

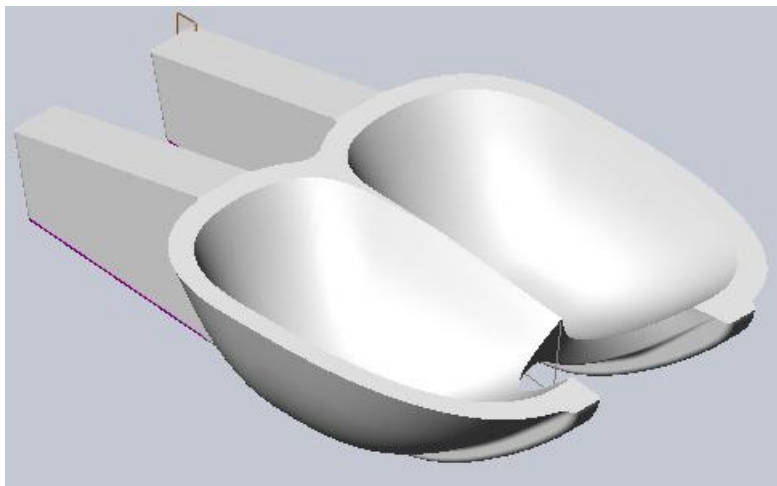


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Σχεδιασμός της κοπής σκαφιδίου υδροστροβίλου
Pelton σε σύστημα CAM”**



ΑΣΗΜΙΝΑ ΓΚΟΡΤΖΑ

Επιβλέπων

Αναπλ. Καθηγητής Γ.-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΗΣ 2010

ΑΘΗΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Βοσνιάκο για τις χρήσιμες συμβουλές του και τη συνεχή καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κοντολάτη, του η οποίου η βοήθεια αποδείχθηκε καταλυτική για την διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής της κοπής σε μηχανή CNC ενός σκαφιδίου υδροστροβίλου Pelton. Η βελτιστοποίηση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας καθώς και στη μεγιστοποίηση της ποιότητας της επιφάνειας δηλαδή ελαχιστοποίηση του όγκου του υλικού που απομένει. Εξετάζονται με επαρκή δειγματοληψία, όπως εξασφαλίζεται από το σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi, τα δυνατά σενάρια κοπής του τεμαχίου. Γίνεται προσομοίωση της κοπής μέσω του προγράμματος SolidCam, ώστε να λαμβάνονται τα αποτελέσματα χωρίς να χρησιμοποιηθεί η εργαλειομηχανή και, παρόλα αυτά, εφαρμόζοντας πραγματικές συνθήκες κοπής. Επιλέγονται τα εργαλεία κοπής καθώς και οι συνθήκες κοπής.

Για μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια της βελτιστοποίησης το σκαφίδιο χωρίστηκε σε έντεκα τμήματα έτσι ώστε να επεξεργαστεί το κάθε ένα ξεχωριστά. Κριτήριο του διαχωρισμού ήταν η γεωμετρία της κάθε περιοχής. Εξετάζεται τόσο η εκχόνδριση όσο και η αποπεράτωση του κάθε τμήματος καθώς αναλύονται οι στρατηγικές κοπής αυτών. Επιλέγονται οι παράγοντες και τα επίπεδα των παραγόντων που τοποθετούνται σε ορθογώνιους πίνακες DoE και επηρεάζουν την κοπή σε κάθε μία από τις δύο φάσεις της κοπής. Αφότου ολοκληρωθεί η συλλογή των μετρήσεων-αποτελεσμάτων εφαρμόζεται η μέθοδος της ανάλυσης της διακύμανσης (Analysis of variance - ANOVA) για την ανάλυση των δεδομένων. Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να αναλύσει την συνολική μεταβλητότητα που παρατηρείται στα αποτελέσματα σε επιμέρους, ανεξάρτητες, συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές αποδίδονται στο ένα ή το άλλο αίτιο προκειμένου στη συνέχεια να εξεταστεί πόσο σημαντικό είναι το αίτιο αυτό.

Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση κοπής χρησιμοποιείται η συνάρτηση ποιότητας. Στην εκχόνδριση δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής ενώ στην αποπεράτωση στον εναπομείναντα όγκο του υλικού. Έτσι, χρησιμοποιείται διαφορετική συνάρτηση ποιότητας ανάλογα με την φάση της κοπής. Εφαρμόζοντας τις βέλτιστες στρατηγικές κοπής σε κάθε περιοχή

προκύπτει ο συνολικός χρόνος κοπής του τεμαχίου και ο όγκος του υλικού που απομένει.

Ολοκληρώνοντας τη σειρά των πειραμάτων και αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι εφαρμόζοντας τις μεθόδους Taguchi-DoE και ANOVA στο τεμάχιο όχι ως σύνολο αλλά στις επιμέρους περιοχές που το συναποτελούν μπορεί να επιτευχθεί μείωση του συνολικού χρόνου της κατεργασίας και βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας.

Abstract

This thesis aims to optimise the machining strategy for a Pelton hydro-turbine bucket-blade on a CAM system. Optimization refers to minimizing the machining time and the remaining volume of the material thus maximizing the quality of the surface. Possible scenarios are examined with sufficient sampling, as guaranteed by the design of experiments according to Taguchi method, for machining the workpiece. Simulation of real cutting conditions is implemented using the program SolidCam including selection of cutting tools and cutting conditions.

For the sake of both ease and accuracy of the optimisation the bucket-blade is divided into eleven regions in order to process each one separately. The criterion of separation was the geometry of each part. Both roughing and finishing of each part are examined, as well as the machining strategies for each part. The factors and their levels that influence the machining are selected in roughing and finishing of each region. After completion of the collection of simulation results, the method of analysis of variance (Analysis of variance - ANOVA) is implemented for data analysis. The main objective of ANOVA is to analyze the total variability observed in the results, in individual, independent components. These components are attributed to specific reasons in order to judge their importance.

To find the optimal machining solution the penalty function is used. In the roughing process greater importance is given to machining time while in the finishing process the remaining volume is more important. Hence, a different penalty function is used for each phase. Applying the best machining strategy in each region of the bucket-blend results in the total machining time and the remaining volume.

Overall, it was demonstrated that by applying Taguchi-DoE and ANOVA techniques not to the whole workpiece but to each one of its constituent regions individually reduces machining time and improves finished surface quality.

Σύνοψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την βελτιστοποίηση της στρατηγικής κοπής σε μηχανή CNC ενός σκαφιδίου υδροστροβίλου Pelton. Η βελτιστοποίηση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας και στη μεγιστοποίηση της ποιότητας της επιφάνειας.

Για το σχεδιασμό της κοπής έπρεπε να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με την επιλογή των εργαλείων κοπής, των συνθηκών κοπής και του τύπου της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου.

Εξετάζονται με επαρκή δειγματοληψία, όπως εξασφαλίζεται από το σχεδιασμό κατά Taguchi, τα δυνατά σενάρια κοπής του τεμαχίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια προγράμματος CAM, του SolidCam χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες (ισχύς, ταχύτητα περιστροφής κλπ) της εργαλειομηχανής CNC (εν προκειμένω κέντρο κατεργασιών OKUMA MX-45VAE που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.), δηλαδή εφαρμόζονται πραγματικές συνθήκες κοπής.

Στο πρόγραμμα CAM γίνεται προσομοίωση της κοπής, ώστε να λαμβάνονται τα αποτελέσματα χωρίς να χρησιμοποιηθεί η εργαλειομηχανή. Τα δεδομένα που θα συλλεχθούν θα επεξεργαστούν έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη στρατηγική κοπής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κοπής προκύπτουν από την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας (analysis of variance - ANOVA).

Η προσέγγιση Taguchi στον πειραματικό σχεδιασμό αποτελεί στην ουσία μια τυποποιημένη μέθοδο κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού η οποία χρησιμοποιεί έτοιμες, ως επί το πλείστον, ορθογώνιες διατάξεις για την αντιμετώπιση ενός μεγάλου αριθμού πειραματικών αναγκών ενώ ταυτόχρονα υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο τα πειραματικά αποτελέσματα πρέπει να αναλυθούν. Η διεξαγωγή της πειραματικής μελέτης πραγματοποιείται σε οκτώ βήματα, στάδια ή φάσεις:

1. *Ορισμός του προβλήματος:* Αφορά στο καθορισμό των πληροφοριών που καλείται να δώσει το πείραμα, στον καθορισμό δηλαδή των στόχων του πειράματος.

