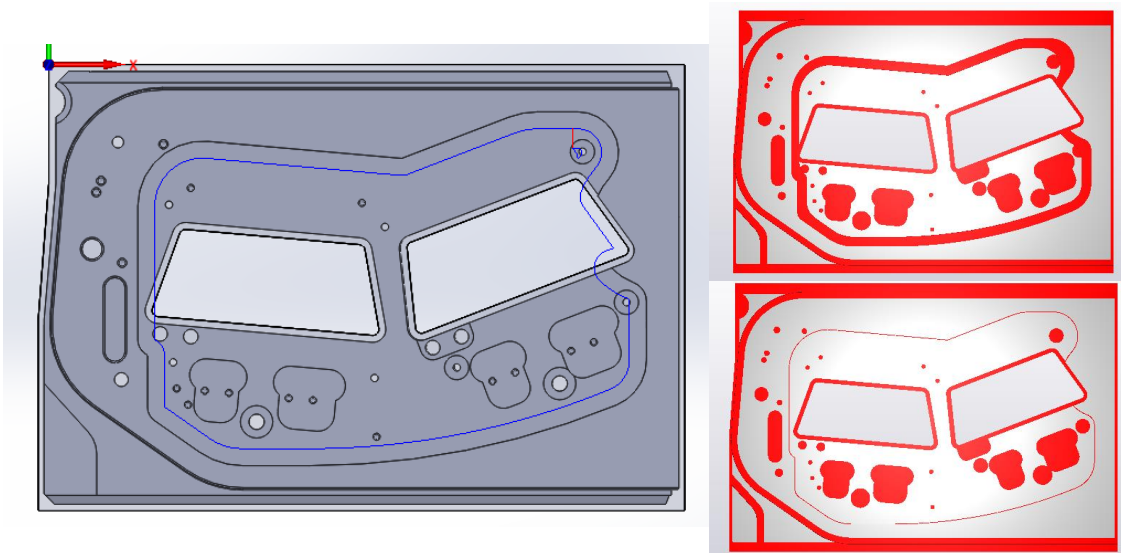
Κατεργασία A4: Στην κατεργασία αυτή έγινε εκχόνδριση της εσωτερικής περιοχής του τεμαχίου με τη χρήση της φραιζοκεφαλής διαμέτρου 80mm. Το συνολικό βάθος της ποκέτας είναι 20 mm. Το πάχος του υλικού που αφήνεται κατά μήκος των τοιχωμάτων της ποκέτας είναι 20mm. Χρησιμοποιήθηκε τεχνική Contour Milling, με επικάλυψη στο 50% της διαμέτρου. Χρόνος που διανύθηκε για την κατεργασία: $t_{A4} = 4h 31min 22sec$.



Εικόνα 4.13: Τροχιά εργαλείου (αριστερά), Τεμάχιο προ (άνω) και μετά (κάτω) κατεργασίας

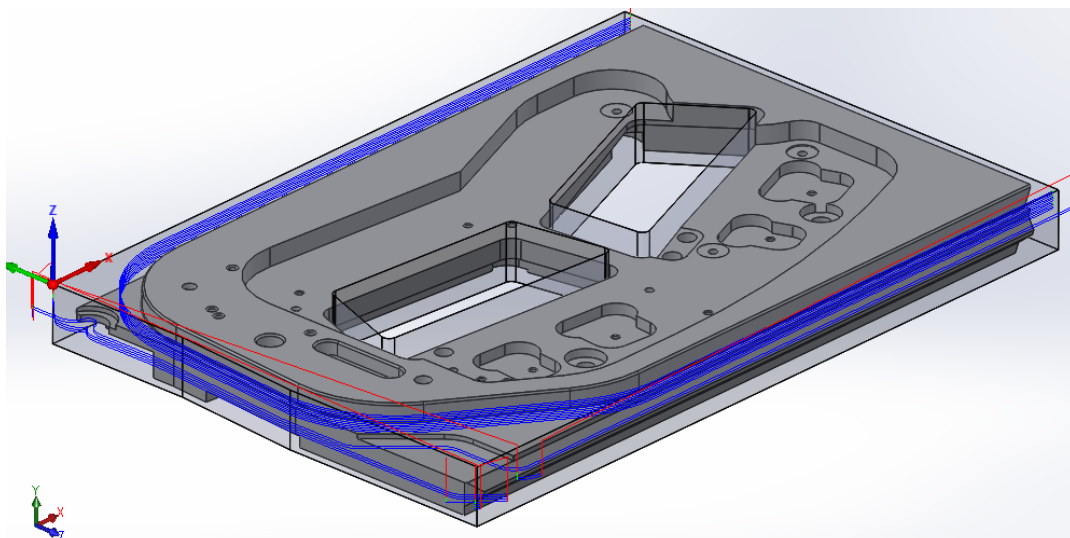
Με αυτές τις κατεργασίες ολοκληρώθηκε η εκχόνδριση του κομματιού με τη χρήση της φραιζοκεφαλής των 80 mm. Τα επόμενα στάδια μπορούν είτε να θεωρηθούν είτε ως συνέχεια της εκχόνδρισης, είτε ως ημι-φινιρίσμα καθώς αφήνεται πολύ μικρή ποσότητα υλικού για αποπεράτωση. Στις επόμενες κατεργασίες χρησιμοποιείται η φραιζοκεφαλή διαμέτρου 40mm.

Κατεργασία A5: Στην πρώτη κατεργασία του ημι-φινιρίσματος ολοκληρώνεται το φραιζάρισμα της εσωτερικής ποκέτας συνεχίζοντας την προηγούμενη κατεργασία. Το κοπτικό εργαλείο, με επικάλυψη 50% της διαμέτρου του, αφαιρεί την πρώτη ύλη σε μέγιστη απόσταση 0.8 mm από το τοίχωμα του επιθυμητού μοντέλου. Χρόνος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση της κατεργασίας: $t_5 = 1\text{h } 51\text{min } 24\text{sec}$.

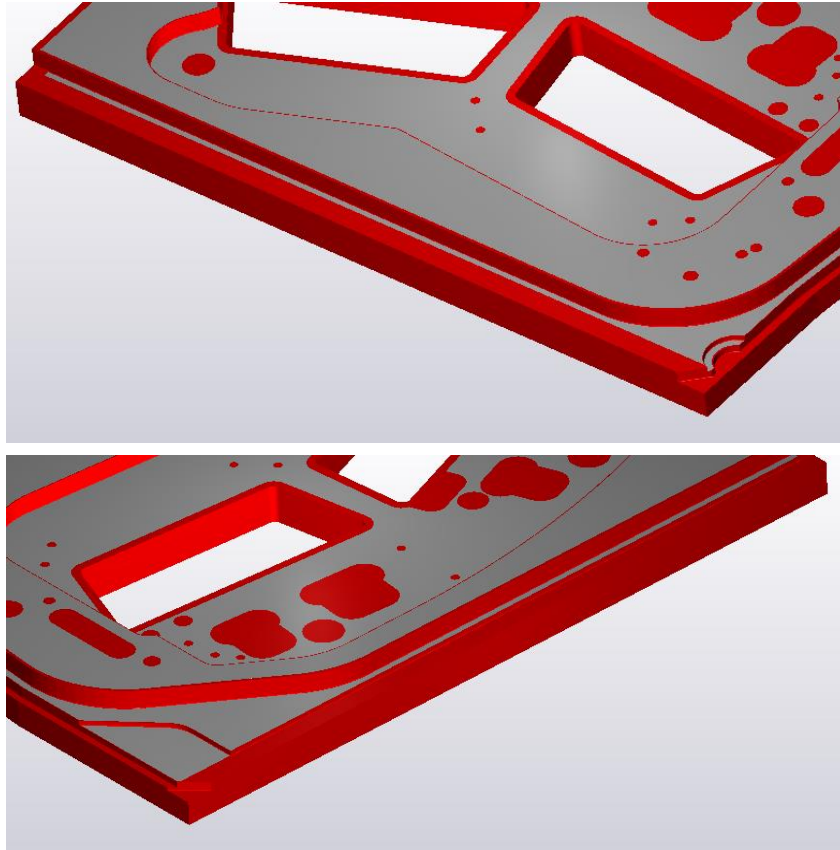


Εικόνα 4.14: Τροχιά εργαλείου (αριστερά), Σύγκριση του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία (άνω-κάτω)

Κατεργασίες A6-A9: Με τις ακόλουθες τέσσερις κατεργασίες ολοκληρώνεται η διαμόρφωση περιμετρικά του τεμαχίου. Λόγω της ανοιχτής γεωμετρίας σε αυτές τις κατεργασίες επιλέχθηκε η μέθοδος Profile Strategy, με είσοδο του εργαλείου από την ανοικτή πλευρά. Το βάθος κοπής παρέμεινε αυξημένο στα 2.5mm, όπως και η επικάλυψη η οποία είναι και πάλι 50%. Σε όλες τις κατεργασίες η φραιζοκεφαλή αφαιρεί την πρώτη ύλη σε απόσταση 0.8mm από την τελική επιφάνεια. Κατ' εξαίρεση, στην 6^η κατεργασία αυτή η απόσταση ορίζεται στο 1mm, λόγω της ύπαρξης «φιλέτου» με ακτίνα R=1mm στο δάπεδο του τεμαχίου. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση τους είναι $t_{A6} = 2h\ 03min\ 06sec$.



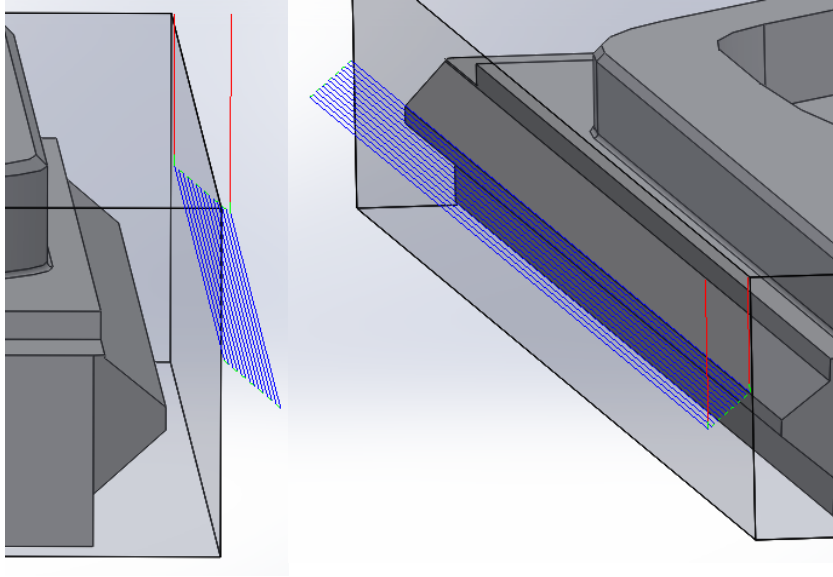
Εικόνα 4.15: Η συνολική τροχιά του εργαλείου για την περιφερειακή διαμόρφωση του κομματιού



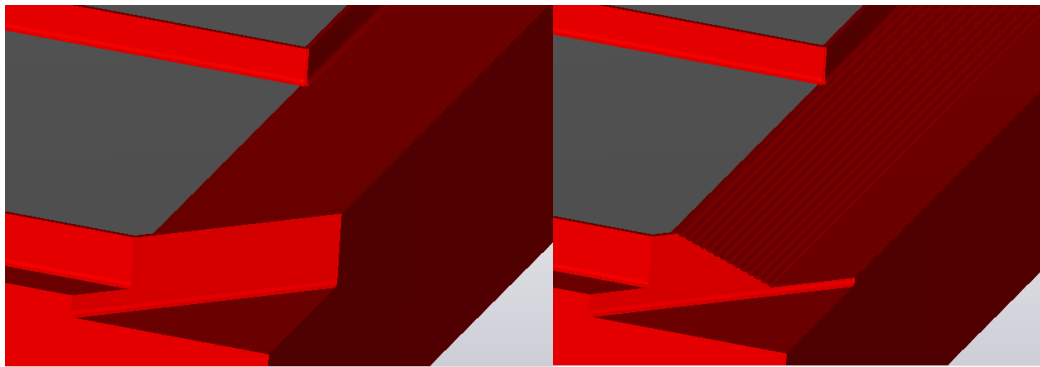
Εικόνα 4.16: Ημι-φινίρισμα μέχρι τα 0.8mm περιμετρικά του τεμαχίου

Οι δύο ακόλουθες κατεργασίες αποτελούν τριαξονική εκχόνδριση κεκλιμένων επιπέδων για προετοιμασία πενταξονικού φραιζαρίσματος. Σε αυτού του είδους την εκχόνδριση, το εργαλείο, κατεβαίνοντας κατά τον άξονα Z, αφήνει «σκαλοπάτια» τα οποία προσεγγίζουν την κεκλιμένη επιφάνεια. Για την επίτευξη της επιλέχθηκε κατεργασία HSS με μέθοδο Parallel to Surface. Σε αυτή τη μέθοδο, η τροχιά του εργαλείου είναι μετατοπισμένη ως προς μια επιφάνεια-ακμή και οριοθετείται από την επιφάνεια οδήγησης. Και οι δύο καθορίζονται από το χρήστη.

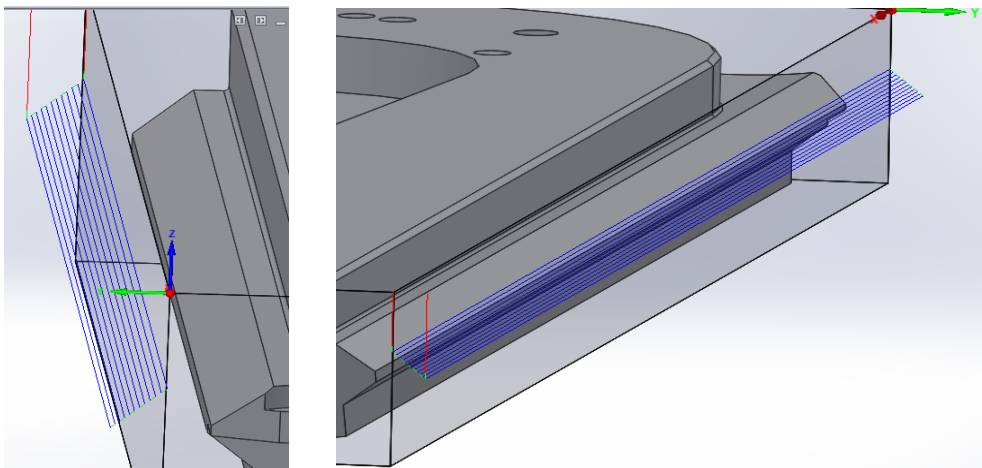
Κατεργασία A10-A11: Σε αυτές τις δύο κατεργασίες εκχονδρίζονται οι δύο κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στην πάνω και την κάτω πλευρά του τεμαχίου. Η κλίση των δύο αυτών επιφανειών είναι ίδια και ίση με 3.59° . Επιλέχθηκε απόσταση από την επιφάνεια-οδηγό 1mm καθώς και μέγιστη τιμή της κατά μήκος μετακίνησης (stepover) του κοπτικού ίση με 1mm. Από την επιφάνεια που λειτουργεί ως ακμή αφέθηκε επίσης 1mm υλικού. Η ανοχή της κοπής καθορίσθηκε στα 0.002 mm ενώ η διαδρομή του εργαλείου παρέμεινε zig-zag. Ο απαιτούμενος χρόνος κοπής είναι: $t_{A10} = 2\text{h } 26\text{min}$



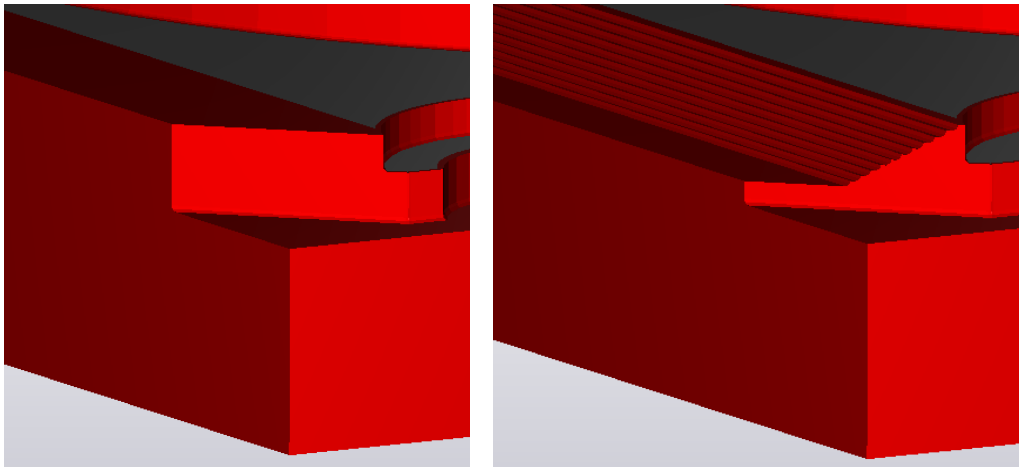
Εικόνα 4.17: Η τροχιά κοπτικού εργαλείου για την επιφάνεια που βρίσκεται στο κάτω μέρος