2. *Αντικειμενικός σκοπός:* Καθορισμός χαρακτηριστικών εκροής (επιδόσεων) που πρέπει να μελετηθούν, και με ποιο τρόπο θα γίνουν οι μετρήσεις.
3. *Ορισμός παραγόντων και επιπέδων:* Ο σκοπός του σταδίου είναι να υπάρξει ένας καταγιγισμός ιδεών σχετικά με το ποιοι παράγοντες πιθανόν να επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος και ποιο είναι το εύρος των τιμών των παραγόντων αυτών που θα εξεταστεί. Πόσα και ποια επίπεδα πρέπει να μελετηθούν;
4. *Σχεδιασμός πειράματος:* Αφορά στην επιλογή ή κατάστρωση του καταλληλότερου σχεδιασμού (ορθογώνιας διάταξης) για την διεξαγωγή του πειράματος και στην τοποθέτηση των παραγόντων και αλληλεπιδράσεων προς μελέτη στις στήλες του.
5. *Διεξαγωγή δοκιμών:* Αφορά στο καθαρά πρακτικό κομμάτι της εκτέλεσης των δοκιμών και της συλλογής των μετρήσεων.
6. *Ανάλυση δεδομένων:* Αφορά στη χρήση κατάλληλων στατιστικών τεχνικών για την εξαγωγή συμπερασμάτων και στον υπολογισμό των μέτρων (TPM και NPM) κάθε δοκιμής.
7. *Ερμηνεία αποτελεσμάτων:* Αφορά στον προσδιορισμό των παραγόντων ελέγχου της μεταβλητότητας και των παραγόντων ελέγχου του στόχου. Στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών και οι προβλέψεις της απόδοσης του συστήματος υπό τις βέλτιστες συνθήκες.
8. *Επαλήθευση συμπερασμάτων:* Το στάδιο αυτό αφορά στη διεξαγωγή κάποιων επιπρόσθετων δοκιμών προκειμένου να ελεγχθούν οι προβλέψεις του προηγούμενου σταδίου και να επιβεβαιωθούν τα συμπεράσματα της μεθόδου.

Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή των μετρήσεων-αποτελεσμάτων, απαιτείται μια τυποποιημένη μέθοδος για να τα αναλύσει στατιστικά. Μια από τις πλέον σημαντικές και ισχυρές μεθόδους για την ανάλυση των δεδομένων είναι η μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (Analysis of variance) ή εν συντομία ANOVA.

Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να αναλύσει την συνολική μεταβλητότητα που παρατηρείται στα αποτελέσματα σε επιμέρους, ανεξάρτητες, συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές αποδίδονται στο ένα ή το άλλο αίτιο προκειμένου στη συνέχεια να εξεταστεί πόσο σημαντικό είναι το αίτιο αυτό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι συνιστώσες αυτές αντιστοιχούν-

αποδίδονται στις επιδράσεις των παραγόντων καθώς και στην χαρακτηριζόμενη «τυχαία διασπορά» . Με τον όρο τυχαία διασπορά ή υπόλοιπο ή σφάλμα ορίζεται το μέγεθος της διασποράς που θα υπήρχε στα αποτελέσματα αν κανένας από τους εξεταζόμενους παράγοντες δεν τα επηρέαζε . Συνεπώς, ο όρος αυτός αντιστοιχεί στην *ανεξήγητη διακύμανση* των αποτελεσμάτων σε αντίθεση με την *εξηγούμενη διακύμανση* που προκαλείται από τους εξεταζόμενους παράγοντες και αλληλεπιδράσεις. Η ανεξήγητη διακύμανση συμπεριλαμβάνει το πειραματικό σφάλμα, την επίδραση εξω-πειραματικών παραγόντων και παραγόντων του πειράματος που κρίθηκαν ασήμαντοι.

Για μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια στη βελτιστοποίηση το σκαφίδιο χωρίστηκε σε έντεκα τμήματα έτσι ώστε να επεξεργαστεί το κάθε ένα ξεχωριστά και ονομάστηκαν εμπειρικά. Αναλυτικότερα, το τμήμα 1 και 2 αποτελεί το πάνω μέρος των “δοντιών”, το τμήμα 3 και 4 το κάτω μέρος των “δοντιών”, το τμήμα 5 και 6 το κυρτό μέρος των “κουταλιών”, το τμήμα 7 το αριστερό κοίλο του “κουταλιού”, το τμήμα 8 το δεξί κοίλο του “κουταλιού”, το τμήμα 9 την περιοχή ανάμεσα στα κοίλα μέρη του κουταλιού και το τμήμα 20 και 11 τις “καρίνες”.

Σε κάθε περιοχή μελετήθηκε ξεχωριστά η εκχόνδριση και η αποπεράτωση του τεμαχίου. Κατά τη διαδικασία της εκχόνδρισης αφαιρείται από το τεμάχιο βασικός όγκος υλικού και δίνεται στο τεμάχιο η πρώτη του μορφή. Στην διαδικασία της αποπεράτωσης το τεμάχιο αποκτά την τελική του μορφή δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις καθώς και την ποιότητα στην επιφάνεια.

Λόγω της συμμετρίας αρκετών τμημάτων δεν διεξήχθησαν πειράματα για όλα τα τμήματα. Συνεπώς τα τμήματα για τα οποία έχει σχεδιαστεί η κοπή είναι τα: 1, 3, 5, 7, 9, 10. Στα υπόλοιπα τμήματα εφαρμόζεται η βέλτιστη στρατηγική που έχει προκύψει για το αντίστοιχο συμμετρικό τους τμήμα.

Η εκχόνδριση του τεμαχίου μπορεί να γίνει με δύο στρατηγικές. Η μία στρατηγική είναι η *Hatch* και η άλλη η *Contour*. Η στρατηγική *Hatch* δημιουργεί μία γραμμική πορεία στο εργαλείο ενώ η στρατηγική *Contour* δίνει στο σύστημα CAM τη δυνατότητα να παράγει ποκέτες σε διάφορα Z-επίπεδα (Constant-Z).

Οι σημαντικότερες μέθοδοι αποπεράτωσης που θα χρησιμοποιήθηκαν για το σκαφίδιο είναι η *Linear*, η *Constant-Z* και η *Constant StepOver*. Στη στρατηγική *Linear* δημιουργείται ένα γραμμικό πρότυπο το οποίο εφαρμόζεται στο τρισδιάστατο μοντέλο. Στη στρατηγική *Constant-Z* παράγεται πολύ υψηλής ποιότητας φινίρισμα ειδικά σε απότομες επιφάνειες και ελαχιστοποιείται η πλήρης κίνηση στους τρεις άξονες η οποία επιβραδύνει τις μεγάλες μηχανές και τους ελεγκτές. Στην στρατηγική *Constant StepOver* δημιουργείται ένα δισδιάστατο βήμα στο εργαλείο, με σταθερή παράλληλη μετατόπιση (*StepOver*), πάνω σε ένα επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο ΧΥ του τρέχοντος συστήματος συντεταγμένων. Αυτό το δισδιάστατο βήμα του εργαλείου στη συνέχεια εφαρμόζεται στο τρισδιάστατο μοντέλο και έτσι δημιουργείται το τρισδιάστατο βήμα του εργαλείου. Στην αποπεράτωση κάθε τμήματος δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι, αλλά μόνο αυτές που έχει διαπιστωθεί ότι επηρεάζουν περισσότερο την κοπή ως προς τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει.

Για τις διαφορετικές μεθόδους της εκχόνδρισης και της αποπεράτωσης αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή καθώς και τα επίπεδα αυτών. Λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του κάθε τμήματος, οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή δεν θα είναι ίδιοι για κάθε τμήμα – περιοχή προς κατεργασία.

Ο καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων είναι μία διαδικασία σημαντική και χρονοβόρα. Προηγήθηκαν πολλές μετρήσεις και πειράματα προκειμένου να καθοριστούν οι οριακές και μη τιμές που συμβάλλουν καθοριστικά στον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει.

Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση κοπής χρησιμοποιείται η συνάρτηση ποιικής. Στην εκχόνδριση έχει μεγαλύτερη βαρύτητα ο χρόνος κοπής ενώ στην αποπεράτωση ο όγκος του υλικού που απομένει. Έτσι, χρησιμοποιείται διαφορετική συνάρτηση ποιικής ανάλογα με την φάση της κοπής.

Εφαρμόζοντας τις βέλτιστες στρατηγικές κοπής σε κάθε περιοχή προκύπτει ο συνολικός χρόνος κοπής του τεμαχίου και ο όγκος του υλικού που απομένει για ολόκληρο το τεμάχιο.

Ολοκληρώνοντας τη σειρά των πειραμάτων και αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι εφαρμόζοντας τις μεθόδους *Taguchi-DoE* και *ANOVA* στο

τεμάχιο όχι ως σύνολο αλλά στις επιμέρους περιοχές που το συναποτελούν μπορεί να επιτευχθεί μείωση του συνολικού χρόνου της κατεργασίας και βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας

Οι χρόνοι που εμφανίζονται στην παρούσα εργασία προκύπτουν από αυστηρές μαθηματικές σχέσεις χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους αποκίσεις από το ιδανικό που εμφανίζονται σε μια πραγματική εργαλειομηχανή. Έτσι, οι χρόνοι αυτοί δίνουν μια πολύ καλή εικόνα του χρόνου κατεργασίας, χωρίς να είναι απόλυτοι. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην διπλωματική εργασία (πίνακες, διαγράμματα, κλπ.) αφορούν την κατεργασία του συγκεκριμένου τεμαχίου, αλλά η μεθοδολογία είναι εφαρμόσιμη σε κάθε άλλο μηχανουργικό κομμάτι.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	15
Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά και συνθήκες κοπής	17
3.1 Κοπτικά εργαλεία	17
3.2 Βασικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής CNC	19
3.3 Επιλογή κοπτικών εργαλείων και συνθηκών κοπής από τους καταλόγους.....	20
3.4 Στερέωση Αντικειμένου	23
3.5 Το λογισμικό SolidCAM	24
Κεφάλαιο 4: Αρχές Σχεδιασμού των Πειραμάτων	26
4.1 Γενικά.....	26
4.2 Μεθοδολογία Διεξαγωγής Πειραμάτων	26
4.2.1 Μέθοδος της Καλύτερης Πρόβλεψης.....	27
4.2.2 Μέθοδος της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά	28
4.2.3 Μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης	29
4.2.4 Μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης	29
4.2.5 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων	30
4.3 Διαδικασία εφαρμογής του σχεδιασμού των πειραμάτων	32
4.4 Ορθογώνιοι πίνακες.....	33
4.4.1 Τύποι ορθογωνίων πινάκων.....	33
4.4.2 Τοποθέτηση παραγόντων και εντοπισμός αλληλεπιδράσεων	35
4.4.3 Ορθογώνιοι πίνακες μικτών επιπέδων	37
4.5 Διεξαγωγή των πειραμάτων	40
4.6 Πεδίο εφαρμογών – πλεονεκτήματα	42
4.7 Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων	43
Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός των πειραμάτων κοπής του σκαφιδίου.....	53
5.1 Γενικά.....	53
5.2 Διαχωρισμός τεμαχίου σε τμήματα	53
5.3 Διαδικασία εκχόνδρισης.....	54
5.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις στρατηγικές κοπής	55
5.4 Διαδικασία αποπεράτωσης	56
5.4.1 Στρατηγική Linear.....	57
5.4.2 Στρατηγική Constant – Z	58
5.5 Η μέθοδος Constant StepOver	59
Κεφάλαιο 6: Σχεδιασμός κοπής κάτω τμήματος δοντιού	60
6.1 Εκχόνδριση.....	60
6.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα	60
6.1.2 Εφαρμογή μεθόδου βελτιστοποίησης.....	63
6.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης.....	69
6.2 Αποπεράτωση	74
6.2.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα	74
6.2.2 Συνάρτηση ποιότητας.....	75

Κεφάλαιο 7: Σχεδιασμός κοπής του κυρτού τμήματος του κουταλιού.....	79
7.1 Εκχόνδριση.....	79
7.1.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα	79
7.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση.....	81
7.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης.....	86
7.2 Αποπεράτωση	89
7.2.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα	89
7.2.2 Συνάρτηση ποινής.....	92
7.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας για την αποπεράτωση.....	96
Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός κοπής του κοίλου τμήματος του κουταλιού	98
8.1 Εκχόνδριση.....	98
8.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα	98
8.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση.....	100
8.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης.....	105
8.2 Αποπεράτωση	108
8.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση.....	108
8.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση.....	109
Κεφάλαιο 9: Σχεδιασμός κοπής του κάτω τμήματος ανάμεσα στα κουτάλια	113
9.1 Εκχόνδριση.....	113
9.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα	113
9.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση.....	115
9.1.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την εκχόνδριση	120
9.2 Αποπεράτωση	123
9.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση.....	123
9.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση.....	124
Κεφάλαιο 10: Σχεδιασμός κοπής του τμήματος της καρίνας	128
10.1 Εκχόνδριση.....	128
10.1.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα	128
10.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση.....	130
10.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης.....	135
10.2 Αποπεράτωση	138
10.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση	138
10.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση.....	139
Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα	143
Βιβλιογραφία	145
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	146

Κεφάλαιο 1 **Εισαγωγή**

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της στρατηγικής κοπής σε μηχανή CNC ενός σκαφιδίου υδροστροβίλου. Η βελτιστοποίηση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας και στη μεγιστοποίηση της ποιότητας της επιφάνειας.

Για τον σχεδιασμό της κοπής πρέπει να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με:

- ❖ Επιλογή εργαλείων, πχ. κονδύλι, σφαιρικού άκρου, επίπεδου άκρου, φρεζοκεφαλή κλπ.
- ❖ Επιλογή συνθηκών κοπής, πχ. στροφές, πρόωση, βάθος κοπής, πλάτος κοπής, αριθμός πάσων κλπ.
- ❖ Επιλογή του τύπου της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, πχ. παράλληλης μετατόπισης, ζιγκ-ζαγκ, offset κλπ

Η γνώση και η επιλογή των παραμέτρων κοπής είναι σημαντικές για δύο λόγους:

- ❖ Μείωση του χρόνου κοπής στο ελάχιστο και
- ❖ Εξοικονόμηση πρώτης ύλης

Στη βιομηχανία οι παραπάνω παράγοντες παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στην αύξηση της παραγωγής, στη μείωση του κόστους ανά τεμάχιο και συνεπώς στη συνολική μείωση του κόστους. Ο προγραμματισμός μιας μηχανής CNC γίνεται είτε συμβατικά (κώδικας G) ή με τη βοήθεια H/Y με χρήση λογισμικού CAM.

Στο πλαίσιο της εργασίας που παρουσιάζεται στη συνέχεια εξετάζονται με επαρκή δειγματοληψία, όπως εξασφαλίζεται από το σχεδιασμό κατά Taguchi, τα δυνατά σενάρια κοπής του τεμαχίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια προγράμματος CAM χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες (ισχύς, ταχύτητα περιστροφής κλπ) της εργαλειομηχανής CNC της OKUMA μοντέλου MX-45VAE που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π, δηλαδή εφαρμόζονται πραγματικές συνθήκες κοπής.

Το πρόγραμμα CAM εκτελεί ακριβή προσομοίωση της κοπής διευκολύνοντάς μας στην όλη διαδικασία, καθώς μας δίνει τα αντίστοιχα

αποτελέσματα της κοπής χωρίς χρησιμοποιηθεί η εργαλειομηχανή. Κάθε φορά η ποιότητα των αποφάσεων ελέγχεται ως προς τον συνολικό χρόνο κοπής και την ποιότητα της επιφανείας του τεμαχίου.

Έχοντας καταγράψει τις μετρήσεις των διαφόρων πειραμάτων είναι πολύ σημαντικό να γίνει ανάλυση της ευαισθησίας αυτών, έτσι ώστε να βρεθούν οι πλέον σημαντικοί παράγοντες και το ποσοστό επιρροής τους συνολικά σε κάθε περίπτωση. Αυτή είναι η λεγόμενη ανάλυση ευαισθησίας.

Στη παρούσα διπλωματική εξετάζεται για το συγκεκριμένο τεμάχιο, δηλαδή το σκαφίδιο υδροστροβίλου, τόσο η εκχόνδριση όσο και η αποπεράτωση.

Κεφάλαιο 2 **Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

Το θέμα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού κοπής γλυπτής επιφάνειας σε σύστημα CAM έχει αποτελέσει αντικείμενο ενδιαφέροντος σε πολλές έρευνες. Σκοπός των ερευνών είναι η καλύτερη προσέγγιση στον σχεδιασμό της κοπής και ο προσδιορισμός του βέλτιστου τρόπου διεξαγωγής των πειραμάτων. Οι έρευνες προσανατολίζονται στον προσδιορισμό των περιοχών που πρέπει να κατεργαστούν, στην κατανομή των στρατηγικών του βήματος του εργαλείου σε κάθε μία από αυτές, καθώς και στην επιλογή των συνθηκών κοπής και του εργαλείου κοπής.