Εικόνα 4.18: Εστιασμένη άποψη του αποτελέσματος της κατεργασίας. Διακρίνονται τα «σκαλοπάτια», απόρροια της κατά Z μετακίνησης του εργαλείου

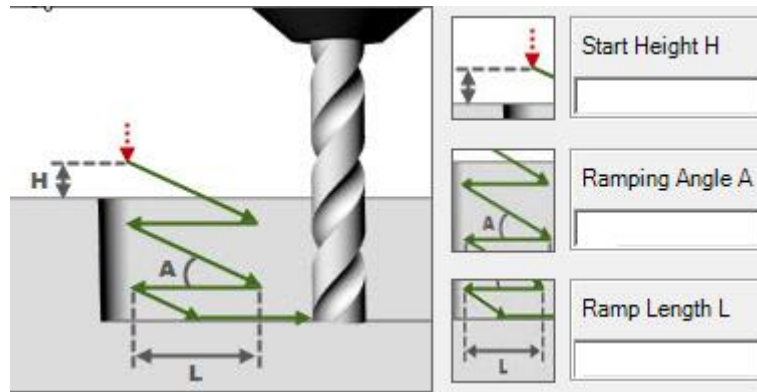


Εικόνα 4.19: Η τροχιά του εργαλείου για την κατεργασία της δεύτερης κεκλιμένης επιφάνειας



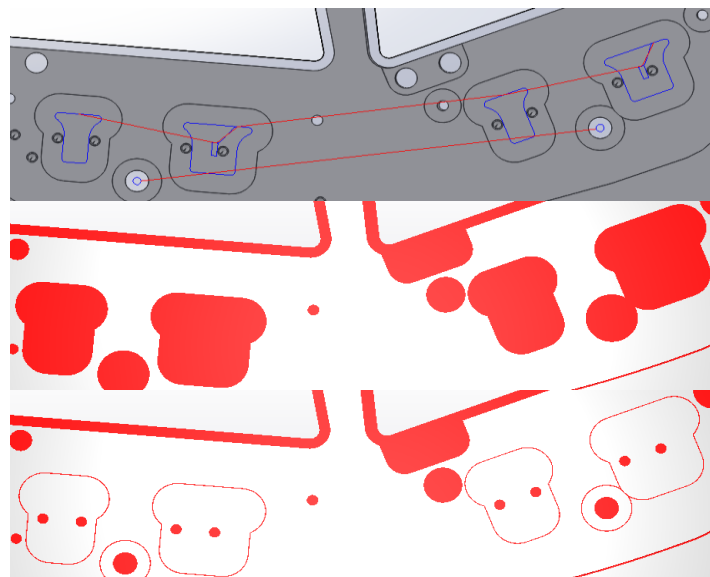
Εικόνα 4.20: Η δεύτερη κεκλιμένη επιφάνεια μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας της.

Οι δύο τελευταίες κατεργασίες είναι η εκχόνδριση έξι ποκετών που βρίσκονται στο εσωτερικό τμήμα του τεμαχίου. Για αυτές τις κατεργασίες χρησιμοποιείται η κεφαλή διαμέτρου 32mm. Στις περιπτώσεις που απαιτείται κατεργασία κλειστών περιοχών (με έλλειψη περιφερειακού τρόπου εισόδου) ενός τεμαχίου με φραιζοκεφαλή, θα πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος εισόδου της κεφαλής στην περιοχή. Μια συνήθης στρατηγική είναι η διάνοιξη οπής με τη χρήση τρυπανιού, την οποία κατόπιν μπορεί να χρησιμοποιήσει η φραιζοκεφαλή ως είσοδο ώστε να μπορεί να κόψει περιφερικά. Για την αποφυγή όμως εισαγωγής επιπρόσθετης κατεργασίας, υιοθετούνται στρατηγικές κατά τις οποίες το κοπτικό εργαλείο δημιουργεί μόνο του την είσοδο (ramping) και έπειτα κατεργάζεται περιφερικά. Μια τέτοια μέθοδος είναι το helical ramping κατά το οποίο το εργαλείο εκτελεί ελικοειδής κινήσεις ώστε να κόβει υλικό μόνο με συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειάς του, στο οποίο φέρει τα πλακίδια κοπής. Μια επίσης συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική, η οποία επιλέχθηκε και στην παρούσα εργασία, είναι το angular ramping. Σε αυτή τη μέθοδο το εργαλείο εισέρχεται στην ποκέτα υπό γωνία ώστε η μετωπική προσέγγισή του να μεταβάλλεται σε περιφερική. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε γωνία 1° λόγω γεωμετρικών περιορισμών του κοπτικού εργαλείου.



Εικόνα 4.21: Σχηματική αναπαράσταση εισόδου του εργαλείου με Angular Ramping

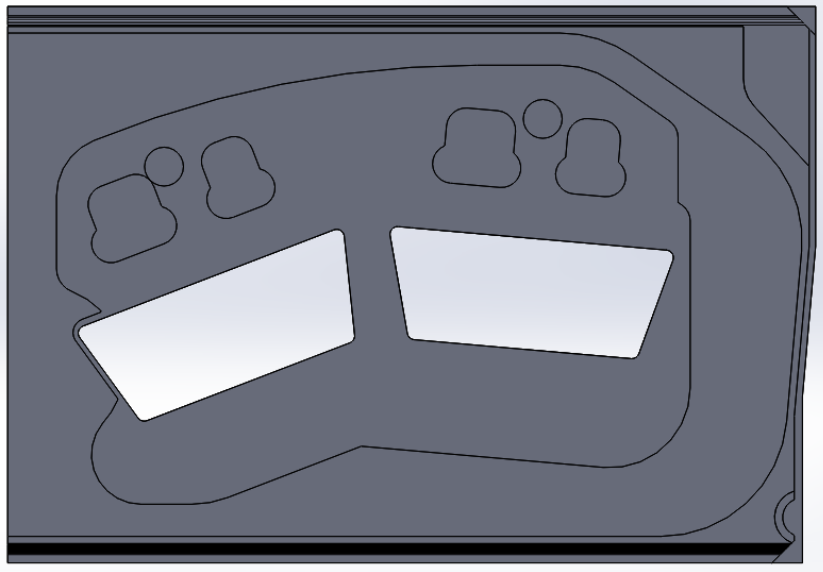
Κατεργασίες A12-A13: Αρχικά γίνεται η εκχόνδριση των τεσσάρων εσωτερικών ποκετών σχήματος «π» και στη συνέχεια οι δύο κυκλικές ποκέτες. Ως μέθοδος φραιζαρίσματος επιλέχθηκε το Contour Milling, με 50% επικάλυψη εργαλείου. Το βάθος κοπής και για τις δύο κατεργασίες είναι 3mm. Αφέθηκε υλικό 0.8 mm μήκους για φινίρισμα.



Εικόνα 4.22: Η τροχιά του εργαλείου για τις έξι ποκέτες (άνω) και σύγκριση του τεμαχίου πριν και μετά το πέρας της κατεργασίας

Ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η Α' φάση της μηχανουργίας του τεμαχίου, υπολογίσθηκε από το λογισμικό $t_{totA} = 12h\ 19min\ 23sec$.

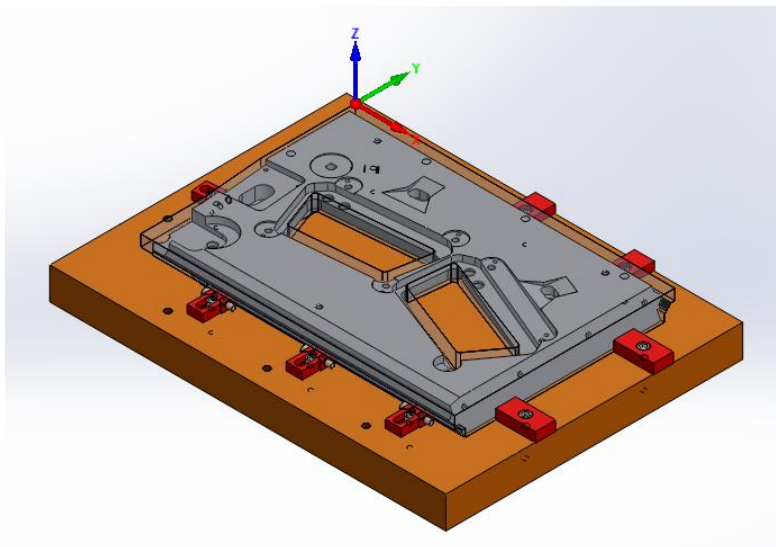
Η μορφή του τεμαχίου μετά το πέρας της πρώτης φάσης είναι:



Εικόνα 4.23: Κάτοψη του τεμαχίου μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης της κατεργασίας του

4.2.2) Β' ΦΑΣΗ

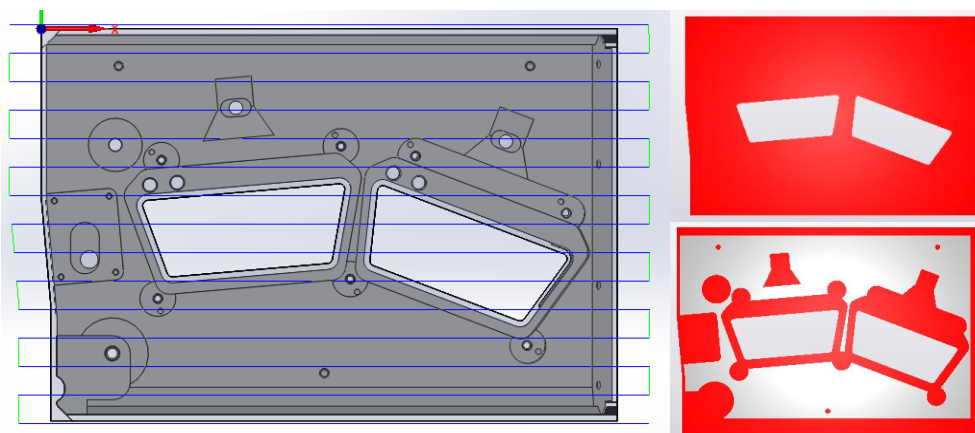
Στην δεύτερη φάση της κατεργασίας του, το τεμάχιο γυρίζεται ανάποδα προκειμένου να κατεργαστεί η πίσω του πλευρά. Για την σταθεροποίηση του χρησιμοποιούνται τα ίδια μέσα συγκράτησης με την πρώτη φάση. Ορίζεται όμως εκ νέου το σύστημα συντεταγμένων (MAC 2 – Position 1) όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 4.24: Σύστημα συντεταγμένων για τη Β' Φάση (MAC 2 –Position 1)

Για την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης χρειάστηκαν 19 κατεργασίες. Η ιδιαιτερότητα αυτής της φάσης έγκειται στην ύπαρξη πολλών κεκλιμένων επιπέδων, τόσο περιμετρικά όσο και εσωτερικά του τεμαχίου. Χρειάστηκε λοιπόν να γίνει επανειλημμένη εκχόνδριση με «σκαλοπάτια» ώστε να προσεγγιστεί το μοντέλο με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Οι συνθήκες κοπής παραμένουν ίδιες (ανάλογα πάντα με το είδος της κατεργασίας).

Κατεργασία B1: Όπως και η πρώτη φάση, έτσι και η δεύτερη ξεκινά με μετωπικό φραιζάρισμα. Γίνεται εκκαθάριση του προσώπου της κάτω πλευράς με τη χρήση κοπτικού εργαλείου 80mm σε συνολικό βάθος 1.5mm. Χρησιμοποιήθηκε τεχνική Hatch, με επικάλυψη 50% της διαμέτρου και 0° μοίρες γωνία τροχιάς. Χρόνος κοπής $t_{B1} = 6 \text{ min } 52 \text{ sec}$.



Εικόνα 4.25: Τροχιά εργαλείου (αριστερά), Τεμάχιο προ (άνω) και μετά (κάτω) κατεργασίας

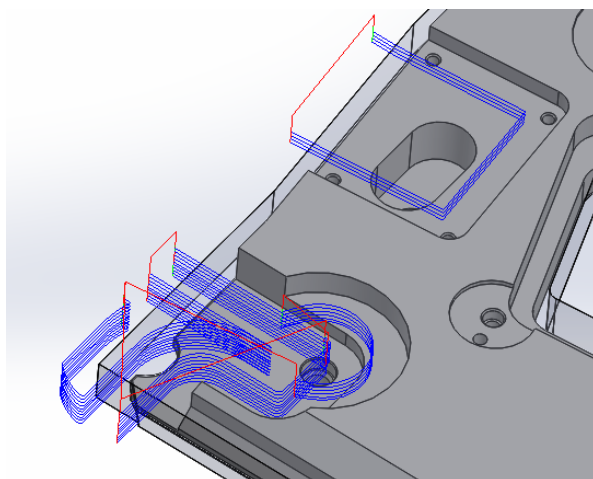
Κατεργασία B2: Στην δεύτερη κατεργασία γίνεται εκχόνδριση της ημι-ανοικτής ποκέτας στα αριστερά του τεμαχίου. Έγινε επιλογή Profile στρατηγικής, με 50% επικάλυψη του εργαλείου. Παρέμεινε υλικό μήκους 10mm στην πλευρά του κομματιού. Απαιτούμενος χρόνος: $t_{B2} = 1 \text{ min } 24 \text{ sec}$.



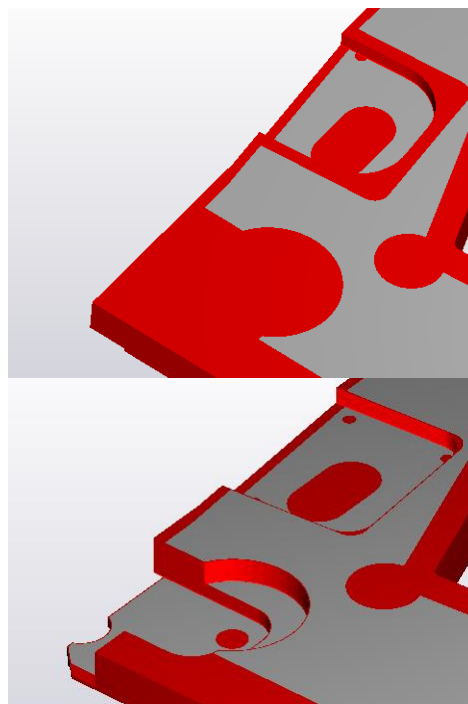
Εικόνα 4.26: Τροχιά εργαλείου (αριστερά), Τεμάχιο προ (κέντρο) και μετά (δεξιά) κατεργασίας

Με τη δεύτερη κατεργασία παύει η χρήση της κεφαλής των 80mm. Όλη η υπόλοιπη δεύτερη φάση θα γίνει με την φραιζοκεφαλή των 40mm.

Κατεργασίες B3-B5: Στις τρεις κατεργασίες που ακολουθούν γίνεται ημι-φινίρισμα των δύο ημι-ανοικτών ποκέτων στην αριστερή πλευρά του τεμαχίου. Το συνολικό βάθος της πρώτης ποκέτας είναι $b_{tot1} = 27\text{mm}$, ενώ της δεύτερης $b_{tot2} = 12\text{mm}$. Το βάθος κοπής ορίστηκε $b_{B3} = 3\text{mm}$ και για τις τρεις κατεργασίες. Επιλέχθηκε στρατηγική φραιζαρίσματος Profile με είσοδο του εργαλείου από την ανοιχτή πλευρά της ποκέτας και απόσταση από το την τελική γεωμετρία 0.8mm. Τέλος η επικάλυψη της διαμέτρου του κοπτικού είναι της τάξης του 60%. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση των κατεργασιών είναι $t_{35} = 31\text{min } 25\text{sec}$.