Σε μία από αυτές τις έρευνες [3] μελετήθηκε η κατεργασία κοπής ενός ιατρικού τεχνητού μοσχεύματος. Επιτεύχθηκε μείωση του αριθμού των παραμέτρων μέσω στατιστικών μεθόδων. Έγινε σχεδιασμός πειραμάτων μέσω της μεθόδου Taguchi καθώς και ανάλυση ευαισθησίας (ANOVA) για τον προσδιορισμό των σημαντικότερων παραμέτρων και της συμμετοχής αυτών στην κατεργασία. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων εφαρμόστηκε τόσο για την εκχόνδριση όσο και για την αποπεράτωση σε συγκεκριμένο λογισμικό CAM.

Οι J. Zhang, J. Chen και E. Kirby [4] παρουσιάζουν την εφαρμογή του σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi για την βελτιστοποίηση της ποιότητας της επιφάνειας μίας κατεργασίας μετωπικού φρεζαρίσματος σε μηχανή CNC. Οι παράγοντες που ελέγχθηκαν είναι η πρόωση, η ταχύτητα περιστροφής, το βάθος κοπής και η χρήση διάφορων εργαλείων με τις ίδιες προδιαγραφές. Χρησιμοποιήθηκε ορθογώνιος πίνακας $L_9(3^4)$ και έγινε ανάλυση ευαισθησίας ANOVA για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την τραχύτητα της επιφάνειας. Ο σχεδιασμός Taguchi ήταν επιτυχής για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας.

Ο Lin [5], πρότεινε μια τεχνική για μετωπικό φρεζάρισμα ανοξειδωτου χάλυβα βασισμένη στη μέθοδο Taguchi, με 'πολλαπλή εκτέλεση των χαρακτηριστικών'. Τρεις παράμετροι κοπής, η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος της κοπής βελτιστοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη την πολλαπλή εκτέλεση των χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού

αφαίρεσης υλικού, της τραχύτητας της επιφανείας και του βαθμού λείανσης. Εδώ όχι μόνο βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά, αλλά καθορίζονται και οι βέλτιστες παράμετροι κοπής που τα επηρεάζουν. Παρέχονται επίσης και πειραματικά αποτελέσματα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης αυτής.

Στη δική τους εργασία οι Lin και Tai [6] εξετάζουν ως παραμέτρους τη γωνία κοπής και την ταχύτητα κοπής σε ένα μοντέλο που έχουν κατασκευάσει. Το μοντέλο αυτό μέσω ενός αλγορίθμου μπορεί να προβλέπει την τραχύτητα της επιφάνειας καθώς και τα λάθη στην κατεργασία του προφίλ του τεμαχίου. Αναζητούνται βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί πιο λεία επιφάνεια.

Οι Hu και Tse [7] βελτιστοποιούν την τροχιά του εργαλείου σε μία δεδομένη περιοχή γλυπτών κοιλοτήτων. Αναπτύσσεται μία καινοτόμος μέθοδος σύμφωνα με την οποία υπολογίζονται πολυγωνικές περιοχές μέσα στην κοιλότητα. Η διαδικασία τεκμηριώνεται με παράδειγμα.

Στην προσπάθειά τους να αναλύσουν την επιρροή των παραμέτρων της κοπής στο τελικό φινίρισμα της επιφάνειας του τεμαχίου οι Baptista και Simoes [8] χρησιμοποίησαν δύο μηχανές CNC τριών και πέντε αξόνων στις οποίες εφαρμόστηκαν οι ίδιες συνθήκες κατεργασίας. Με τη βοήθεια του σχεδιασμού των πειραμάτων κατασκευάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο της διαδικασίας το οποίο δίνει τις τιμές των παραμέτρων οι οποίες οδηγούν στον ελάχιστο χρόνο κοπής, για μια συγκεκριμένη τραχύτητα επιφανείας.

Αξιόλογη είναι και η κλασσική εργασία Dong, Li και Vickers [9], για βέλτιστη προσέγγιση ξεχονδρίσματος ενός τεμαχίου με τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας. Χρησιμοποιείται μια μέθοδος η οποία παράγει τροχιές εργαλείων CNC βασισμένη σε 3D CAD μοντέλο του τεμαχίου. Βελτιστοποιείται η πρόωση, το βάθος κοπής, ο αριθμός των επιπέδων κοπής και οι παράμετροι που καθορίζουν τη γεωμετρία του τεμαχίου.

Κεφάλαιο 3

Χαρακτηριστικά και συνθήκες κοπής

Οι βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές (αυτές δηλαδή που μπορούν να αλλάξουν άμεσα) στην διαδικασία κοπής είναι οι παρακάτω:

- ❖ Το υλικό του κοπτικού εργαλείου.
- ❖ Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου και η κατάσταση της επιφάνειας του συμπεριλαμβανομένης της οξύτητας / αμβλύτητας.
- ❖ Το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου.
- ❖ Οι συνθήκες κοπής, δηλαδή η ταχύτητα, το βάθος κοπής και η πρόωση.
- ❖ Η χρήση υγρών κοπής.
- ❖ Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως η στιβαρότητα κλπ.
- ❖ Οι μηχανισμοί συγκράτησης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου.

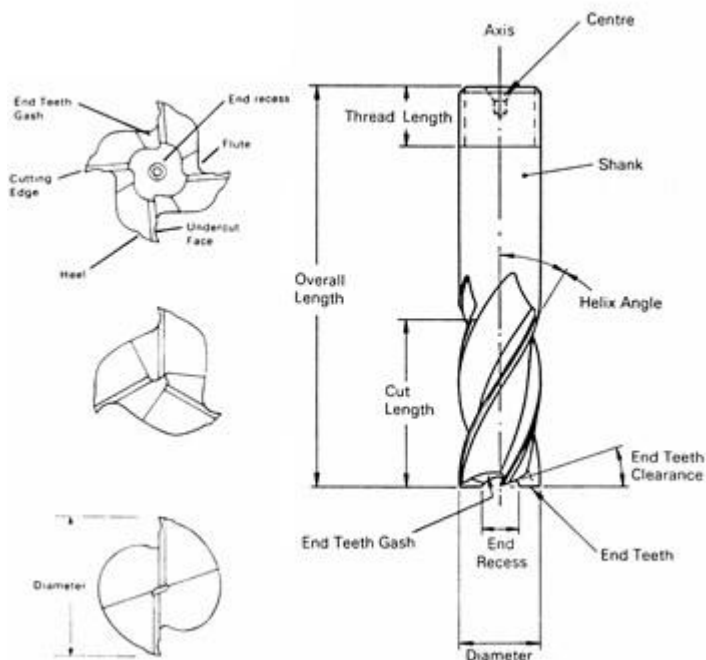
3.1 Κοπτικά εργαλεία

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται συνήθως σε κέντρα κατεργασιών διακρίνονται σε:

- ❖ Εργαλεία διάνοιξης οπών, πχ τρυπάνια, κεντραδόροι, σπειροτόμοι, reamer, boring bars.
- ❖ Εργαλεία φρεζαρίσματος, πχ κονδύλια, φρεζοκεφαλές μετωπικές, περιφερειακές, ελικοειδείς, δισκοειδείς, σφαιρικές κλπ.

Και στις δύο κατηγορίες υπάρχουν εργαλεία που οι κοπτικές τους ακμές είναι ένθετα πλακίδια καρβιδίων καθώς και άλλα εργαλεία που είναι ομοιογενή κατασκευασμένα συνήθως είτε από ταχυχάλυβα είτε από καρβίδια.

Τα κονδύλια είναι τα πλέον εύχρηστα εργαλεία για εργασίες φρεζαρίσματος. Συνήθως είναι κυλινδρικά με δύο, τρεις ή τέσσερις πτέρυγες. Οι κοπτικές ακμές εκτείνονται σε όλο το περιφερειακό μήκος της κάθε πτέρυγας αλλά και στο μετωπικό μήκος της. Το τελευταίο μπορεί να εκτείνεται μέχρι τον άξονα του κονδυλιού οπότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί (περιορισμένα) και ως τρυπάνι, βλ. Σχήμα 3.1.