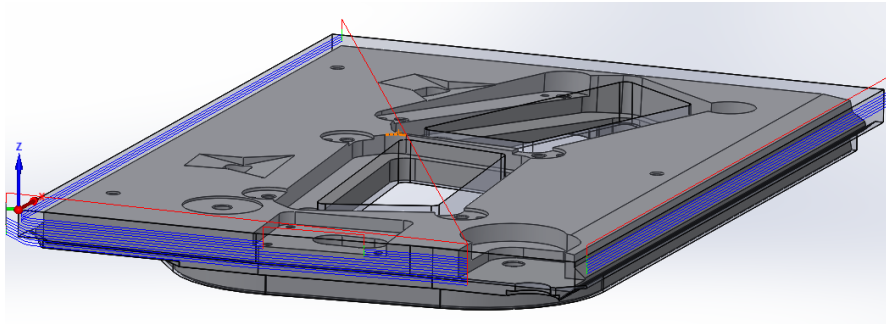


Εικόνα 4.27: Συνολική κοπτική τροχιά για τις τρεις κατεργασίες

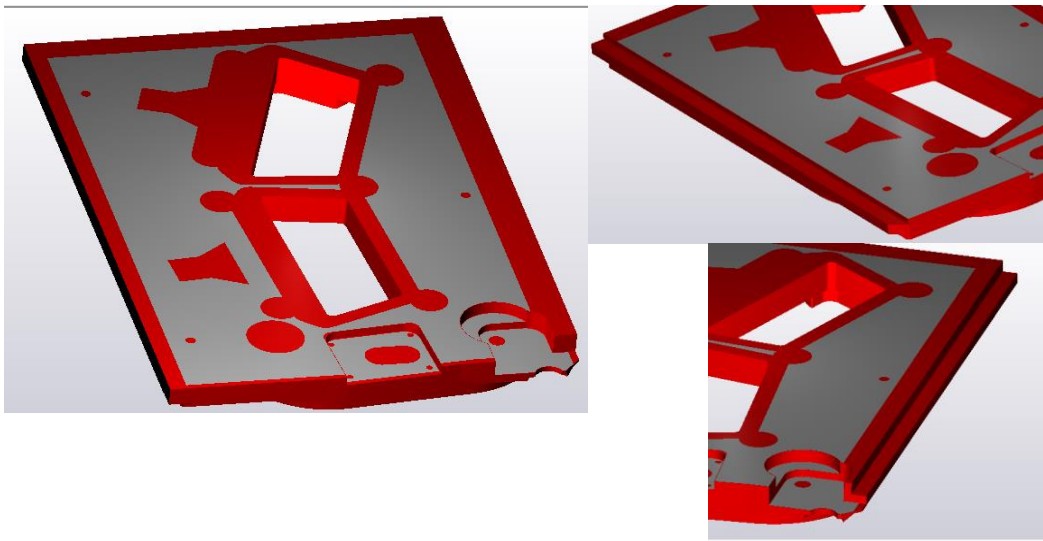


Εικόνα 4.28: Τεμάχιο πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τις κατεργασίες

Κατεργασίες B6-B8: Οι ακόλουθες κατεργασίες αποτελούν φραιζάρισμα περιμετρικά του τεμαχίου, με σκοπό το κοπτικό εργαλείο να αφαιρέσει πρώτη ύλη μέχρι και 0.8mm από το μοντέλο. Εφόσον υπάρχει ελεύθερη πλευρική είσοδος για το κοπτικό, η μέθοδος εξακολουθεί να είναι Profile με είσοδο από την εξωτερική πλευρά. Το βάθος κοπής παρέμεινε $b_{B6} = 3\text{mm}$ και η επικάλυψη στο 60% της διαμέτρου. Ολικός χρόνος κοπής των κατεργασιών: $t_{68} = 1\text{h } 17\text{min } 56\text{sec}$.

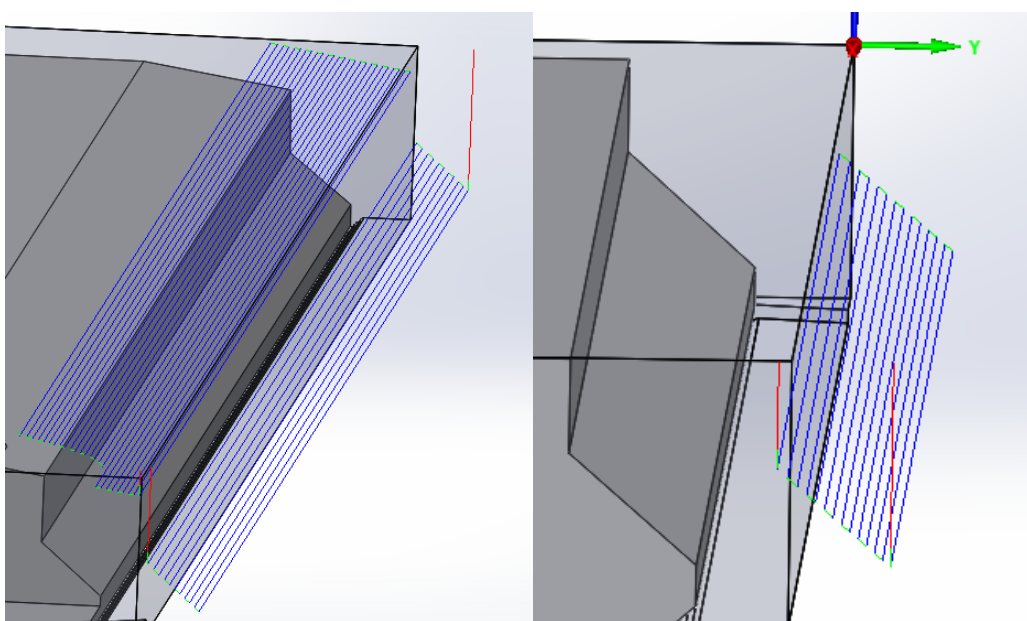


Εικόνα 4.29: Τρισδιάστατη άποψη της τροχιάς κοπής για τις τρεις κατεργασίες

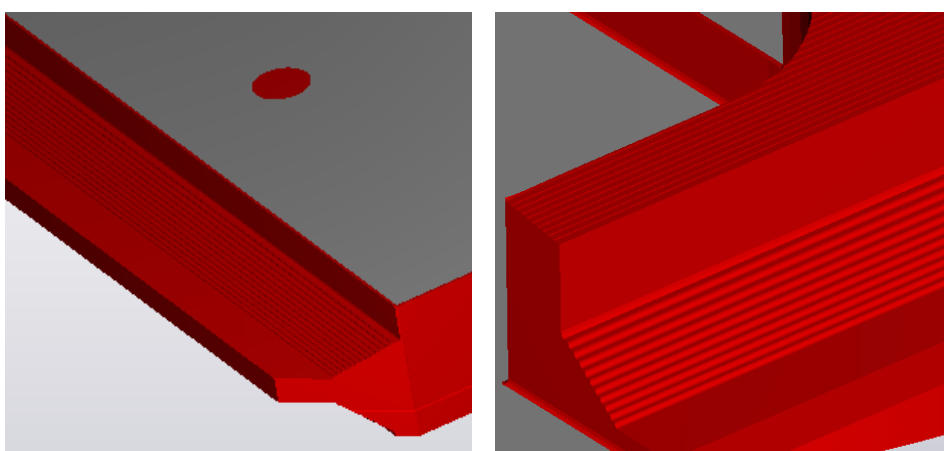


Εικόνα 4.30: Τεμάχιο προ κατεργασιών (αριστερά) και μετά (άνω και κάτω) τις κατεργασίες

Κατεργασίες B9-B11: Όπως και στην πρώτη φάση, έτσι και τώρα για την προσέγγιση των κεκλιμένων επιφανειών γίνεται εκχόνδριση με «σκαλοπάτια». Οι τρεις επόμενες κατεργασίες εκχονδρίζουν τις τρεις κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά του κομματιού, μία στην πάνω και δύο στην κάτω. Η πιο κατάλληλη μέθοδος είναι η Parallel to Surface. Σε αυτή τη μέθοδο ορίστηκαν τρεις ακμές-όρια και τρεις επιφάνειες οδηγό ενώ η τροχία του εργαλείου ξεκινάει σε απόσταση 1mm τόσο από τις ακμές, όσο και από τις επιφάνειες-οδηγούς. Η κατά μήκος μετακίνηση του εργαλείου ορίστηκε στην μέγιστη τιμή του 1mm. Η ανοχή παρέμεινε στα 0.002mm. Ο χρόνος κοπής υπολογίστηκε $t_{9-11} = 1\text{h } 51\text{min } 9\text{sec}$.

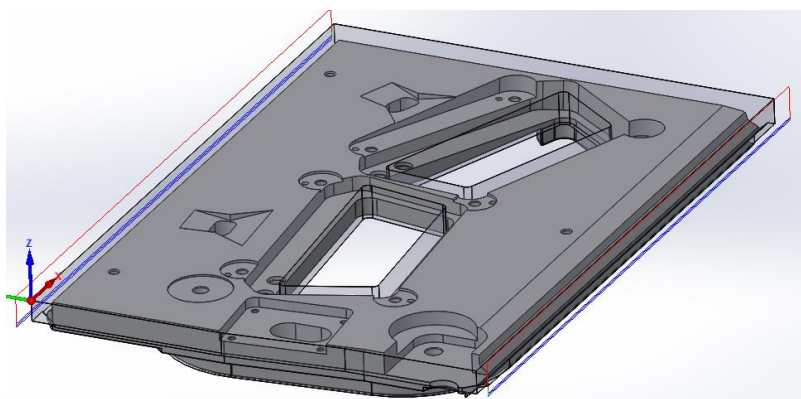


Εικόνα 4.31: Ακολουθούμενη τροχιά στις κατεργασίες 9-10 (αριστερά) και 11(δεξιά)

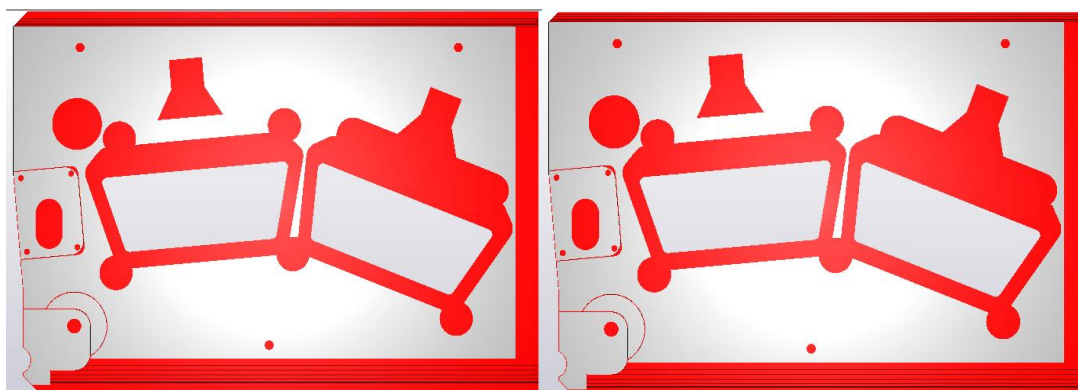


Εικόνα 4.32: Τα "σκαλοπάτια", αποτέλεσμα των κατεργασιών 9,10 και 11

Κατεργασίες B12-B13: Με αυτές τις δύο κατεργασίες ολοκληρώνεται το φραιζάρισμα περιφερειακά του κομματιού, καθώς αφαιρείται η πρώτη ύλη που προεξέχει στην πάνω και την κάτω πλευρά. Όπως και προηγουμένως, ακολουθήθηκε η μέθοδος Profile με προσέγγιση του εργαλείου από την εξωτερική πλευρά, κόβοντας σε απόσταση από τον τελικό στόχο 0.8mm και σε βάθος 3mm. Η επικάλυψη ορίστηκε στο 50% της διαμέτρου. Χρόνος που διανύθηκε για τις κατεργασίες: $t_{12}= 14\text{min } 47\text{sec}$.

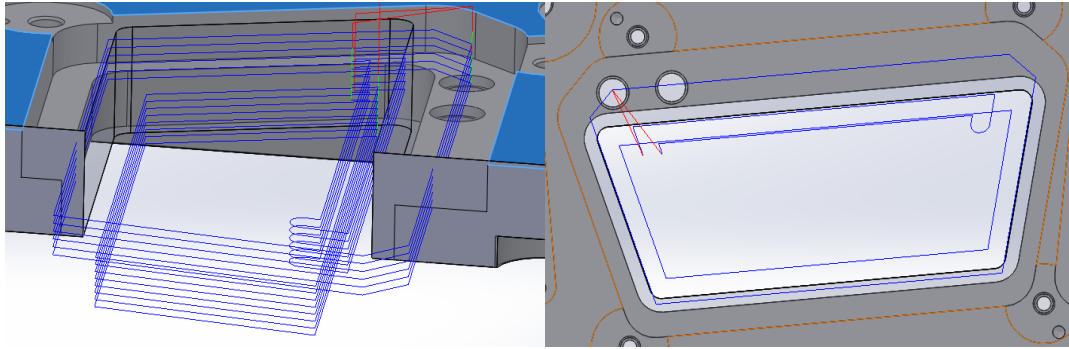


Εικόνα 4.33: Η συνολική τροχιά του εργαλείου των δύο κατεργασιών



Εικόνα 4.34: Αφαίρεση υλικού στην πάνω και την κάτω μεριά του τεμαχίου

Κατεργασίες B14-B15: Γίνεται έναρξη της διαμόρφωσης του εσωτερικού του τεμαχίου. Οι δύο πρώτες κατεργασίες αφαιρούν την πρώτη ύλη στο αριστερό «παράθυρο», πλησιάζοντας την επιθυμητή γεωμετρία στα 0.8mm. Το συγκεκριμένο παράθυρο δεν έχει κάποια ιδιομορφία επομένως οι κατεργασίες σε αυτό γίνονται όπως και οι προηγούμενες. Λόγω της δυνατότητας προσέγγισης από την εσωτερική πλευρά του παραθύρου, η οποία είναι ανοικτή, επιλέχθηκε στρατηγική φραιζαρίσματος Profile με επικάλυψη στο 60% της διαμέτρου. Το συνολικό βάθος της κατεργασία είναι 39mm ενώ το βάθος κοπής τέθηκε $b_{B14}= 3\text{mm}$. Χρόνος κοπής $t_{14}= 39\text{min } 4\text{sec}$.

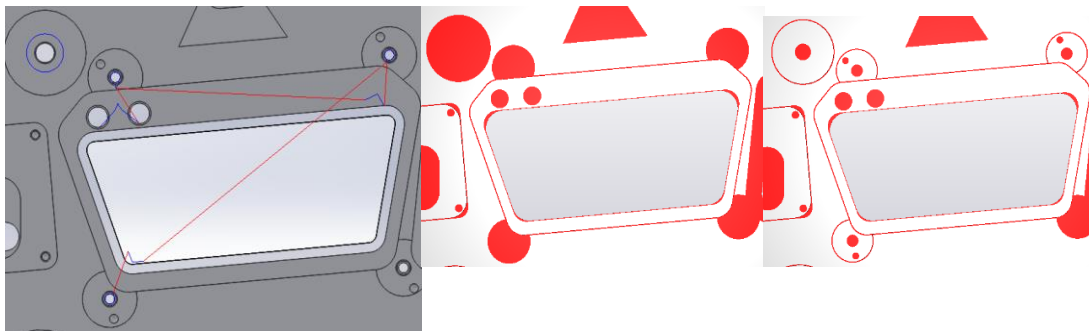


Εικόνα 4.35: Η τροχιά του εργαλείου όπως φαίνεται σε τομή (αριστερά) και η κάτοψή της (δεξιά)



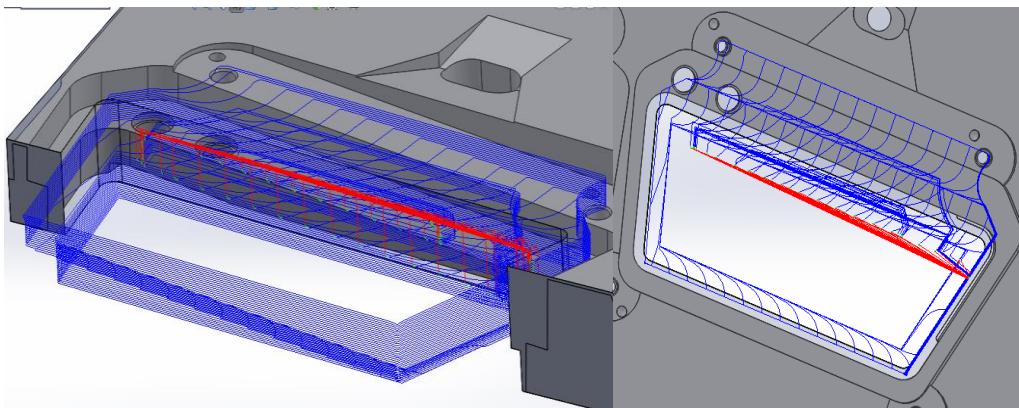
Εικόνα 4.36: Εκκαθάριση του αριστερού παραθύρου από την πρώτη ύλη

Κατεργασίες B16-B17: Ολοκλήρωση της διαμόρφωσης των γεωμετριών στην αριστερή πλευρά του κομματιού, με κατεργασία τεσσάρων κυκλικών ποκετών. Οι τρεις πρώτες διαθέτουν ανοικτή είσοδο ώστε να προσεγγίσει το εργαλείο, η τέταρτη όμως ποκέτα έχει κλειστή γεωμετρία. Για να είναι η δυνατή η κατεργασία της, το εργαλείο εκτελεί και πάλι κίνηση ramping υπό γωνία 1° . Η τεχνική για τις δύο αυτές κατεργασίες είναι το Contour Milling, με επικάλυψη στο 50% και σε απόσταση από το τελικό προϊόν 0.8mm. Το ημι-φινίρισμα και των τεσσάρων ποκετών επιτυγχάνεται με ένα πάσσο, 3mm για τις τρεις πρώτες και 2mm για την τελευταία. Απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωσή τους $t_{16} = 1\text{min } 53\text{sec}$.

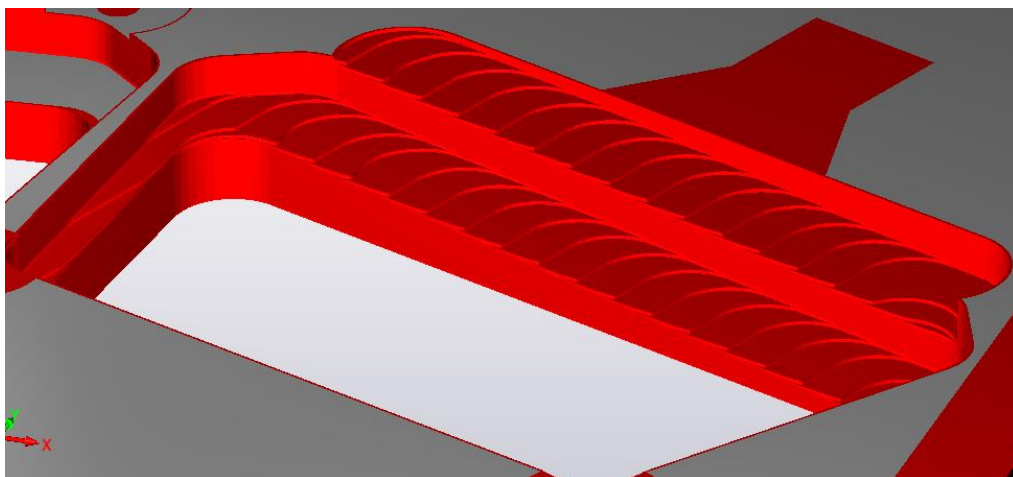


Εικόνα 4.37: Τροχιά του εργαλείου (αριστερά) για την κατεργασία των κυκλικών ποκετών όπως φαίνεται στο κεντρικό και στο δεξιό σχήμα

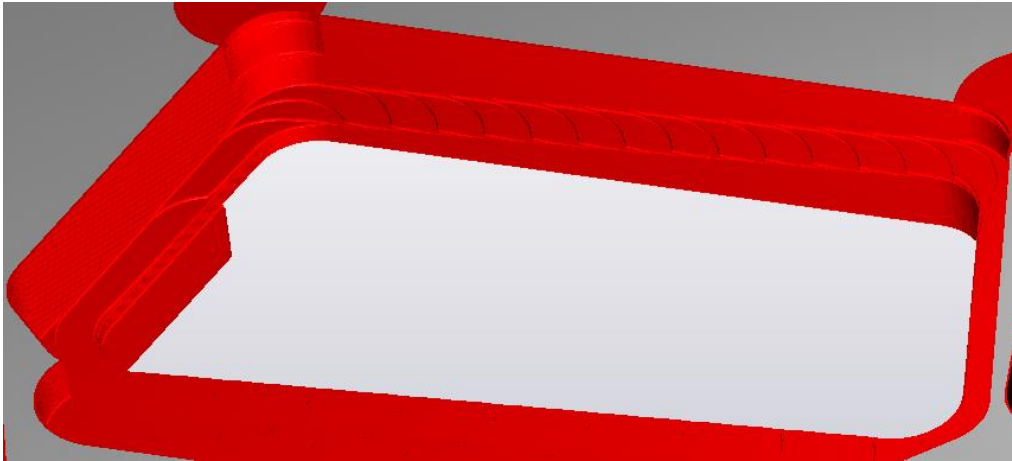
Κατεργασία B18: Σε αυτήν την κατεργασία προσεγγίζεται η γεωμετρία του δεξιού «παραθύρου». Εν αντιθέσει με το αριστερό, στο συγκεκριμένο παράθυρο τόσο τα τοιχώματά του, όσο και το δάπεδο του, αποτελούνται από επιφάνειες με κλίση. Η κλίση του δαπέδου του παραθύρου ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι $3,59^\circ$ ενώ η κλίση των εσωτερικών τοιχωμάτων δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται από επιφάνεια σε επιφάνεια. Η επίτευξη της εκχόνδρισης σε μία τόσο πολύπλοκη γεωμετρία κατέστη δυνατή με την χρήση της μεθόδου HSR (High Speed Roughing) και κατόπιν της τεχνικής Rest Roughing. Για τον έλεγχο της κατεργασίας τοποθετήθηκαν όρια στο πρόγραμμα τα οποία περιλάμβαναν μόνο το δεξί παράθυρο και τις εσωτερικές διαμορφώσεις του. Η συσχέτιση του εργαλείου σε σχέση με τα όρια αυτά επιλέχθηκε να είναι εσωτερική. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η απόσταση που θα περάσει το εργαλείο από τα τοιχώματα και το δάπεδο καθώς και η κίνηση του κατά τον Z άξονα, ορίσθηκε στο 1mm. Διάρκεια κατεργασίας $t_{18}= 1h\ 54min\ 22sec$.



Εικόνα 4.38: Η κοπτική τροχιά όπως φαίνεται σε τομή (αριστερά) και η κάτοψη της (δεξιά)

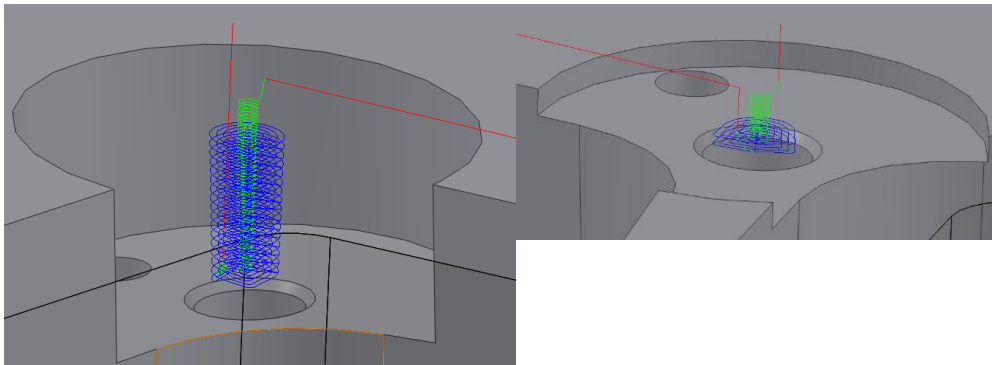


Εικόνα 4.39: Κατεργασία κεκλιμένων επιπέδων εσωτερικά του δεξιού παραθύρου. Διακρίνονται τα "σκαλοπάτια" κατά μήκος του δαπέδου

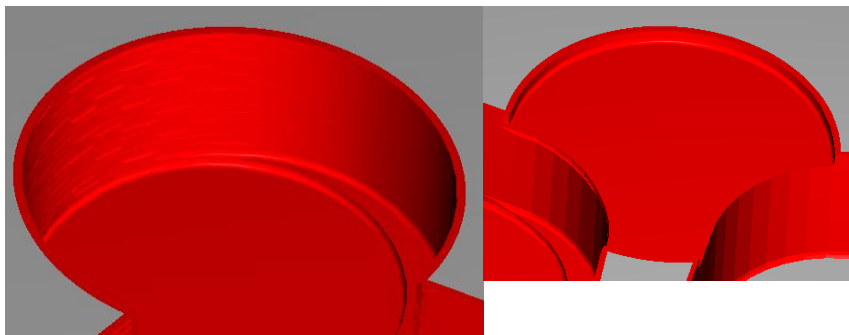


Εικόνα 4.40: Άποψη της απέναντι πλευράς της κατεργασμένης γεωμετρίας. Φαίνονται τα αποτυπώματα της σταδιακής καθόδου του εργαλείου, τόσο στα τοιχώματα, όσο και στο δάπεδο.

Κατεργασία B19: Η τελευταία κατεργασία είναι η εκχόνδριση δύο κυκλικών ποκετών που βρίσκονται στο δεξί παράθυρο. Η ποκέτα που έχει και το περισσότερο υλικό προς αφαίρεση έχει κεκλιμένο δάπεδο $3,59^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Όπως και για την προηγούμενη γεωμετρία, λόγω της ιδιομορφίας της γεωμετρίας, έγινε χρήση της μεθόδου HSR – Rest Roughing. Η απόσταση από τα τοιχώματα και το δάπεδο, αλλά και το βήμα κατά τον Z άξονα είναι 1mm. Η κοπή είχε διάρκεια $t_{19} = 18\text{min } 23\text{sec}$.



Εικόνα 4.41: Τροχιά κατεργασίας της κεκλιμένης κυκλικής ποκέτας (αριστερά) και τη κανονικής (δεξιά)



Εικόνα 4.42: Αποτελέσματα της κατεργασίας 19. Διακρίνονται και πάλι τα αποτυπώματα του εργαλείου κατά την κάθοδο του στο Z επίπεδο

Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης και προφανώς γενικά της εκχόνδρισης και του ημι-φινιρίσματος του τεμαχίου υπολογίσθηκε σύμφωνα με το πρόγραμμα $t_{\text{totB}} = 6\text{h } 57\text{min } 21\text{sec}$.

Προσθέτοντας του χρόνους της Α' και της Β' φάσης έχουμε τον ολικό χρόνο που απαιτήθηκε για την κατεργασία του τεμαχίου: $t_{\text{tot}} = 19\text{h } 16\text{min } 23\text{ sec}$. Παρατηρείται προφανώς ότι ο συνολικός χρόνος είναι μεγάλος, ειδικά αν ληφθεί υπόψη ότι έπονται και δύο φάσεις φινιρίσματος. Όπως όμως έχει ήδη αναφερθεί, ο χρόνος της κοπής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις επιλεγμένες συνθήκες κοπής, οι οποίες εν προκειμένω επιλέχθηκαν με εμπειρικό τρόπο. Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης του χρόνου της κατεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ CAM

Στόχος κάθε παραγωγής είναι να επιτύχει, με τη χρήση των κατάλληλων συνθηκών κοπής, κοπτικών εργαλείων και στρατηγικών κοπής, τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα με το μικρότερο κόστος. Όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ένας δείκτης που συνδέεται τόσο με την παραγωγικότητα όσο και με το κόστος, είναι ο χρόνος κοπής. Υπό το πρίσμα του κόστους, ο χρόνος κοπής, σημαίνει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τη μηχανή λόγω της εκτεταμένης λειτουργίας της, περισσότερη φθορά στα εργαλεία, μεγαλύτερος αριθμός εργατοωρών ανά τεμάχιο κ.λπ.. Όσον αφορά την παραγωγικότητα, ο χρόνος κοπής είναι συνυφασμένος με την απασχόληση της εργαλειομηχανής από την κατεργασία άλλου τεμαχίου, απασχόληση εξειδικευμένου προσωπικού κ.ο.κ.. Είναι λοιπόν προφανές ότι ο χρόνος κοπής θα πρέπει να είναι ελάχιστος, εντός φυσικά λειτουργικών ορίων.

Η πρώτη διαδικασία για την παραγωγή ενός τεμαχίου, είναι ο προγραμματισμός του και η προσομοίωση της κατεργασίας του σε λογισμικό CAM. Είναι επομένως λογικό, ότι για να γίνει μια κατεργασία βέλτιστη, θα πρέπει να είναι βέλτιστος και ο προγραμματισμός της.

Αυτό που χαρακτηρίζει μια κατεργασία, είναι η τροχιά που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια της. Από την τροχιά του εργαλείου είναι φυσικό να εξαρτάται ο χρόνος της κοπής. Άρα το πρώτο βήμα για τη μείωση του χρόνου κοπής σε μία κατεργασία, είναι ο όσον το δυνατόν καλύτερος σχεδιασμός της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου.

Η τροχιά του εργαλείου προκύπτει έπειτα από τον ορισμό ενός πλήθους παραγόντων, το μέγεθος του οποίου ποικίλλει από το ένα λογισμικό στο άλλο. Το λογισμικό SolidCam που χρησιμοποιήθηκε, διαθέτει ένα εύρος 100 και άνω παραγόντων, αυξομειούμενης σπουδαιότητας, για τον ορισμό μιας 2.5D κατεργασίας. Η επιλογή των τιμών του εκάστοτε παράγοντα, βασίζεται κατά κύριο λόγο στην εμπειρία που διαθέτει ο προγραμματιστής.

5.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ


Ο συνολικός χρόνος για την εκχόνδριση και το ημι-φινίρισμα του τεμαχίου, υπολογίσθηκε από το λογισμικό, σε 19h 16min και 23sec. Τα 2/3 όμως αυτού του χρόνου, καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η οποία έχει συνολικό χρόνο κοπής $t_{\text{totA}} = 12\text{h } 19\text{min } 23\text{sec}$. Παρατηρώντας τους χρόνους κοπής των κατεργασιών που απαρτίζουν την πρώτη φάση, γίνεται αντιληπτό ότι μία μόνο κατεργασία καλύπτει το 1/3 του χρόνου που χρειάζονται συνολικά δεκατρείς κατεργασίες. Αυτή η κατεργασία είναι η κατεργασία A4, στην οποία γίνεται η εκχόνδριση της εσωτερικής ποκέτας με τη χρήση φραιζοκεφαλής διαμέτρου 80mm. Ο χρόνος κοπής αυτής της κατεργασίας είναι:

$$t_{A4} = 4\text{h } 31\text{min } 22\text{sec}.$$

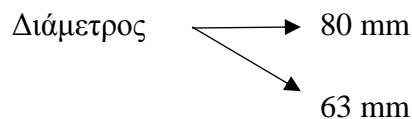
Είναι προφανές ότι η βελτιστοποίηση αυτής της κατεργασίας θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στο συνολικό χρόνο κοπής, άρα κατ' επέκταση στο κόστος της παραγωγής του τεμαχίου και στην συνολική παραγωγικότητα. Σε αυτή την ενότητα λοιπόν θα μελετηθεί η βελτιστοποίηση της τροχιάς του εργαλείου της κατεργασίας A4, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi.


5.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

Το πρώτο βήμα κατά τον σχεδιασμό του πειράματος, είναι ο ορισμός των παραγόντων και των επιπέδων τους. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν συνολικά τέσσερις παράγοντες, ένας παράγοντας δύο επιπέδων και οι υπόλοιποι τριών. Οι παράγοντες αναλυτικά είναι οι εξής:

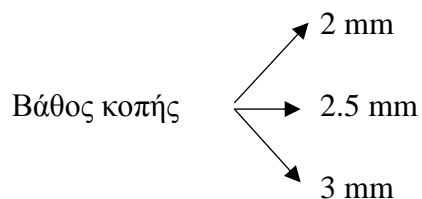
 **Διάμετρος κοπτικού εργαλείου:** Η αρχική ιδέα για τη βελτίωση της κατεργασίας ήταν η χρήση διαφορετικής διαμέτρου φραιζοκεφαλής. Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται η κεφαλή των 80mm η οποία κατεργάζεται την πρώτη ύλη, αφήνοντας υλικό για τη φάση του ημι-φινιρίσματος σε απόσταση 20mm από τα τοιχώματα. Η ιδέα η οποία μελετήθηκε λοιπόν, ήταν η χρήση μικρότερης φραιζοκεφαλής με διάμετρο 63mm, παράλληλα όμως με την μείωση του μήκους του παραμένου υλικού στα 15mm. Η μείωση του μήκους, οφείλεται στη δυνατότητα που παρέχει η μικρότερη διάμετρος του εργαλείου για προσέγγιση της πρώτης ύλης από πιο κοντινό σημείο σε σχέση με το προηγούμενο εργαλείο. Θα εξεταστεί λοιπόν η συμβολή που έχει η αλλαγή της διαμέτρου στο χρόνο που απαιτείται για την κοπή.