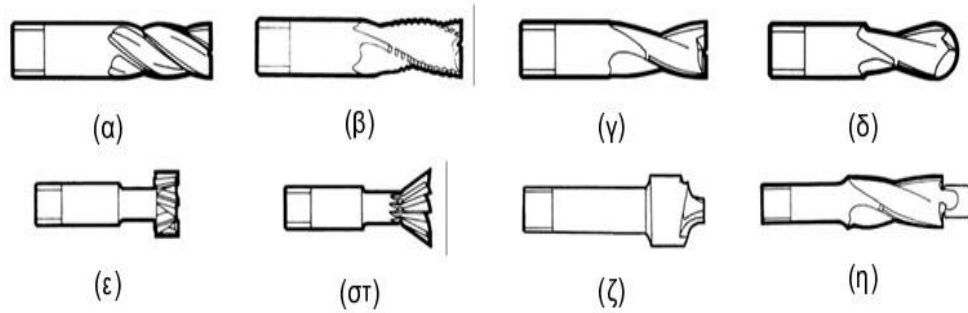


Σχήμα 3.1: Βασική μορφή κονδυλίου

Χαρακτηριστικοί τύποι κονδυλιών είναι:

- ❖ κονδύλια με τρεις πτέρυγες ή τέσσερις πτέρυγες συνεχούς ακμής ή τύπου PR που χρησιμοποιούνται σε γενικές εφαρμογές εκχόνδρισης και αποπεράτωσης βλ. Σχήμα 3.2 (α) και (β).
- ❖ κονδύλια με δύο πτέρυγες που χρησιμοποιούνται συνήθως για διάνοιξη αυλάκων και οπών, βλ. Σχήμα 3.2 (γ).
- ❖ κονδύλια με σφαιρικό άκρο που χρησιμοποιούνται για κατεργασία γλυπτών επιφανειών, βλ. Σχήμα 3.2 (δ).
- ❖ κονδύλια μορφής, πχ για αύλακες T, για αύλακες τύπου χελιδονοουράς, για ακτίνες καμπυλότητας σε γωνίες (ράδια) και για counterbores, βλ. Σχήμα 3.2 (ε)-(η).

Κονδύλια με επικάλυψη κοβαλτίου έχουν αξιοσημείωτα βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και χρησιμοποιούνται όταν οι απαιτήσεις σε ταχύτητα κοπής είναι υψηλές.



Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικοί τύποι κονδυλίων

3.2 Βασικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής CNC

Οι συνθήκες κοπής καθορίζονται από το υλικό που διαθέτουμε και από τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.

Η ισχύς της εργαλειομηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{60000000 \times n} \times k_c$$

όπου,

P_c = ισχύς σε kW

a_p = το βάθος κοπής σε mm

a_e = το πάχος της κοπής σε mm

v_f = ταχύτητα πρόωσης

η = βαθμός απόδοσης

k_c = δύναμη κοπής ανά mm²

Το k_c και το m_c είναι σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τις τιμές αυτών μπορούμε να τις πάρουμε από τους καταλόγους. Στην παρούσα εργασία το υλικό που έχει επιλεγεί είναι ορείχαλκος το οποίο ανήκει στην κατηγορία 16 των καταλόγων. Άρα για το συγκεκριμένο υλικό θα είναι $k_c = 700$ και $m_c = 0.25$.

Οι διάφορες ταχύτητες κοπής δίνονται από τις σχέσεις:

$$v_c = \frac{n \times \pi \times D}{1000} : \text{ταχύτητα κοπής σε m/min}$$

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} : \text{ταχύτητα ατράκτου σε RPM}$$

Ταχύτητα πρόωσης και ταχύτητα ανά περιστροφή:

$$v_f = n \times z \times f_z \text{ σε mm/min}$$

$$v_f = n \times K \times f_z \text{ σε mm/min}$$

$$f = z \times f_z \quad \text{σε mm/rev}$$

$$f = K \times f_z \quad \text{σε mm/rev}$$

όπου,

D = διάμετρος κοπτικού εργαλείου σε mm

z = αριθμός δοντιών

K = ιδανικός αριθμός δοντιών για υπολογισμό ταχύτητας πρόωσης ή ταχύτητας ανά περιστροφή

v_c = ταχύτητα κοπής σε m/min

n = περιστροφές ανά λεπτό RPM

v_f = ταχύτητα πρόωσης σε mm/min

f_z = ταχύτητα ανά δόντι σε mm/tooth

f = ταχύτητα ανά περιστροφή σε mm/rev

Q = ρυθμός αφαίρεσης υλικού σε cm^3/min ο οποίος δίνεται από τον

τύπο:
$$Q = \frac{a_e \times a_p \times v_f}{1000}$$

3.3 Επιλογή κοπτικών εργαλείων και συνθηκών κοπής από τους καταλόγους

Τα πειράματα θα εκτελεστούν σε πραγματικές συνθήκες γι' αυτό τον λόγο λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένοι περιορισμοί. Οι περιορισμοί που έχουν τεθεί αφορούν συγκεκριμένη εργαλειομηχανή. Πρόκειται για την εργαλειομηχανή CNC της OKUMA μοντέλου MX-45VAE που διαθέτει ο τομέας κατεργασιών των υλικών του Ε.Μ.Π.

Οι περιορισμοί από τους οποίους δεσμευόμαστε είναι οι εξής:

Ισχύς ατράκτου: $P_c \leq 6 \text{ kW}$

Ταχύτητα ατράκτου: $n \leq 6000$ rpm

Ταχύτητα πρόωσης: $v_f \leq 6000$ mm/min

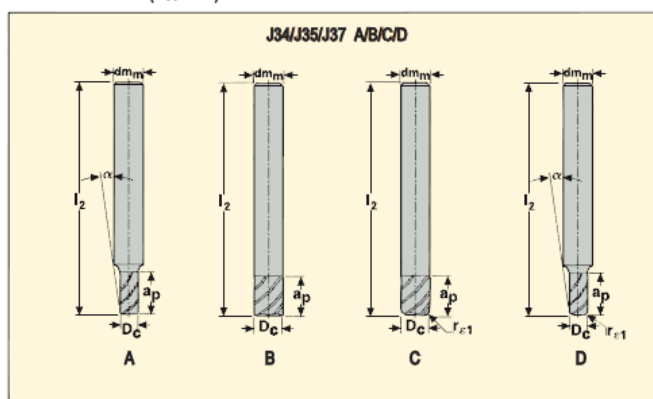
Τα πειράματα θα γίνουν με κοπτικά εργαλεία της SECO. Για κάθε τύπο εργαλείου ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου ο κατασκευαστής δίνει συνιστώμενες τιμές πρόωσης f και ταχύτητας κοπής V . Στη συγκεκριμένη περίπτωση το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου ανήκει στην κατηγορία 16, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τα κοπτικά εργαλεία που θα επιλεγούν θα αφορούν τα υλικά της κατηγορίας 16.

Οι κατεργασίες της εκχόνδρισης του τεμαχίου θα γίνουν με κονδύλι διαμέτρου 20mm και από τους καταλόγους επιλέγεται το εργαλείο J35 τύπου J35200. Τα χαρακτηριστικά του εργαλείου αυτού φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

J34/J35/J37 Solid carbide end mill – sharp / corner radius ($z_n = 3$)



Tolerances:
Run-out= 0,02 mm, L-XL $\geq \emptyset 5 = 0,03$ mm
 $dm_m = h5$
 $D_c = \emptyset 1-6 = -0,02/-0,034$, $\emptyset 6,5-25 = -0,02/-0,044$
 $r_{e1} = +/-0,03$ mm




Part No.	Drawing A/B/C/D	-MEGA	Un-coated*	Dimensions in mm					α	Z_n
				D_c	dm_m	l_2	a_p	r_{z1}		
34200	B	■	■	20	20	90	24	-	-	3
35200	B	■	■	20	20	100	40	-	-	3
35200R050	C	■		20	20	100	40	0,5	-	3
35200R100	C	■		20	20	100	40	1	-	3
35L200	B	■	■	20	20	125	55	-	-	3
35XL200	B	■	■	20	20	150	65	-	-	3

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου εκχόνδρισης

Οι συνθήκες κοπής που προτείνει ο κατασκευαστής σύμφωνα με τον πίνακα 2.2 θα είναι $v_c = 300$ m/min, $n = 4770$ RPM, $f_z = 0,38$ mm/tooth και $v_f = 5440$ mm/min. Παρατηρείται ότι οι προτεινόμενες συνθήκες κοπής ικανοποιούν τους περιορισμούς που έχουν τεθεί λόγω της εργαλειομηχανής.