Προκύπτει επομένως ότι ο παράγοντας «Διάμετρος» έχει δύο επίπεδα:

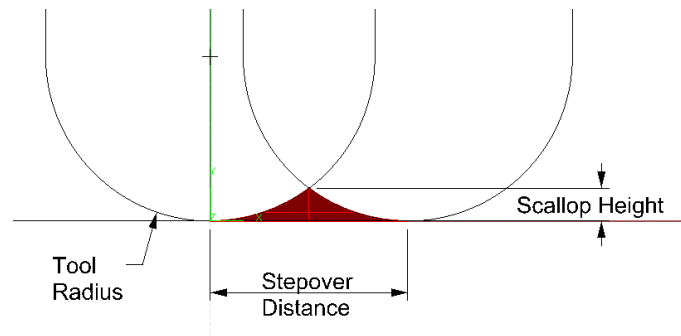


 **Βάθος κοπής:** Η αρχική τιμή του βάθους κοπής τοποθετήθηκε στα 2mm. Η επιλογή αυτή έγινε με βάση την εμπειρία των μηχανικών της εταιρείας πάνω στην κατεργασία του συγκεκριμένου τεμαχίου. Παρ' όλο που το βάθος κοπής θα μελετηθεί και στην ενότητα της βελτιστοποίησης με γενετικό αλγόριθμο, μια πρώτη ιδέα για την επιρροή του στο τελικό αποτέλεσμα προκύπτει μέσω αυτής της μεθόδου. Λόγω της σκληρότητας του υλικού και λαμβάνοντας υπόψη την φθορά που μπορεί να προκαλέσει η αύξηση του βάθους κοπής στο κοπτικό εργαλείο, λήφθηκε η μέγιστη τιμή για τη μελέτη του βάθους κοπής να είναι τα 3mm, με ενδιάμεσο βήμα 0.5mm.

Η σημασία του παράγοντα «βάθος κοπής» στην κατεργασία θα εξεταστεί λοιπόν σε τρία επίπεδα:

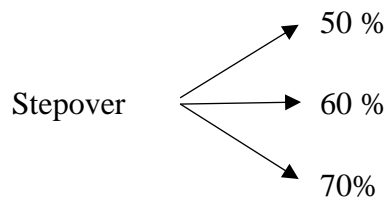


✚ **Επικάλυψη (%) της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου:** Το ποσοστό της διαμέτρου που θα ορισθεί ως επικάλυψη (overlap), καθορίζει την απόσταση που θα έχει ένα πάσσο του εργαλείου, από το επόμενο του (stepover). Η απόσταση αυτή ορίζεται επομένως, ως ποσοστό της διαμέτρου.



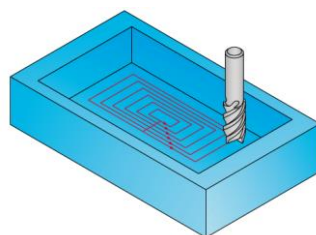
Εικόνα 5.1: Σχηματικός ορισμός του "stepover"

Η αρχική τιμή που είχε δοθεί σε αυτόν τον παράγοντα ήταν 50% για τους ίδιους λόγους με προηγουμένως. Αποφασίσθηκε λοιπόν η ένταξη του στο πείραμα, ώστε να διαπιστωθεί κατα πόσον επηρεάζει το χρόνο της κατεργασίας. Η μελέτη αυτού του παράγοντα θα γίνει σε τρία επίπεδα, ποσοστιαία με την διάμετρο:



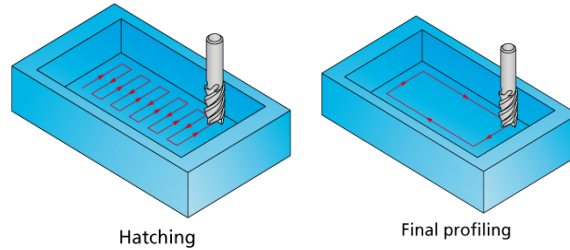
• **Μέθοδος φραιζαρίσματος:** Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, υπάρχει πληθώρα παραγόντων, τιμές των οποίων καλείται να διαλέξει ο χρήστης. Ένας από αυτούς τους παράγοντες που προσφέρει το λογισμικό SolidCam, είναι η μέθοδος κοπής. Το λογισμικό διαθέτει τρεις διαφορετικές μεθόδους επιλογής για αντίρροπο φραιζάρισμα:

✚ **Contour Technology:** Σε αυτή τη μέθοδο το λογισμικό ορίζει την τροχιά του κοπτικού εργαλείου παράλληλη με την περιφέρεια που έχει ορίσει ο χρήστης. Παράδειγμα αυτής της μεθόδου φαίνεται παρακάτω.



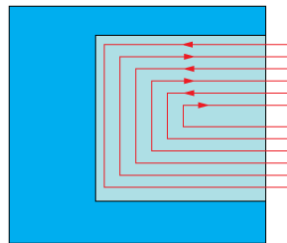
Εικόνα 5.2: Μέθοδος Contour

✚ **Hatch and Finish:** Με αυτή τη μέθοδο το λογισμικό επιλέγει μια γραμμική τροχιά τύπου «raster», σε γωνία με την περιφέρεια της ποκέτας που είτε επιλέγεται αυτόματα, είτε επιλέγεται από το χρήστη. Αφού ολοκληρωθεί η κατεργασία Hatch, το πρόγραμμα εκτελεί και ένα πάσσο φινιρίσματος κατά μήκος της περιφέρειας. Η γωνία της τροχιάς ορίστηκε 90°.



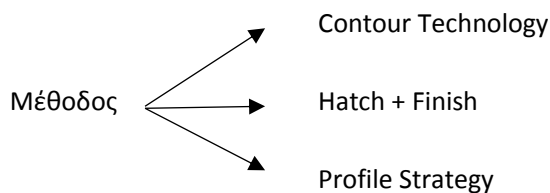
Εικόνα 5.3: Μέθοδος Hatch με πάσσο φινιρίσματος

✚ **Profile Strategy:** Σε αυτή τη μέθοδο, η διαδρομή του εργαλείου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο Z αποτελείται από αρκετά ισαπέχοντα προφίλ με έναρξη την έξω πλευρά του μοντέλου και σε απόσταση που ορίζεται από αντίστοιχη παράμετρο. Το εργαλείο μετακινείται σε αντισταθμίσεις παράλληλες με τη γεωμετρία της ποκέτας. Επιπρόσθετα επιλέχθηκε zig-zag διαδρομή του εργαλείου.



Εικόνα 5.4: Μέθοδος Profile με zig-zag διαδρομή

Συνολικά ο παράγοντας μέθοδος φραιζαρίσματος διαθέτει τρία επίπεδα:



Πέραν όμως των παραγόντων που αλλάζουν τιμές, υπάρχουν και παράγοντες στο λογισμικό που διατηρούνται σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Οι βασικότεροι από αυτούς είναι:

- ✚ Σύνδεση πάσσων (Links): Σε όλες τις περιπτώσεις του πειράματος, ορίστηκε το εργαλείο, πριν την μετάβασή του στο επόμενο πάσσο, να ανεβαίνει στο επίπεδο ασφαλείας. Στο επίπεδο αυτό, μπορεί κινείται με τη μέγιστη πρόωση προκειμένου να μεταβεί στο σημείο έναρξης του επόμενου πάσσου. Αυτό γίνεται ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε εμπλοκή του εργαλείου με το τεμάχιο κατά τη μετακίνησή του.
- ✚ Αντίρροπο φραιζάρισμα (Conventional Milling): Λόγω της σύνθεσης του υλικού που το καθιστά ιδιαίτερα σκληρό, αποφεύχθηκε η κατεργασία του με ομόρροπο φραιζάρισμα. Αυτό το μέτρο λήφθηκε γιατί η απότομη επαφή του κοπτικού με το παχύτερο απόβλιττο θα σήμαινε μεγάλη φθορά, ακόμα και καταστροφή των κοπτικών ακμών. Γι' αυτόν το λόγο, διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις η στρατηγική του αντίρροπου φραιζαρίσματος.
- ✚ Συνθήκες κοπής: Οι λοιπές συνθήκες κοπής, πλην δηλαδή του βάθους κοπής, παρέμειναν σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς η μελέτη αυτή αφορά την βελτιστοποίηση της τροχιάς του εργαλείου και όχι των συνθηκών. Υπενθυμίζεται ότι $f_{min} = 170 \text{ mm/min}$ και $n = 550 \text{ RPM}$.

5.3.ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για την επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης απαιτείται αρχικά ο υπολογισμός των συνολικών βαθμών ελευθερίας του πειράματος. Το πείραμα διαθέτει τέσσερις παράγοντες, έναν σε δύο επίπεδα και τρεις σε τρία. Επομένως υπολογίζεται:

$$DoF = 1(\text{Διάμετρος}) + 2(\text{Βάθος κοπής}) + 2(\text{Μέθοδος}) + 2(\text{Επικάλυψη}) = 7$$

Στην ανάλυση του πειράματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και μία διασταύρωση, η οποία προκύπτει από την επιλογή των συγκεκριμένων παραγόντων. Η διασταύρωση αυτή εμφανίζεται μεταξύ των παραγόντων «Διάμετρος» και «Επικάλυψη», καθώς η δεύτερη εξαρτάται άμεσα από την πρώτη, όντας ποσοστό της. Οι βαθμοί ελευθερίας της διασταύρωσης είναι το γινόμενο των βαθμών ελευθερίας των διασταυρούμενων παραγόντων. Επομένως:

$$DoF(\text{Διάμετρος} \times \text{Επικάλυψη}) = 1 \times 2 = 2$$

Η διασταύρωση λοιπόν έχει 2 βαθμούς ελευθερίας. Προσθέτοντάς τους στους βαθμούς ελευθερίας των παραγόντων προκύπτουν οι ολικοί βαθμοί ελευθερίας του πειράματος:

$$DoF_{total} = 7 + 2 = 9$$

Για την μελέτη του πειράματος κατά συνέπεια, απαιτείται η επιλογή ορθογώνιας διάταξης τουλάχιστον 9 βαθμών ελευθερίας. Οι περισσότερες όμως ορθογώνιες διατάξεις απευθύνονται σε πειράματα των οποίων οι παράγοντες έχουν ίσο αριθμό επιπέδων. Στην προκειμένη περίπτωση, είτε θα πρέπει διαμορφωθεί κάποια ΟΑ για να μπορέσει να ανταποκριθεί στις συνθήκες του πειράματος, είτε να χρησιμοποιηθεί ειδική ΟΑ η οποία αναλογεί σε πειράματα μικτών επιπέδων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι υπάρχουσες διατάξεις μικτών επιπέδων (2-3 επίπεδα) σύμφωνα με το λογισμικό Minitab, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση.

Available Taguchi Designs (with Number of Factors)		
Designs	Mixed 2-3 level designs	
	2 level	3 level
L18	1	1-7
L36	1-11	2-12
L36	1-3	13
L54	1	3-25

Εικόνα 5.5: Ορθογώνιες Διατάξεις μικτών επιπέδων (για 2-3 επίπεδα)

Όλες οι διατάξεις του σχήματος διαθέτουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από το πείραμα, καθώς τους λιγότερους τους έχει η διάταξη L18 (17 DoF). Από αυτήν την άποψη όλες οι διατάξεις είναι κατάλληλες. Έχοντας κατά νου ότι περισσευούμενοι βαθμοί ελευθερίας ισοδυναμούν με περαιτέρω πειράματα, τα οποία καλό θα ήταν να αποφεύγονται, επιλέγεται τελικά η διάταξη L18.

Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να αναλύσει έναν παράγοντα δύο επιπέδων (στην προκειμένη περίπτωση την διάμετρο) και από έναν έως επτά παράγοντες τριών επιπέδων (Επικάλυψη-Μέθοδος-Βάθος κοπής).

Οι συνδυασμοί των επιπέδων που απαιτούνται για την διεξαγωγή των πειραμάτων από την L18 διάταξη είναι οι εξής:

Tool Diameter (mm)	Cutting Method	Overlap (%)	Depth of Cut (mm)
63	Contour	50	2
63	Hatch	50	2,5
63	Profile	50	3
63	Contour	60	2
63	Hatch	60	2,5
63	Profile	60	3
63	Contour	70	2,5
63	Hatch	70	3
63	Profile	70	2
80	Contour	50	3
80	Hatch	50	2
80	Profile	50	2,5
80	Contour	60	2,5
80	Hatch	60	3
80	Profile	60	2
80	Contour	70	3
80	Hatch	70	2
80	Profile	70	2,5

Πίνακας 5.1: Συνδυασμός επιπέδων των παραγόντων με την L18 διάταξη

5.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Το κύριο αποτέλεσμα που αναλύθηκε ήταν ο χρόνος κοπής. Όπως όμως αναλύθηκε κατά τον ορισμό των παραγόντων, η χρήση μικρότερης διαμέτρου σημαίνει μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού, καθώς τα 20mm που άφηνε η κεφαλή των 80mm έγιναν 15mm. Είναι προφανές ότι η αφαίρεση παραπάνω υλικού θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου κοπής. Υπό αυτήν την σκοπιά, δεν δικαιολογείται η χρήση της μικρότερης διαμέτρου καθώς αυξάνει το χρόνο κοπής.

Σε αυτήν την περίπτωση όμως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι η μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού κατά τη διάρκεια της εκχόνδρισης, συνεπάγεται λιγότερο όγκο προς κατεργασία κατά τη διάρκεια του φινιρίσματος, στο οποίο η ταχύτητα πρόωσης είναι χαμηλότερη και κατά συνέπεια χαμηλότερος είναι και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού.

Εάν υποθεθεί ότι ο αρχικός όγκος της πρώτης ύλης είναι V_{in} , και ο όγκος της που απομένει στο τεμάχιο μετά το πέρας της κατεργασίας είναι V_{rem} , τότε ο όγκος της πρώτης ύλης που αφαιρέθηκε με την κατεργασία είναι:

$$V_m = V_i - V_r \text{ (mm}^3\text{)}$$

Θεωρώντας τώρα ότι ο λόγος των ρυθμών αφαίρεσης υλικού της εκχόνδρισης προς του φινιρίσματος είναι $n = \frac{MRR_{roughing}}{MRR_{finishing}}$, μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο κοπής συνυπολογίζοντας το επιπλέον όγκο που αφαιρέθηκε από το τεμάχιο ως εξής:

$$T_{eq} = T_C + n \cdot (V_r - \min(V_{ri})) \cdot \frac{\bar{T}_i}{\bar{V}_{mi}}$$

Όπου i το πλήθος των πειραμάτων: $i=1 \dots 18$

Λαμβάνοντας από τους μηχανικούς της εταιρείας μια τυπική τιμή της πρόωσης του φινιρίσματος στα 50 mm/min, πλάτος κοπής 1.5 φορές μικρότερο στο φινίρισμα και με σταθερό βάθος κοπής, ο λόγος των MRR προκύπτει $n=5$.

Οι απαιτούμενοι όγκοι υπολογίσθηκαν από την προσομοίωση του SolidCam. Επιλέχθηκε η προσομοίωση Rest Material στην οποία ορίστηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος (Set region of interest) η εσωτερική ποκέτα. Στην συνέχεια με την επιλογή Split Rest Material ήταν εύκολος ο διαχωρισμός των όγκων που χρειαζόντουσαν.

Για την απλούστευση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων αναφέρονται τα εξής:

- ✓ Ο αρχικός όγκος υπολογίστηκε $V_i = 3445602,336 \text{ mm}^3$
- ✓ Ο παραμένον όγκος είναι σταθερός στην περίπτωση της κάθε διαφορετικής διαμέτρου. Αυτό συνεπάγεται: $V_{r(80\text{mm})} = 716951,059 \text{ mm}^3$ και $V_{r(63\text{mm})} = 549730,485 \text{ mm}^3$
- ✓ Με σταθερό τον παραμένοντα όγκο προκύπτει και σταθερός αφαιρούμενος όγκος για κάθε διάμετρο: $V_{m(80\text{mm})} = 2728651,277 \text{ mm}^3$ και $V_{r(63\text{mm})} = 2895871,851 \text{ mm}^3$.
- ✓ Ελάχιστος απομένον όγκος: $\min(V_{ri}) = 549730,485 \text{ mm}^3$
- ✓ Μέσος χρόνος κοπής: $\overline{T_c} = 15049,11 \text{ sec}$
- ✓ Μέσος αφαιρεθείς όγκος: $\overline{V_{mi}} = 2812261,56 \text{ mm}^3$

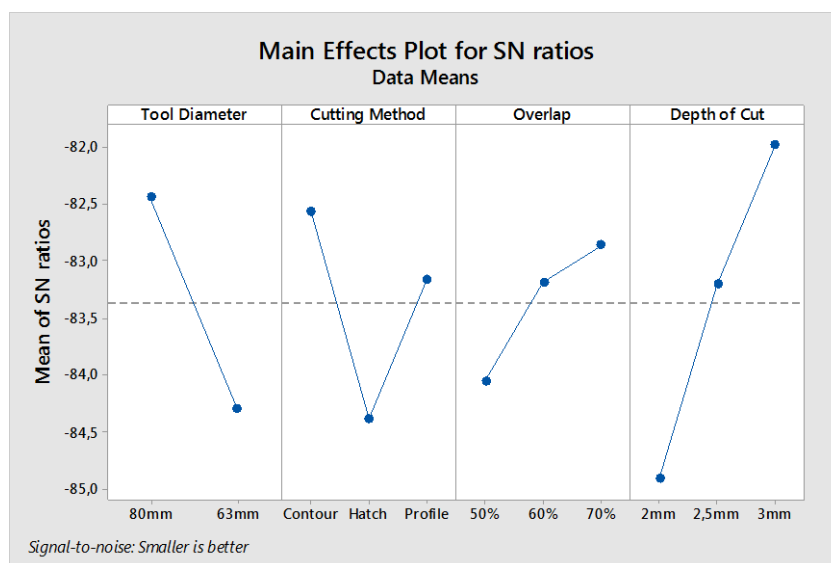
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα συγκεντρωτικά:

Tool Diameter	Cutting Method	Overlap	Depth of Cut	Machining Time T_c (sec)	Equal Machining Time T_{eq} (s)
63mm	Contour	50%	2mm	19726,00	19726,00
63mm	Hatch	50%	2,5mm	19767,00	19767,00
63mm	Profile	50%	3mm	14465,00	14465,00
63mm	Contour	60%	2mm	17329,00	17329,00
63mm	Hatch	60%	2,5mm	17642,00	17642,00
63mm	Profile	60%	3mm	13943,00	13943,00
63mm	Contour	70%	2,5mm	13402,00	13402,00
63mm	Hatch	70%	3mm	14266,00	14266,00
63mm	Profile	70%	2mm	18575,00	18575,00
80mm	Contour	50%	3mm	11451,00	15925,19
80mm	Hatch	50%	2mm	19908,00	24382,19
80mm	Profile	50%	2,5mm	12781,00	17255,19
80mm	Contour	60%	2,5mm	11812,00	16286,19
80mm	Hatch	60%	3mm	12604,00	17078,19
80mm	Profile	60%	2mm	14246,00	18720,19
80mm	Contour	70%	3mm	9451,00	13925,19
80mm	Hatch	70%	2mm	16520,00	20994,19
80mm	Profile	70%	2,5mm	12996,00	17470,19

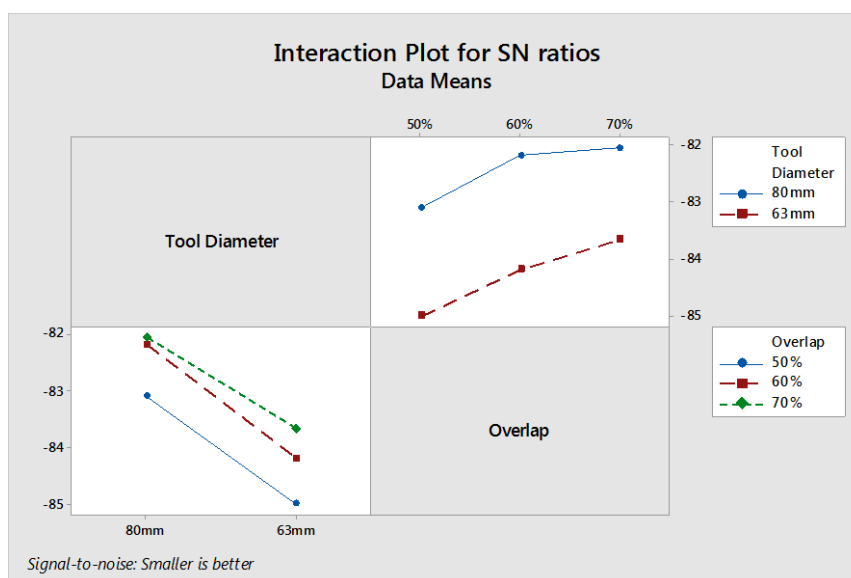
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα πειραμάτων

5.5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, αρχικά αναλύθηκαν με τη μέθοδο S/N ratio analysis. Τα αποτελέσματα υποπίπτουν στον ορισμό ποιότητας smaller is better, καθώς αντικειμενικός στόχος του πειράματος είναι η μείωση του χρόνου κοπής. Για την ανάλυση τους λήφθηκε υπόψη και η διασταύρωση των παραγόντων «Διάμετρος» και «Επικάλυψη». Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που λήφθηκαν έπειτα την ανάλυση, τόσο του καθαρού χρόνου κοπής (T_c), όσο και του ισοδύναμου χρόνου κοπής (T_{eq}).



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα λόγων S/N για τον καθαρό χρόνο κοπής



Εικόνα 5.7: Διαγράμματα διασταυρώσεων για τον καθαρό χρόνο κοπής

Στα διαγράμματα των λόγων S/N, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση μεταξύ των επιπέδων ενός παράγοντα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά στην επιρροή που έχουν τα αντίστοιχα επίπεδα στο τελικό αποτέλεσμα. Το επίπεδο το οποίο έχει τη μικρότερη κατ' απόλυτο τιμή του λόγου S/N, προσφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Επομένως, όσον αφορά τον καθαρό χρόνο κοπής, σύμφωνα με το διάγραμμα των λόγων S/N προκύπτει ο εξής βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων:

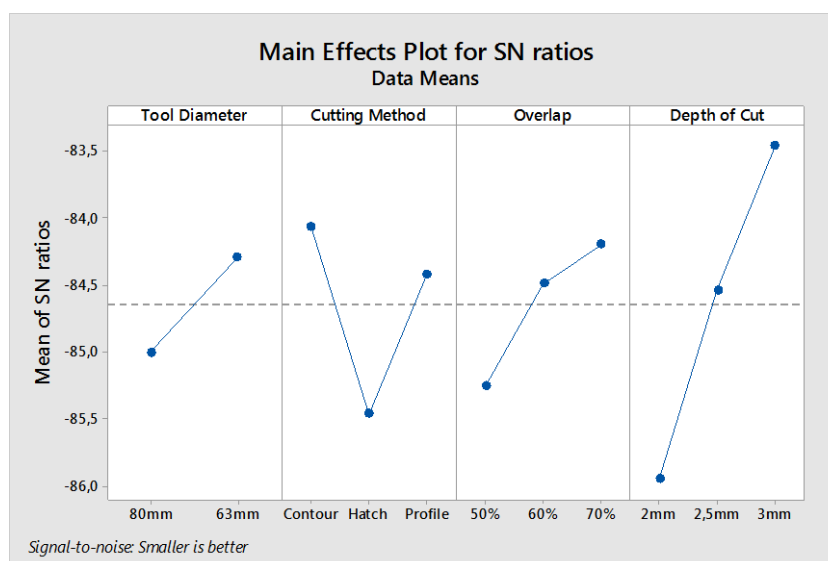
Διάμετρος: 80mm

Βάθος κοπής: 3mm

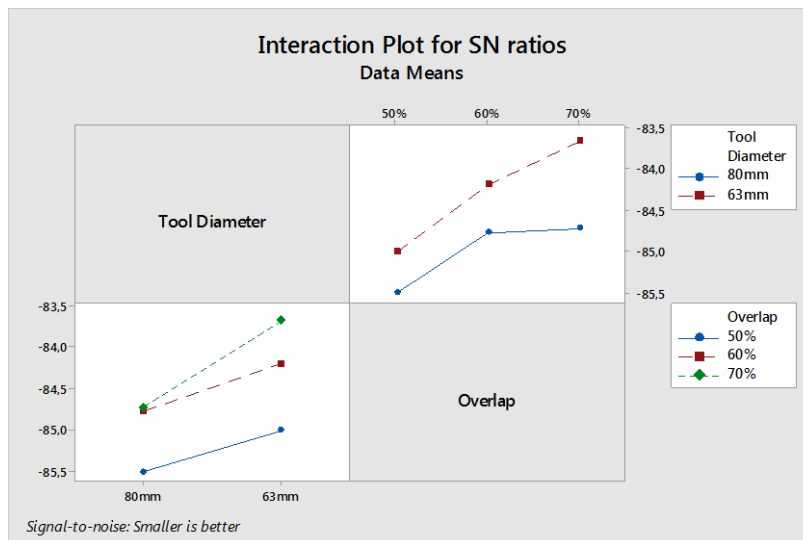
Επικάλυψη: 70%

Μέθοδος: Contour Milling

Στο διάγραμμα των διασταυρώσεων, εφόσον δεν παρατηρείται τομή μεταξύ των καμπυλών του κάθε παράγοντα, συμπεραίνεται ότι η μελετηθείσα διασταύρωση έχει μικρό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα και δεν χρειάζεται να ληφθεί σοβαρά υπόψη.



Εικόνα 5.8: Διαγράμματα S/N για τον ισοδύναμο χρόνο κοπής



Εικόνα 5.9: Διαγράμματα διασταυρώσεων για τον ισοδύναμο χρόνο κοπής

Στην περίπτωση που η ανάλυση γίνεται ως προς τον ισοδύναμο χρόνο κοπής, παρατηρείται αντιστροφή των επιπέδων του παράγοντα «Διάμετρος». Στη δεύτερη ανάλυση, το βέλτιστο αποτέλεσμα, δηλαδή το μικρότερο ισοδύναμο χρόνο κοπής, τον προσφέρει η διάμετρος των 63mm καθώς έχει την μικρότερη απόλυτη τιμή. Είναι φυσικό ότι το αποτέλεσμα των δύο αυτών επιπέδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο η των MRR που εν προκειμένω είναι 5. Όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός, τόσο θα αυξάνεται και η κλίση της καμπύλης για χάρη της μικρότερης διαμέτρου. Επιπροσθέτως, η μη ύπαρξη τομής μεταξύ των καμπυλών στο διάγραμμα των διασταυρώσεων σημαίνει ότι η διασταύρωση είναι μικρής σημασίας επί του αποτελέσματος. Σύμφωνα λοιπόν με τη δεύτερη ανάλυση, ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων είναι:

Διάμετρος: 63mm

Βάθος κοπής: 3mm

Μέθοδος: Contour Milling

Επικάλυψη: 70%

Μια πρόβλεψη της μεθόδου για το αποτέλεσμα αυτού του βέλτιστου συνδυασμού είναι $T_c = 11874.6$ sec. Τοποθετώντας τα βέλτιστα επίπεδα στους αντίστοιχους παράγοντες στο SolidCam και κάνοντας ένα «τρέξιμο» επιβεβαίωσης, προκύπτει ο βέλτιστος χρόνος κοπής $T_{c,opt} = 11560$ sec.

5.6.ANOVA

Το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου χρόνου με τη στατιστική μέθοδο ANOVA, ώστε να προκύψουν τα ποσοστά επίδρασης του κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα. Με το πέρας της ανάλυσης προέκυψαν τα εξής:

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tool Diameter	1	9276201	6,74%	9276201	9276201	10,68	0,011
Cutting Method	2	28329773	20,58%	28329773	14164887	16,30	0,002
Overlap	2	15689499	11,40%	15689499	7844750	9,03	0,009
Depth of Cut	2	76518722	55,60%	76518722	38259361	44,03	0,000
Tool Diameter*Overlap	2	861483	0,63%	861483	430742	0,50	0,627
Error	8	6951005	5,05%	6951005	868876		
Total	17	137626684	100,00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
932,135	94,95%	89,27%	35189465	74,43%

Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA

Όλοι οι κύριοι συμμετέχοντες παράγοντες είναι σημαντικοί καθώς το P-Value του καθενός που φαίνεται στο σχήμα είναι μικρότερο του 0.05. Εξαιρείται η διασταύρωση της διαμέτρου με την επικάλυψη η οποία είναι ελάσσονος σημασίας.

Από τον πίνακα Model Summary προκύπτει ότι το μοντέλο εξηγεί το 94.95% των αποτελεσμάτων του χρόνου (R-sq).

Τα ποσοστά επιρροής λοιπόν του κάθε παράγοντα κατά φθίνουσα σειρά είναι:

Βάθος κοπής: 55.60%

Μέθοδος: 20.58%

Επικάλυψη: 11.40%

Διάμετρος: 6,74%

Το υψηλό ποσοστό του βάθους κοπής οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση του, μειώνεται ο αριθμός των απαιτούμενων πάσσων για την ολοκλήρωση της κατεργασίας (10 πάσσα για βάθος 2mm, 7 πάσσα για βάθος 3mm). Υπενθυμίζεται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος των MRR, τόσο θα αυξάνεται και η επίδραση της διαμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, ολοκληρώθηκε η βελτιστοποίηση του προγραμματισμού της κατεργασίας σε λογισμικό CAM, έχοντας λάβει υπόψη τέσσερις διαφορετικούς παράγοντες. Από αυτούς τους τέσσερις παράγοντες, μόνο ένας (βάθος κοπής) ανήκει στην κατηγορία των συνθηκών κατεργασίας. Οι υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα πρόωσης, ταχύτητα περιστροφής) διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του προγραμματισμού και της αρχικής βελτιστοποίησης, σε τιμές οι οποίες δόθηκαν από τους τεχνικούς της εταιρείας. Σε αυτήν την ενότητα επομένως θα εξεταστεί η εύρεση των τιμών των βασικών συνθηκών κοπής, οι οποίες θα παράγουν το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς κάποιο χαρακτηριστικό της παραγωγής. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και το τρέξιμο του γενετικού αλγορίθμου είναι το MATLAB.

6.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το πρώτο βήμα στην κατασκευή του γενετικού αλγορίθμου είναι η εύρεση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση, είναι η συνάρτηση της οποίας την ελαχιστοποίηση θα επιτύχει ο γενετικός αλγόριθμος. Οι δύο πιο σημαντικές συνιστώσες μιας κατεργασίας, που κατά κόρον χρησιμοποιούνται ως αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι ο χρόνος που απαιτείται για την αποπεράτωσή της και ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια αυτή. Άλλες συνιστώσες που θα μπορούσαν να εξεταστούν ως αντικειμενικές είναι η τραχύτητα της επιφάνειας σε κατεργασίες φινιρίσματος, η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων ή η ελαχιστοποίηση των δυνάμεων που ασκούνται κατά την κατεργασία.

Η κατεργασία που εξετάζεται εν προκειμένω, είναι εκχόνδριση ημι- ανοικτής ποκέτας. Κατά κύριο λόγο, στις κατεργασίες εκχόνδρισης επιζητείται η ελαχιστοποίηση του χρόνου κοπής, με παράλληλη ελαχιστοποίηση του απομένοντος όγκου. Προφανώς τα δύο αυτά μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα, καθώς μικρός απομένων όγκος συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο κοπής. Σε αυτές τις περιπτώσεις επιζητείται μια μέση λύση που να ικανοποιεί εν μέρει και τις δύο συναρτήσεις.

Η επιλογή του απομένοντος όγκου για αντικειμενική συνάρτηση έχει όμως περισσότερο νόημα σε κατεργασίες τεμαχίων με τρισδιάστατες επιφάνειες, καθώς υπάρχει δυνατότητα αυξομείωσης των «σκαλοπατιών» αλλά και της απόστασης από το τελικό τεμάχιο. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, λόγω της 2.5D φύσης της ποκέτας (μεταβαλλόμενο πλάτος και μήκος με σταθερά μεταβαλλόμενο βάθος κοπής), η εξέταση του απομένοντος όγκου δεν είναι λειτουργική καθώς ο τελευταίος έχει σταθερές τιμές που μπορούν να ληφθούν απευθείας από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα, η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε να εκπροσωπήσει την κατεργασία και να επιδιωχθεί η ελαχιστοποίηση της, είναι ο χρόνος κοπής. Ο όγκος που θα κατεργαστεί επιλέχθηκε με βάση τη βελτιστοποίηση της μεθόδου Taguchi, δηλαδή το εργαλείο ορίστηκε να κόβει αφήνει υλικό πάχους 15mm κατά μήκος των κάθετων τοιχωμάτων.

Ως συνάρτηση υπολογισμού του χρόνου κοπής αρχικά ορίστηκε η Σχέση (10). Είναι επομένως προφανές, ότι εφόσον επιλέχθηκε μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση για να αντιπροσωπεύσει το πρόβλημα, ο γενετικός αλγόριθμος υπόκειται στην κατηγορία του μονού στόχου (single objective optimization).

6.2. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ

Οι συνθήκες κοπής που επιλέχθηκαν να εξεταστούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι εξής:

- **Πρόωση ανά δόντι f_z** (mm/tooth)
- **Ταχύτητα κοπής V_c** (m/min)
- **Βάθος κοπής b** (mm)

Στην συνάρτηση η οποία εκφράζει το χρόνο κοπής όπως δόθηκε παραπάνω, παρατηρείται ότι εμφανίζεται μόνο η πρόωση ανά οδόντα f_z . Το επόμενο βήμα επομένως, είναι η ανακατασκευή της συνάρτησης του χρόνου κοπής, ώστε να περιέχει και τις τρεις μεταβλητές. Η ένταξη της ταχύτητας κοπής επιτυγχάνεται με την εναλλαγή της με την ταχύτητα περιστροφής σύμφωνα με την εξίσωση (1).