Χαρακτηριστικά και συνθήκες κοπής

J34/J35/ J37	Side milling roughing				D _c (mm)												
	a _p x D _c	a _e x D _c	v _c (m/min)		1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	
16-17	1	0,5	300	rev/min	95490	47750	31830	23870	19100	15920	11940	9550	7960	5970	4770	3820	
				f _z (mm)	0,019	0,038	0,057	0,076	0,095	0,114	0,152	0,19	0,228	0,304	0,38	0,475	
				v _f (mm/min)	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440	5440

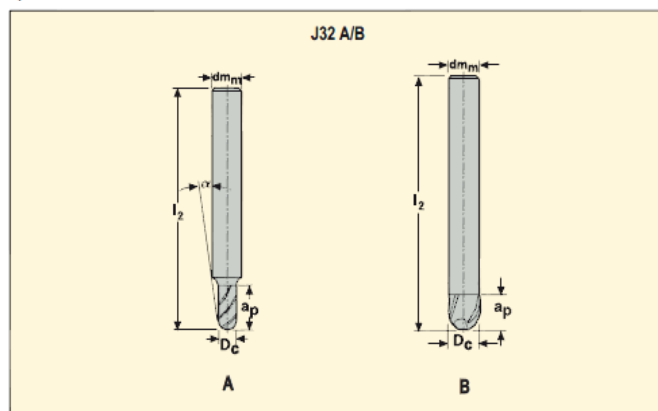
Πίνακας 3.2: Συνθήκες κοπής εκχόνδρισης

Όλες οι κατεργασίες αποπεράτωσης, εκτός από αυτές που αφορούν την περιοχή της καρίνας του σκαφιδίου, θα γίνουν με κονδύλι με σφαιρικό άκρο (ball nose) διαμέτρου 6 mm. Στην περιοχή της καρίνας η αποπεράτωση θα γίνει με κονδύλι με σφαιρικό άκρο διαμέτρου 3 mm. Από τους καταλόγους επιλέγεται και για τις δύο περιπτώσεις το εργαλείο J32 και οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι J32L60 (D=6 mm) και J32SL030 (D=3 mm). Τα χαρακτηριστικά αυτών φαίνονται στον πίνακα 3.3.

J32 Solid carbide end mill – ball nose (z_n = 3)



Tolerances:
Run-out= 0,02 mm
d_m = h5
D_c = Ø 1-6 = -0,02/-0,034, Ø 8-25 = -0,02/-0,044
Radius = +/-0,02 mm




Part No.	Drawing A/B	-MEGA	Un- coated*	Dimensions in mm				α	z _n
				D _c	d _m	l ₂	a _p		
32030	B	■	■	3	3	40	5	-	3
32L030	A	■	■	3	4	75	20	1,5°	3
32SL030	B	■	■	3	3	100	6	-	3
32031	A	■	■	3	6	50	5	7,5°	3
32060	B	■	■	6	6	55	8	-	3
32L060	B	■	■	6	6	100	40	-	3
32XL060	B	■	■	6	6	100	15	-	3
32SL060	B	■	■	6	6	150	15	-	3

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά εργαλείων αποπεράτωσης

Οι συνθήκες κοπής που προτείνει ο κατασκευαστής (πίνακας 2.4) για το εργαλείο αποπεράτωσης διαμέτρου D=6mm θα είναι v_c = 350 m/min, n = 18570 RPM, f_z = 0,144 mm/tooth και v_f = 8020 mm/min, ενώ για το εργαλείο διαμέτρου D=3mm θα είναι v_c = 350 m/min, n = 37140 RPM, f_z = 0,072 mm/tooth και v_f = 8020 mm/min.

Οι συνθήκες κοπής της αποπεράτωσης δεν πληρούν τους περιορισμούς που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Γι' αυτό το n διατηρείται οριακά και στις δύο περιπτώσεις στις 6000 rpm. Αλλάζοντας όμως το n αλλάζουν και τα υπόλοιπα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται από τους τύπους της παραγράφου 3.1. Επομένως οι συνθήκες κοπής για το εργαλείο διαμέτρου 6 mm θα είναι $v_c = 113$ m/min, $n = 6000$ RPM, $f_z = 0,144$ mm/tooth και $v_f = 2592$ mm/min, ενώ για το εργαλείο διαμέτρου 3mm θα είναι $v_c = 56$ m/min, $n = 6000$ RPM, $f_z = 0,072$ mm/tooth και $v_f = 1296$ mm/min.

J32	Copy milling finishing				D _c (mm)												
	a _p x D _c	a _e x D _c	v _c (m/min)		1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	
16-17	0,02	0,02	350	rev/min	111410	55700	37140	27850	22280	18570	13930	11140	9280	6960	5570	4460	
				f _z (mm)	0,024	0,048	0,072	0,096	0,12	0,144	0,192	0,24	0,288	0,384	0,48	0,6	
				v _f (mm/min)	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020	8020

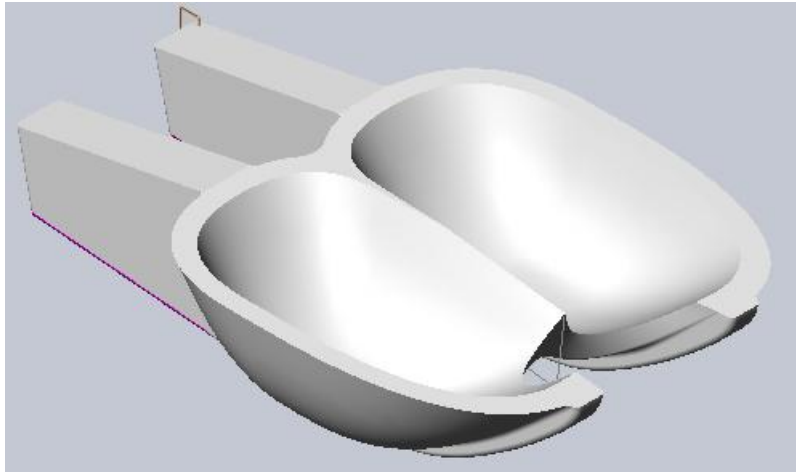
Πίνακας 3.4: Συνθήκες κοπής του κατασκευαστή για την αποπεράτωση

3.4 Στερέωση Αντικειμένου

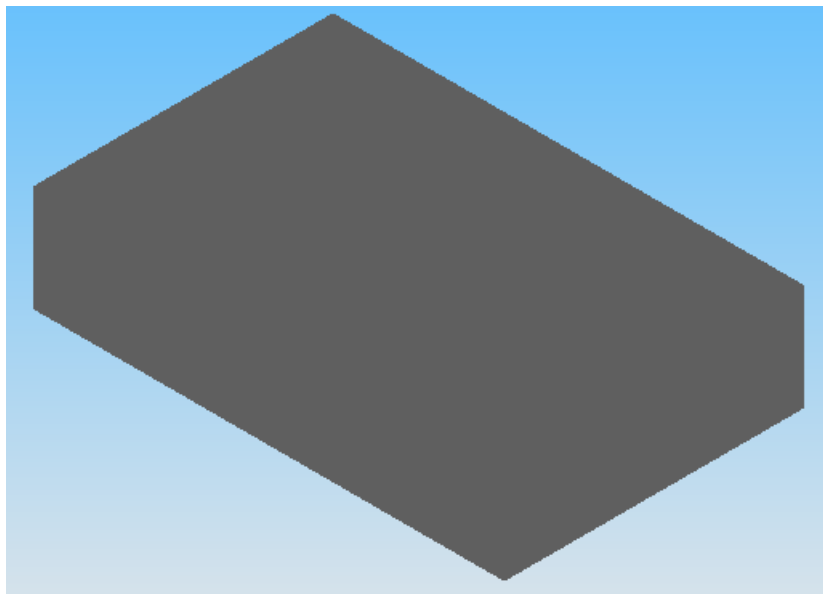
Το αντικείμενο που πρέπει να κατασκευαστεί είναι το σκαφίδιο του σχήματος 2.3. Αρχικά διαθέτουμε ένα συμπαγές τεμάχιο (σχήμα 3.4) από το οποίο, μετά από μία σειρά κατεργασιών, θα κατασκευαστεί το σκαφίδιο.