Ο χρόνος κοπής λαμβάνει πλέον την εξής μορφή:

$$T_C = i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{z \cdot 1000 \cdot f_z \cdot V_c} \text{ (min)} \quad (11)$$

Απομένει η ένταξη του βάθους κοπής. Ο μοναδικός όρος από τους παραπάνω, που περιέχει το βάθος κοπής, είναι ο αριθμός των απαιτούμενων πάσσων (i). Ο αριθμός των πάσσων μπορεί να προκύψει εάν διαιρέσουμε το ολικό βάθος προς κατεργασία, με το εκάστοτε βάθος κοπής (b_{tot}/b). Για παράδειγμα, στην κατεργασία που εξετάζουμε το συνολικό βάθος είναι 20mm. Επιλέγοντας βάθος κοπής 2mm και διαιρώντας τα μεταξύ τους, προκύπτουν 10 απαιτούμενα πάσσα. Σε άλλη περίπτωση που το βάθος κοπής είναι 3mm, ο αριθμός των πάσσων προκύπτει 6.67. Προφανώς ο αριθμός των πάσσων δε δύναται να είναι δεκαδικός. Το δεκαδικό λοιπόν ψηφίο, δηλώνει ένα επιπλέον πάσσο με διαφορετικό βάθος κοπής. Στο προηγούμενο παράδειγμα, αυτό σημαίνει 6 πάσσα με 3mm βάθος και ένα πάσσο με 2mm. Η ακέραια έκφραση του αριθμού πάσσων, επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: Είτε στρογγυλοποιώντας τον δεκαδικό αριθμό στον αμέσως επόμενο ακέραιο ($6.67 \rightarrow 7$), είτε κρατώντας το ακέραιο ψηφίο του αριθμού και προσθέτοντας 1 ($6.67 \rightarrow 6+1=7$). Στο λογισμικό της MATLAB αυτό υλοποιείται με δύο συναρτήσεις ($\text{ceil}(20/3)$ και $\text{fix}(20/3)+1$ αντίστοιχα). Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση fix .

Η τελική λοιπόν μορφή της συνάρτησης του χρόνου κοπής είναι η παρακάτω:

$$T_C = \text{roundup}\left(\frac{b_{tot}}{b}\right) \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{z \cdot 1000 \cdot f_z \cdot V_c} \text{ (min)} \quad (12)$$

Χρησιμοποιώντας τα έως τώρα δεδομένα και τοποθετώντας τα στη συνάρτηση, θα υπολογισθεί ο θεωρητικός χρόνος κοπής και κατόπιν θα συγκριθεί με το χρόνο κοπής που αντλήθηκε από το CAM λογισμικό, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η συσχέτισή τους.

Ο χρόνος κοπής που δίνεται από το λογισμικό είναι 3h 12min 39s ή 192.65 min.

Για την εξεταζόμενη κατεργασία έχουμε τα εξής δεδομένα:

- ❖ $b_{tot} = 20 \text{ mm}$
- ❖ $b = 3 \text{ mm}$
- ❖ $Z = 6$ δόντια
- ❖ $f = 170 \text{ mm/min} \longrightarrow f_z = 0.052 \text{ mm/tooth}$
- ❖ $n = 550 \text{ RMP} \longrightarrow V_c = 108.85 \text{ mm/min}$
- ❖ $L = 4567.3 \text{ mm}$ (μήκος τροχιάς εργαλείου για ένα πάσο)
- ❖ $D = 63 \text{ mm}$

Υπολογίζεται λοιπόν $T_c = 186.324 \text{ min}$ αριθμός πολύ κοντά στην τιμή του λογισμικού, ιδιαίτερα εάν συνυπολογίσουμε επιπρόσθετα 2 min στα οποία το εργαλείο κινείται με τη μέγιστη πρόωση.

6.3. ΤΕΧΝΙΚΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Προκειμένου τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου να έχουν και τεχνική πέρα από μαθηματική υπόσταση, λήφθηκε υπόψη ένα σύνολο περιορισμών. Οι περιορισμοί αυτοί, είτε τεχνολογικής φύσης, είτε περιορισμοί συνυφασμένοι με την ποιότητα της παραγωγής, εισάγονται στο γενετικό αλγόριθμο προκειμένου να περιοριστεί το εύρος των πιθανών λύσεων των συνθηκών κοπής που θα αναζητήσει ο αλγόριθμος, σε ένα ελεγχόμενο πεδίο. Ο εκάστοτε περιορισμός θα πρέπει να εισέρχεται στον αλγόριθμο ως μία έκφραση μικρότερη ή ίση του μηδενός.

Οι περιορισμοί που συμπεριλήφθηκαν στην επίλυση του προβλήματος παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

➤ ΊΣΧΥΣ ΚΟΠΗΣ

Ανά πάσα στιγμή της κατεργασίας, θα πρέπει να εξετάζεται ότι η ισχύς που καταναλίσκεται κατά τη διάρκεια της, δεν ξεπερνά το την μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει η εργαλειομηχανή.

Η τιμή της ισχύος της κοπής υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (6).

Μεταβάλλοντας την ταχύτητα πρόωσης σε πρόωση ανά οδόντα, μέσω της σχέσης (2), η σχέση υπολογισμού της ισχύος μεταβάλλεται ως εξής:

$$P_c = \frac{b \cdot B}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} \cdot K_c \cdot \frac{z \cdot f_z \cdot V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ (kW)} \quad (13)$$

✓ **Πλάτος κοπής (B):** Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζεται κατά το συμβατικό αντίρροπο φραιζάρισμα, είναι το συνεχώς μεταβαλλόμενο πλάτος κοπής. Το κοπτικό εργαλείο, αναλόγως τη γεωμετρία της κατεργαζόμενης περιοχής, άλλοτε βυθίζεται περισσότερο στο υλικό αυξάνοντας το πλάτος κοπής, ενώ άλλοτε βυθίζεται λιγότερο μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το πλάτος της κοπής. Λόγω της αδυναμίας εύρεσης συνάρτησης που να εκφράζει τη συνεχή μεταβολή του πλάτους κοπής, επιλέχθηκε ο υπολογισμός μιας μέσης τιμής που θα εκφράσει το συγκεκριμένο μέγεθος. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τη σχέση (5) του ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, εκφράζει την ποσότητα του υλικού που αφαιρείται σε μία μονάδα χρόνου. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε τον όρο Θ , χρησιμοποιώντας τον ολικό όγκο που αφαιρέθηκε κατά την κατεργασία, προς τον ολικό χρόνο που απαιτήθηκε για αυτήν.

$$\frac{V_{mtot}}{T_c} = b \cdot B \cdot f_{min} \quad (14)$$

Ο χρόνος κοπής της κατεργασίας αντλήθηκε από το λογισμικό $T_c = 192.65$ min, ενώ ο όγκος που αφαιρείται $V_{mtot} = 2895871.85 \text{ mm}^3$. Το βάθος κοπής είναι $b = 3 \text{ mm}$ με ταχύτητα πρόωσης $f_z = 170 \text{ mm/min}$.

Προκύπτει επομένως η μέση τιμή του πλάτους κοπής:

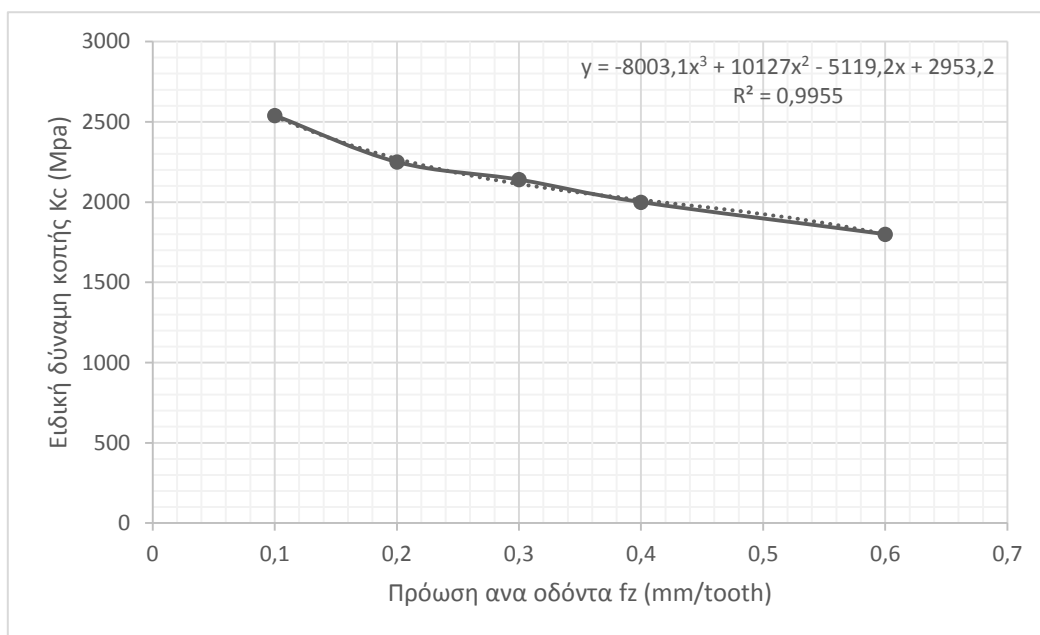
$$\bar{B} = \frac{V_{mtot}}{T_c \cdot b \cdot f_{min}} = 29.4741 \text{ mm} \rightarrow 46.78\% \text{ της διαμέτρου}$$

✓ **Ειδική δύναμη κοπής (K_c):** Σύμφωνα με τον πίνακα της εταιρείας κοπτικών εργαλείων Mitsubishi που δόθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η ειδική δύναμη κοπής μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την πρόωση ανά οδόντα και εξαρτάται από το είδος του υλικού προς κατεργασία. Επιλέγεται επομένως από τον πίνακα η στήλη τιμών του K_c κράμα χρωμίου-μολυβδενίου (υλικό 42CrMo4). Οι τιμές του K_c μεταβάλλονται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:

Workpiece material	Tensile strength (MPa) and hardness	Specific Cutting Force K_c (MPa)				
		0.1(mm/tooth)	0.2(mm/tooth)	0.3(mm/tooth)	0.4(mm/tooth)	0.6(mm/tooth)
Chrome Molybdenum Steel	730	2540	2250	2140	2000	1800

Εικόνα 6.1: K_c συναρτήσει της πρόωσης ανά οδόντα για κράμα χρωμίου-μολυβδενίου

Με βάση αυτές τις τιμές κατασκευάζεται το διάγραμμα $K_c - f_z$ και χρησιμοποιώντας curve fitting προκύπτει η συνάρτηση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη.



Διάγραμμα 6.1: $f_z - K_c$

Η καμπύλη προσεγγίσθηκε με πολυώνυμο τρίτου βαθμού ενώ προέκυψε τιμή $R^2 = 0.9955$. Η προκύπτουσα συνάρτηση λοιπόν είναι:

$$K_c = -8003.1 \cdot f_z^3 + 10127 \cdot f_z^2 - 5119.2 \cdot f_z + 2953.2$$

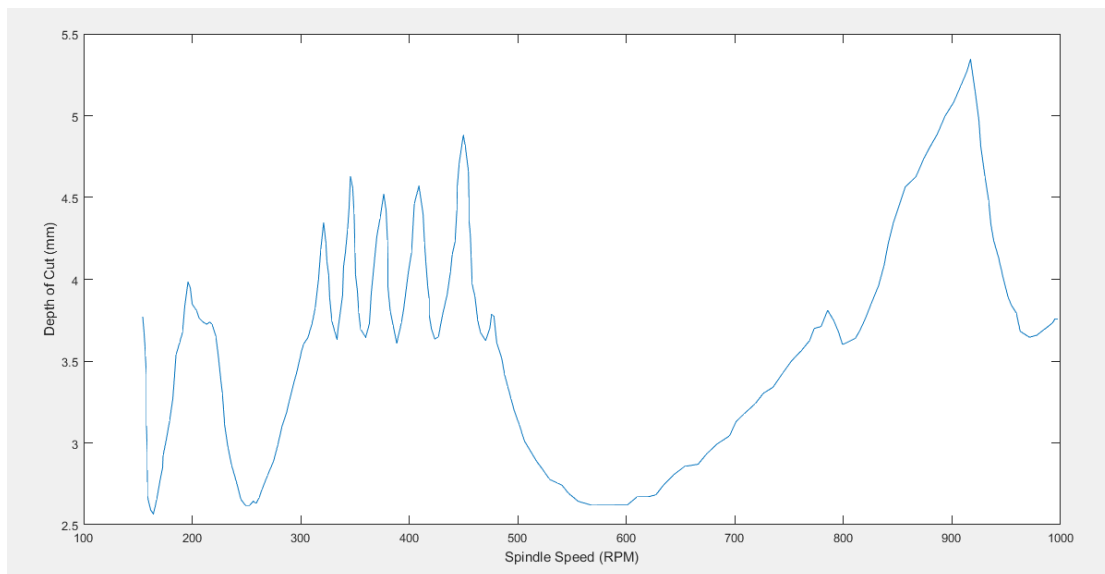
✓ **Βαθμός απόδοσης εργαλειομηχανής (η):** Η τιμές του βαθμού απόδοσης κυμαίνονται στο διάστημα 0.95 – 1. Επιλέχθηκε $\eta = 0.97$ κυρίως λόγω της παλαιότητας της μηχανής.

Η μέγιστη ισχύς της εργαλειομηχανής είναι 22 kW. Ο περιορισμός της ισχύος μπορεί επομένως να εκφραστεί με τον παρακάτω τρόπο:

$$P_c \leq P_{max} \leftrightarrow P_c - 22 \leq 0$$

➤ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΒΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο της θεωρίας, ένας τρόπος ελέγχου των συνθηκών κοπής προκειμένου να αποφευχθεί η έναρξη αυτοδιεγερούμενης ταλάντωσης είναι το διάγραμμα λοβών ευστάθειας. Μέσω αυτού, δίνεται η δυνατότητα περιορισμού του βάθους κοπής (b) και της ταχύτητας περιστροφής (n), άρα και της ταχύτητας κοπής (V_c). Λόγω της αδυναμίας διεξαγωγής πειράματος στην εργαλειομηχανή της εταιρείας ώστε να προκύψουν η συνάρτηση μεταφοράς και οι συχνότητες εμφάνισης ταλαντώσεων, αναζητήθηκε στο διαδίκτυο πείραμα σε αντίστοιχη εργαλειομηχανή. Στην ιστοσελίδα SVCommunity.com βρέθηκε η παρουσίαση διεξαγωγής πειράματος σε εργαλειομηχανή παρόμοιων χαρακτηριστικών με την MAHO MH 1000S. Η μηχανή είναι ισχύος 22 kW, με εύρος στροφών έως 6000 RPM. Με την εκτέλεση του πειράματος προέκυψε το εξής διάγραμμα λοβών:



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα Λοβών Ευστάθειας

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PlotDigitizer, επιλέχθηκαν συνολικά 230 σημεία πάνω στην καμπύλη για να την εκπροσωπήσουν. Τα σημεία αυτά εισέρχονται στο MATLAB υπό τη μορφή πίνακα. Θα πρέπει επομένως ο αλγόριθμος να επιβεβαιώνει ότι για κάθε ταχύτητα κοπής που εξετάζει, το αντίστοιχο βάθος κοπής δεν ξεπερνά το λοβό ευστάθειας και ότι η λύση του προβλήματος παραμένει εντός της ευσταθούς περιοχής. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί εύκολα ως εξής:

Για κάθε ταχύτητα περιστροφής που «τρέχει» ο γενετικός αλγόριθμος, βρίσκονται, μέσω του πίνακα, τα εκατέρωθεν σημεία της. Στα εκατέρωθεν σημεία αντιστοιχούν δύο βάθη κοπής. Επομένως, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τριών σημείων μπορεί να υπολογισθεί το κρίσιμο βάθος κοπής για την ταχύτητα που εξετάζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{b_{lim} - b_{limp}}{V_c - V_{cp}} = \frac{b_{limn} - b_{limp}}{V_{cn} - V_{cp}}$$

Όπου: b_{lim} , b_{limp} , b_{limn} : το ζητούμενο, το προηγούμενο και το επόμενο κρίσιμο βάθος κοπής αντίστοιχα.

V_c , V_{cp} , V_{cn} : η εξεταζόμενη, η προηγούμενη και η επομένη ταχύτητα κοπής αντίστοιχα.