Αρχικά θα κατασκευαστούν τα “δόντια”. Πρώτα θα γίνουν οι κατεργασίες στην πάνω πλευρά και στη συνέχεια στην κάτω πλευρά. Το αντικείμενο θα συγκρατηθεί με μία μέγγενη αντιδιαμετρικά των δοντιών. Όταν ολοκληρωθούν οι κατεργασίες στην πάνω πλευρά το αντικείμενο θα περιστραφεί έτσι ώστε να κατεργαστεί η κάτω πλευρά.

Στη συνέχεια θα κατασκευαστούν τα “κουτάλια”. Και σε αυτή την περίπτωση πρώτα θα γίνουν οι κατεργασίες στην πάνω πλευρά και στη συνέχεια στην κάτω πλευρά. Πάλι εδώ το αντικείμενο θα συγκρατείται από μία μέγγενη και το σημείο συγκράτησης θα είναι τα “δόντια”. Έτσι όταν ολοκληρωθούν οι κατεργασίες της πάνω πλευράς των “κουταλιών” το αντικείμενο θα περιστραφεί για να γίνουν οι κατεργασίες της κάτω πλευράς.



Σχήμα 3.3: Σκαφίδιο



Σχήμα 3.4: Τεμάχιο προς κατεργασία

3.5 Το λογισμικό SolidCAM

Το λογισμικό SolidCAM είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό δημιουργίας μηχανουργικών κατεργασιών το οποίο διατίθεται από την εταιρεία SolidCAM για τον σχεδιασμό της κοπής τεμαχίων. Για τη σχεδίαση του τεμαχίου χρησιμοποιείται το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks και το οποίο δίνει ένα format αρχείων *.SLDPRT. Αυτό το είδος είναι αναγνωρίσιμο από το SolidCAM το οποίο με τη σειρά του αναλαμβάνει να πραγματοποιήσει τις

διάφορες φάσεις της κατεργασίας. Βέβαια οποιοδήποτε αντικείμενο μπορεί να σχεδιαστεί στο AutoCad και στη συνέχεια να περαστεί στο παραπάνω λογισμικό.

Το SolidCAM ενσωματώνεται μέσω ενός ενιαίου παραθύρου και συνεργάζεται πλήρως με το πρότυπο σχέδιο (τρισεδιάστατη γεωμετρία) που έχει δημιουργηθεί στο SolidWorks. Το SolidCAM χρησιμοποιεί τα σχεδιαστικά εργαλεία του SolidWorks για να διαμορφώσει το μοντέλο κατεργασίας και να δημιουργήσει τις απαραίτητες γεωμετρίες που ορίζουν τις κατεργασίες κοπής. Όταν η γεωμετρία που χρησιμοποιείται, αλλάζει στο μοντέλο SolidWorks, το SolidCAM συγχρονίζει αυτόματα όλες τις διαδικασίες κατεργασιών με την ανανεωμένη γεωμετρία.

Η πλήρης αυτή συνεργασία του SolidCAM με το πρότυπο μοντέλο SolidWorks που επεξεργάζομαστε, μειώνει δραστικά τα λάθη όταν υπάρχουν αλλαγές και βελτιώσεις σε ένα πρότυπο και εξασφαλίζει τη δυνατότητα σωστής επανάληψης κατεργασιών όταν γίνονται αλλαγές σε μοντέλα που ήδη επεξεργάστηκαν.

Σύμφωνα με το SolidCAM, αφού σχεδιαστεί το αντικείμενο και εισαχθεί στο λογισμικό, στην συνέχεια καθορίζεται το μπλοκ του υλικού από το οποίο και θα προέλθει το αντικείμενο με κοπή. Μπορούν να εισαχθούν δεδομένα που αφορούν το είδος του κοπτικού καθώς και τις ταχύτητες με τις οποίες θα κινηθεί αυτό επάνω στο μπλόκ του υλικού. Ανάλογα με τη στρατηγική που θα ακολουθήσει ο χειριστής, το SolidCAM για κάθε φάση κατεργασίας που χρησιμοποιείται δημιουργεί ένα toolpath στο οποίο αποθηκεύονται όλα τα παραπάνω δεδομένα έτσι ώστε να γνωρίζει ο χειριστής του προγράμματος όλες τις παραμέτρους της κοπής.

Κάθε toolpath δίνει ορισμένα συγκεκριμένα στατιστικά στοιχεία για την κοπή, όπως ο χρόνος κοπής, η διαδρομή του εργαλείου και ο όγκος του υλικού που απομένει. Το πλέον σημαντικό του προγράμματος είναι ότι διαθέτει και προσομοίωση της κοπής διευκολύνοντας έτσι ακόμα περισσότερο τον χρήστη στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζει ο κάθε παράγοντας την κοπή.

Τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν περισσότερο είναι ο χρόνος κοπής και ο όγκος του υλικού που απομένει. Αυτά είναι τα δύο μεγέθη τα οποία θα βελτιστοποιηθούν έτσι ώστε να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Κεφάλαιο 4 **Αρχές Σχεδιασμού των Πειραμάτων**

4.1 Γενικά

Ως πείραμα ορίζεται η τεχνητή αναπαραγωγή ενός φαινομένου σε ένα εργαστήριο κάτω από συνθήκες που ευνοούν την παρατήρηση, προκειμένου να διερευνηθούν οι αιτιώδεις σχέσεις που υπάρχουν στο φαινόμενο και τελικά να εξαχθούν ορθά συμπεράσματα για αυτό. Η διεξαγωγή πειραμάτων αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του μηχανικού και είναι μια διαδικασία που τις περισσότερες φορές πρέπει να γίνεται.

Προκειμένου να γίνει μια σωστή και συστηματική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων πρέπει προηγουμένως να έχει γίνει και ο απαραίτητος σχεδιασμός πειραμάτων. Πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία η οποία αναλύεται παρακάτω.

4.2 Μεθοδολογία Διεξαγωγής Πειραμάτων

Σε οποιοδήποτε πείραμα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Όταν ο τρόπος συλλογής των δεδομένων αυτών δεν στηρίζεται σε επιστημονικά τεκμηριωμένες βάσεις, αλλά στη διαίσθηση, στην “κοινή” λογική και πολλές φορές και στη εμπειρία, τότε δεν είναι δυνατό να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα και συνεπώς συμπεράσματα. Φτάνουμε λοιπόν σε σημείο να σπαταλάμε χρήμα, χρόνο, εξοπλισμό και φυσικά ανθρώπινο δυναμικό.

Υπάρχουν τέσσερις γενικές μεθοδολογίες διεξαγωγής πειραμάτων. Η μέθοδος της καλύτερης πρόβλεψης (*best guess approach*), η μέθοδος της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά (*one factor at a time*), η μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης (*full factorial experiments*) και η μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης (*fractional factorial experiments*). Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται παρακάτω ταξινομημένες, από την λιγότερο προς την περισσότερο αποτελεσματική για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη.

4.2.1 Μέθοδος της Καλύτερης Πρόβλεψης

Η τιμή κάποιου παράγοντα μεταβάλλεται, για την επόμενη εκτέλεση του πειράματος, σύμφωνα με το αποτέλεσμα της τρέχουσας εκτέλεσης και την εκτίμηση του υπεύθυνου μηχανικού. Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής: οι παράγοντες που πιστεύεται ότι επηρεάζουν το εξεταζόμενο μέγεθος και που πρέπει να μπορούν να ελεγχθούν άμεσα, παίρνουν αρχικές τιμές και το πείραμα εκτελείται για πρώτη φορά. Η τιμή ενός από τους παράγοντες μεταβάλλεται με βάση την πρόβλεψη ότι η μεταβολή αυτή θα επιδράσει θετικά στο μετρούμενο μέγεθος, και το πείραμα επαναλαμβάνεται. Αν πράγματι η μεταβολή οδηγήσει σε θετική επίδραση, τότε είτε ακολουθεί νέα μεταβολή της τιμής του ίδιου παράγοντα ή επιλέγεται για μεταβολή κάποιος άλλος. Αν η μεταβολή οδηγήσει σε αρνητική επίδραση, τότε η τιμή του παράγοντα μεταβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την αρχική της τιμή. Το πείραμα θα ολοκληρωθεί όταν τα αποτελέσματα κριθούν ικανοποιητικά.

Η μέθοδος αυτή παρόλο που είναι απλή στην εφαρμογή της, παρουσιάζει και πολλά μειονεκτήματα. Έστω ότι οι αρχικές τιμές των παραγόντων δεν είναι κοντά στις βέλτιστες. Στη περίπτωση αυτή μπορεί είτε να χρειαστούν πάρα πολλές διαδοχικές επαναλήψεις προκειμένου να επιλεχθούν αυτές ή να μην είναι δυνατή η σύγκλιση σε αυτές. Επίσης μια πιθανή βελτίωση των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με την αρχική θα μπορούσε να θεωρηθεί βέλτιστη κατάσταση, χωρίς όμως αυτό να είναι σωστό.