➤ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η γενική ανοχή που ορίζεται από το μηχανολογικό σχέδιο για το συγκεκριμένο τεμάχιο είναι Rz 100. Μετατρέποντας το Rz σε Ra με λόγο 4:1, προκύπτει Ra 25 mm.

Η τραχύτητα της επιφάνειας διακρίθηκε σε δύο παράγοντες:

- ❖ Τραχύτητα πλευρικών τοιχωμάτων (περιφερικό φραιζάρισμα)
- ❖ Τραχύτητα οριζόντιων επιφανειών (μετωπικό φραιζάρισμα)

Καθώς η κατεργασία η οποία εξετάζουμε είναι κατεργασία εκχόνδρισης, η τραχύτητα της επιφάνειας των πλευρικών τοιχωμάτων δεν παίζει κάποιον ιδιαίτερο ρόλο, ιδιαίτερα εφόσον αφήνονται 15 mm υλικού για ημι-εκχόνδριση και φινίρισμα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα προσεκτικής προσέγγισης στα επόμενα στάδια. Ορίζεται λοιπόν ένας περιορισμός τριπλάσιας τάξης τραχύτητας από αυτήν της γενικής ανοχής για τα πλευρικά τοιχώματα, προκειμένου να μην υπάρξουν μεγάλες επιφανειακές ανωμαλίες που θα οφείλονται στις πολύ υψηλές συνθήκες κοπής. Για τον υπολογισμό της τραχύτητας των πλευρικών τοιχωμάτων χρησιμοποιήθηκε η Σχέση (8).

Η απόσταση που αφήνεται για φινίρισμα κατά ύψος εν αντιθέσει, είναι 1 mm . Η γεωμετρία όμως του ένθετου πλακιδίου της κεφαλής φραιζαρίσματος, το οποίο φέρει κάθετα τοιχώματα όπως παρουσιάστηκε στην *Εικόνα 4.9*, μηδενίζει τις γωνίες κ και κ' της Σχέσης (7), με αποτέλεσμα μηδενική τραχύτητα στην οριζόντια επιφάνεια.

Ο περιορισμός της τραχύτητας μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$R_{max/wall} - 3 \cdot R_a \leq 0$$

➤ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Για κάθε κοπτικό εργαλείο, ο κατασκευαστής του προτείνει αναλόγως το υλικό του τεμαχίου και το είδος της κατεργασίας, συνιστάμενες ελάχιστες και μέγιστες συνθήκες κοπής για το εκάστοτε κοπτικό εργαλείο. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Walter η οποία για κράματα μολυβδενίου συστήνει τις εξής συνθήκες κοπής:

$$f_z(mm/tooth) \leq 0.12$$

$$70 \leq V_c(mm/min) \leq 150$$

$$0 \leq b (mm) \leq 5$$

Ως κατώτατα όρια για την πρόωση ανά οδόντα και για το βάθος κοπής, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δόθηκαν από το μηχανουργείο.

$$0.052 \leq f_z(mm/tooth) \leq 0.12$$

$$2 \leq b (mm) \leq 5$$

6.4.ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΕΙΡΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Το λογισμικό MATLAB διαθέτει εργαλεία βελτιστοποίησης, με ένα από αυτά να είναι ο γενετικός αλγόριθμος μονού στόχου. Έχοντας ήδη ορίσει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αλλά και τους περιορισμούς που τη διέπουν, το τελευταίο βήμα πριν το «τρέξιμο» του αλγορίθμου είναι ο ορισμός των χειριστών λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου. Στην εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης του MATLAB ορίστηκαν οι παρακάτω χειριστές:

- Population:
 - Population Type: Double Vector
 - Population Size: 50 για 5 ή λιγότερες μεταβλητές
 - Creation Function: Constraint Dependent
- Fitness:
 - Fitness Scaling: Proportional
- Selection:
 - Selection Function: Tournament
 - Tournament Size:4
- Reproduction:
 - Elite Count: $0.05 \cdot \text{Population Size}$
 - Crossover Fraction: 0.6
- Mutation:
 - Mutation Function: Adaptive Feasible
- Crossover:
 - Crossover Function: Constraint Dependent
- Migration:
 - Direction: Forward
 - Fraction: 0.2
- Constraint Parameters:
 - Nonlinear constraint algorithm: Penalty

6.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

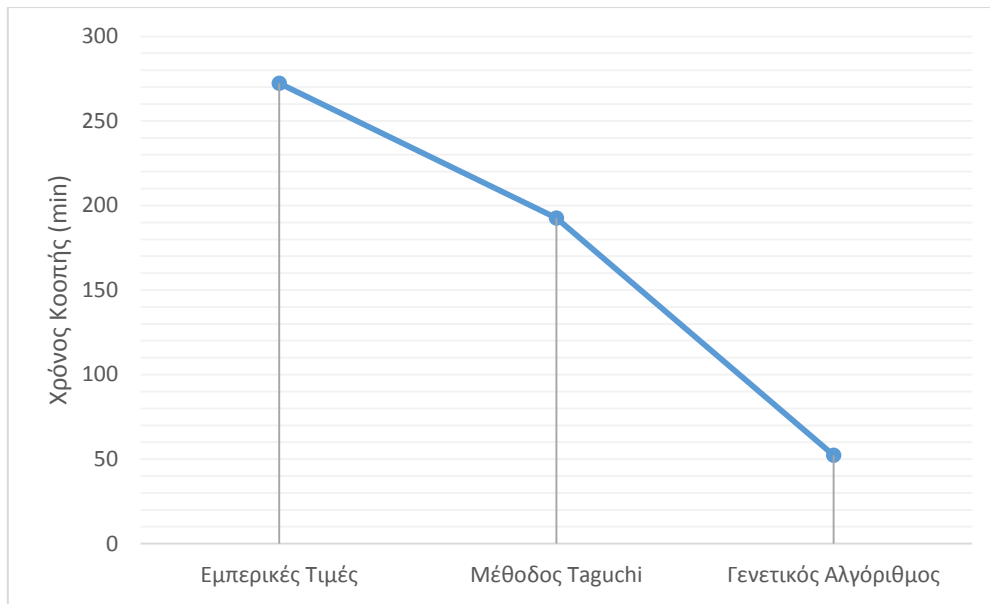
Ο γενετικός αλγόριθμος πέτυχε τη βελτιστοποίηση της συνάρτησης του χρόνου ως προς τις τρεις συνθήκες κοπής που ορίστηκαν. Σε πρώτο στάδιο, η βελτιστοποίηση έγινε χωρίς να ληφθεί υπόψιν το διάγραμμα των λοβών ευστάθειας. Ο αλγόριθμος επέστρεψε τις βέλτιστες τιμές των παραγόντων, αλλά και την ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης:

Ταχύτητα Κοπής $V_{c,opt}$ (m/min)	147.2084	Βέλτιστος Χρόνος Κοπής $T_{c,opt}$ (min)	43.5149
Πρόωση ανά Οδόντα $f_{z,opt}$ (mm/tooth)	0.1176		
Βάθος Κοπής b_{opt} (mm)	4.5569		

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος ελέγχει εάν το ζεύγος $V_{c,opt} - b_{opt}$ ανήκει στην ευσταθή ζώνη του διαγράμματος των λοβών ευστάθειας και εκτελεί διορθωτικές ενέργειες.

Ταχύτητα Κοπής $V_{c,opt}$ (m/min)	147.2084	Βέλτιστος Χρόνος Κοπής $T_{c,opt}$ (min)	52.2172
Πρόωση ανά Οδόντα $f_{z,opt}$ (mm/tooth)	0.1176		
Βάθος Κοπής b_{opt} (mm)	3.5410		

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα της μεταβολής του χρόνου κοπής- από την τιμή του με τις εμπειρικές συνθήκες κοπής, στην τιμή του μετά τον γενετικό αλγόριθμο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ

7.1 ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός της κατεργασίας ενός τεμαχίου από το μηδέν. Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου του σχεδιασμού σε CAM, μια μικρή ανάλυση των χρόνων κοπής έδειξε ότι ο σχεδιασμός χρήζει βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος Taguchi αποδείχθηκε για μια ακόμη φορά ένα σπουδαίο εργαλείο οργάνωσης, μελέτης και βελτιστοποίησης ενός προβλήματος. Ο μεγάλος βαθμός σπουδαιότητας του βάθους κοπής που προέκυψε από τη μέθοδο, είναι λογικός καθώς η μεταβολή του βάθους κοπής σημαίνει και μεταβολή του αριθμού των πάσσων, που σε κάθε ένα από αυτά ξοδεύεται αρκετός χρόνος, μειώνοντας την παραγωγικότητα. Παρατηρήθηκε επίσης, στα πλαίσια των εξόδων των πειραμάτων της μεθόδου Taguchi, ότι υπό το πρίσμα του καθαρού χρόνου κοπής, είναι συμφέρουσα η χρήση μεγαλύτερης διαμέτρου με λιγότερο αφαιρούμενο όγκο. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν τον παραπάνω όγκο που κατεργάζεται η μικρότερη διάμετρος, ως λιγότερο χρόνο που θα καταναλωθεί κατά τη διάρκεια του φινιρίσματος, είναι τελικά συμφέρον να χρησιμοποιηθεί το κοπτικό εργαλείο μικρότερης διαμέτρου.

Ο γενετικός αλγόριθμος από την άλλη πλευρά, κατάφερε την βελτιστοποίηση του χρόνου κοπής χωρίς να δώσει τις μέγιστες από τους κατασκευαστές τιμές και για τις τρεις ταυτόχρονα συνθήκες κοπής. Γίνεται επίσης φανερό, το πόσο ιδιαίζουσας σημασίας είναι η γνώση της δυναμικής της εκάστοτε εργαλειομηχανής, στο σωστό σχεδιασμό μιας κατεργασίας.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Λόγω της αδυναμίας εκτέλεσης πειραματικών κοπών ώστε να παρθούν μετρήσεις όσον αφορά το πεδίο των δυνάμεων που ασκούνται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας τεμαχίου 42CrMo4 από την εργαλειομηχανή του μηχανουργείου, από την παρούσα εργασία απουσιάζει ο κατά τα άλλα συνήθης περιορισμός της μέγιστης δύναμης κοπής. Είναι βεβαίως γνωστό, ότι η εισαγωγή των δυνάμεων στους περιορισμούς του γενετικού αλγορίθμου, θα άλλαζε σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα του. Προτείνεται λοιπόν, η πληρέστερη μελέτη του θέματος λαμβάνοντας υπόψιν και το πεδίο των δυνάμεων.

Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση με τη μέθοδο Taguchi, όλα τα πειράματα διεξήχθησαν σε περιβάλλον software. Αυτό γίνεται αφενός για να βελτιστοποιηθούν οι παράγοντες που εξετάζονται πριν την έναρξη της παραγωγής, αφετέρου για την αποφυγή του κόστους των πραγματικών πειραμάτων. Θα μπορούσε να γίνει λοιπόν μια αντίστοιχη βελτιστοποίηση έχοντας ως εξόδους πραγματικούς χρόνους κοπής. Αυτό σίγουρα θα συνεισφέρει στην επακριβώς βελτιστοποίηση του φαινομένου, αλλά και θα επαληθεύσει τη δυνατότητα φιλτραρίσματος για τους θορύβους (όπως ο ανθρώπινος παράγοντας) που διαθέτει η μέθοδος Taguchi.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο κεφάλαιο του παραρτήματος δίνονται αναλυτικά οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό και την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB

Κώδικας Α': Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης

```
function [Tc]=ObjFun(x)

% Tc= Cutting Time (sec)
% x(1)=fz :Feed per tooth (mm/tooth)
% x(2)=Vc :Cutting Speed (m/min)
% x(3)=b :Axial Depth of cut

L=4567.34; % Length of toolpath for one pass (mm)
D=63; % Cutter's Diameter (mm)
btot=20; % Total pocket's depth (mm)
z=6; % Number of cutting teeth

%Cutting Time
Tc=(pi*L*D)*(fix(btot/x(3))+1)/(1000*z*x(2)*x(1));

%i=btot/x(3) number of total passes needed
end
```

Κώδικας Β': Ορισμός περιορισμών

```
function [c,c_eq]=Cons(x)

% x(1)=fz :Feed per tooth (mm/tooth)
% x(2)=Vc :Cutting Speed (m/min)
% x(3)=b :Axial Depth of cut

%Cutting Power
D=63; % Cutter's Diameter (mm)
B=0.465*D; % Overlap (%*D)
Kc=-8003.1*x(1)^3+10127*x(1)^2-5119.2*x(1)+2953.2;% Special Cutting
Force (N/mm^2)
N=0.97; % Machine's Efficiency Coefficient
Pmax=22; % Machine's Horse Power (kW)
z=6; % Number of teeth

Pc=((x(3)*B*Kc)*(z*x(1)*x(2)*1000/(pi*D)))/(N*60*10^6);
```

```

%Surface Roughness
Raw=0.025; % Wall Surface Roughness Tolerance (mm)

%Wall Surface Roughness
Rmaxw=(250*x(1)^2)/(4*D);

%Non Linear Constraints
c=[Pc-Pmax; Rmaxw-Raw;];
c_eq=[];

```

Κώδικας Γ': Κυρίως Αλγόριθμος

```

clear all
close all
clc

data=xlsread('Points');
ss=data(:,1); % Spindle Speed
blim=data(:,2); % Critical Depth of Cut
D=63; % Cutter's Diameter
V=ss*pi*D/1000; % Cutting Speed

ObjFcn=@ObjFun;
nvars=3;
LB=[0.052 70 2];
UB=[0.12 150 5];
ConsFcn=@Cons;
load('Myoptions.mat')
optimtool(options)
[x,fval]=ga(ObjFcn,nvars,[],[],[],[],LB,UB,ConsFcn);

% Stability Lobes Correction
for i=1:229
    if (x(2)>= V(i)) && (x(2)<= V(i+1))
        bl=(blim(i+1)-blim(i))/(V(i+1)-V(i))*(x(2)-V(i))+blim(i);
        if x(3)>bl
            x(3)=bl;
            'Your selected depth of cut is beyond the stability
area'
        end
    end
end
x,fval

```

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Altıntaş, Y. and Budak, E. (1995). Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP*, 44, 357-362.
- [2] Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R. and Prabhakaran, G. (2005). Optimization of machining parameters for milling operations using non-conventional methods. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 25, 1078–1088.
- [3] Davim, P. (2012). *Intelligent Optimisation of 3-Axis Sculptured Surface Machining on Existing CAM Systems*, G.-C. Vosniakos, P.G. Benardos and A. Krimpenis, *Machining of complex sculptured surfaces*. (157-190), London: Springer.
- [4] Quintana, G., Ciurana, J. and Teixidor, D. (2008). A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1637- 1645.
- [5] Kramer, O. (2017). *Genetic algorithm essentials*. Switzerland: Springer.
- [6] Mitchell, M. (1999). *An introduction to genetic algorithms*. Massachusetts: M.I.T press.
- [7] Phadke, M. (1989). *Quality engineering using robust design*. New Jersey: At & bell laboratories.
- [8] Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. U.S.A: Society of Manufacturing Engineers (S.M.E)
- [9] Shunmugam, M.S., Bhaskara Reddy, S.V. and Narendran, T.T. (2000). Selection of optimal conditions in multi-pass face-milling using a genetic algorithm. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 401–414.
- [10] Sukumar, M. S., Venkata Ramaiah, P. and Nagarjuna, A. (2014). Optimization and prediction of parameters in face milling of Al-6061 using Taguchi and ANN approach. *Procedia Engineering*, 97, 365 – 371.
- [11] Tandon, V., El-Mounayri, H. and Kishawy, H. (2002). NC end milling optimization using evolutionary computation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 595–605.

- [12]Thakre, A. (2013). Optimization of milling parameters for minimizing surface roughness using Taguchi's approach.. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3, 226-230.
- [13]Vosniakos, G-C., Gkortza, A. and Kontolatis, N. (2016) .Toolpath strategy decisions in 'rough machining-by-region' using design of experiments on computer-aided manufacturing systems, Int. J. Manufacturing Research, Vol. 11, No. 1, 68–88.
- [14]Vosniakos, G.S., Kalattas, A. and Siasos, A. (2017). Optimal process planning for helical bevel gears using Taguchi design of simulated machining experiments. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, 1–14.
- [15]Αντωνιάδης , Α. (2001). Μηχανουργική τεχνολογία, Τόμος Β': Κατεργασίες κοπής. Θεσσαλονίκη : Τζιόλα.
- [16]Πετρόπουλου, Π. (1998). Μηχανουργική τεχνολογία ,Τόμος ΙΙ-1 :Τεχνολογία κατεργασιών κοπής των μετάλλων. Θεσσαλονίκη : Ζήτη.
- [17]Σοφιάκης, Κ.(2016).Πειραματικός προσδιορισμός διαγραμμάτων ευστάθειας στο φραιζάρισμα. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.