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων του πειράματος καθώς και πολύ καλή γνώση του μηχανισμού λειτουργίας του φαινομένου. Μόνο κατ' αυτόν τον τρόπο θα μπορέσει ο εκάστοτε μηχανικός να προβλέψει ποιοί παράγοντες θα συμπεριληφθούν στο πείραμα, αλλά και πόσο θα μεταβληθεί ο κάθε παράγοντας.

4.2.2 Μέθοδος της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ίσως η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη για τη συλλογή πειραματικών δεδομένων. Για να γίνει σαφής ο τρόπος εφαρμογής της δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα.

Έστω πείραμα στο οποίο εξετάζονται τέσσερις διαφορετικοί παράγοντες, οι Α, Β, Γ και Δ ο καθένας από τους οποίους μπορεί να πάρει δύο διαφορετικές τιμές, τις 1 και 2 (οι τιμές αυτές ονομάζονται επίπεδα του παράγοντα και είναι διαφορετικές για κάθε παράγοντα). Οι αναγκαίες επαναλήψεις του πειράματος, σύμφωνα με τη μέθοδο, περιγράφονται στον πίνακα 4.1

Επανάληψη α/α	Παράγοντες και επίπεδα αυτών			
	A	B	Γ	Δ
1	1	1	1	1
2	2	1	1	1
3	1	2	1	1
4	1	1	2	1
5	1	1	1	2

Πίνακας 4.1: Συνδυασμοί των επιπέδων των παραγόντων σύμφωνα με τη μέθοδο της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά.

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, απαιτούνται συνολικά πέντε επαναλήψεις. Στην πρώτη επανάληψη κάθε παράγοντας παίρνει την τιμή του επιπέδου 1 που του αντιστοιχεί. Στη συνέχεια, μεταβάλλεται ένας μόνο παράγοντας τη φορά στο επίπεδο 2, διατηρώντας τους υπόλοιπους στο επίπεδο 1. Με τον τρόπο αυτό, αν τα αποτελέσματα της πρώτης επανάληψης συγκριθούν με τα αποτελέσματα των υπολοίπων επαναλήψεων ξεχωριστά, γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης του κάθε παράγοντα ξεχωριστά. Η διαδικασία μπορεί να απλουστευθεί με τη χρήση διαγραμμάτων που απεικονίζουν τις μεταβολές αυτές.

Το σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να λάβει υπόψη τυχόν αλληλεπιδράσεις που εμφανίζονται ανάμεσα στους παράγοντες. Ως αλληλεπίδραση ορίζεται η αδυναμία ενός παράγοντα να διατηρεί σταθερή την επίδρασή του στο αποτέλεσμα ενώ μεταβάλλεται η τιμή ενός άλλου

παράγοντα. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων είναι κάτι πολύ συνηθισμένο και αν όντως υπάρχουν σε ένα πείραμα, τότε η συγκεκριμένη μέθοδος θα δώσει λανθασμένα αποτελέσματα.

4.2.3 Μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης

Η μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης απαιτεί την εκτέλεση όλων των δυνατών συνδυασμών σε ένα πείραμα. Όταν, στη γενική περίπτωση εξετάζονται m το πλήθος παράγοντες, ο καθένας από τους οποίους παίρνει N το πλήθος διαφορετικές τιμές (έχει N το πλήθος επίπεδα), θα πρέπει να γίνουν συνολικά N^m το πλήθος επαναλήψεις.

Είναι προφανές ότι η μέθοδος αυτή είναι καλύτερη, από την άποψη του όγκου των δεδομένων και των πληροφοριών που συλλέγονται. Αφού εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων λαμβάνονται υπόψη. Όμως και στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα. Η διεξαγωγή ενός πειράματος, στο οποίο θα εξετάζονται αρκετοί παράγοντες σε αρκετά διαφορετικά επίπεδα, θα απαιτούσε ένα πάρα πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, κάτι που θα ήταν και δαπανηρό αλλά και υπερβολικά χρονοβόρο, καθιστώντας έτσι τη χρήση της μεθόδου ανέφικτη. Επίσης, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητη η εξέταση όλων των δυνατών συνδυασμών. Γενικά, η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο στις περιπτώσεις που ερευνάται η επίδραση λίγων παραγόντων.

4.2.4 Μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης

Η μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης είναι η πιο αποτελεσματική από όλες τις προηγούμενες. Ονομάζεται έτσι γιατί εξετάζεται μόνο ένα τμήμα/κλάσμα από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, με αποτέλεσμα ο αναγκαίος αριθμός επαναλήψεων να είναι μικρός, χωρίς όμως να χάνονται σημαντικές πληροφορίες. τμήμα/κλάσμα των συνδυασμών επιλέγεται όχι τυχαία, αλλά με τη βοήθεια κανόνων και στατιστικών πινάκων

που έχουν αναπτυχθεί ακριβώς για αυτό το σκοπό και που ονομάζονται ορθογώνιοι πίνακες ή πίνακες Taguchi.

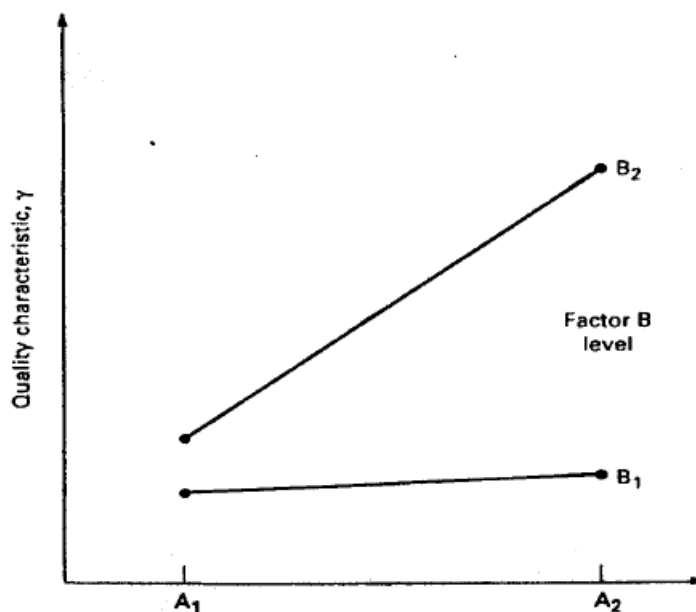
Το μοναδικό μειονέκτημα είναι η δυσκολότερη εφαρμογή της σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Να τονίσουμε επίσης ότι, ανάλογα με τις επιλογές που γίνονται, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η μέθοδος μπορεί να υπολογίσει την επίδραση όλων των παραγόντων ξεχωριστά, αλλά όχι και όλων των αλληλεπιδράσεων που τυχόν εμφανίζονται μεταξύ τους. Αντίθετα, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι ότι επιτρέπει την συγκέντρωση όλων των στατιστικά σημαντικών δεδομένων με πολύ λίγες επαναλήψεις, κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί με καμία από τις άλλες μεθόδους.

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι θα μπορούσαν να αποτελούν ένα σχεδιασμένο πείραμα, όμως μόνο η τελευταία χρησιμοποιεί και τα δύο κυριότερα στοιχεία του σχεδιασμού των πειραμάτων. Αυτά είναι, η ταυτόχρονη μεταβολή διάφορων παραγόντων και ο συστηματικός αποκλεισμός κάποιων από το σύνολο των δυνατών συνδυασμών με σκοπό τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αυτή την εργασία.

4.2.5 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων

Στα προηγούμενα εισήχθηκε η έννοια της αλληλεπίδρασης και δόθηκε ο ορισμός αυτής. Επειδή όμως είναι καθοριστικής σημασίας για τα αποτελέσματα του πειράματος, γίνεται μια εκτενέστερη και πιο πρακτική αναφορά σε αυτή.

Στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 4.1: Αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παραγόντων A και B

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η εκτίμηση για την επίδραση του παράγοντα B στο μετρούμενο χαρακτηριστικό εξαρτάται από ποιο επίπεδο του παράγοντα A χρησιμοποιείται. Στο επίπεδο A1, η επίδραση του παράγοντα B μοιάζει πολύ μικρή ενώ στο επίπεδο A2, ο παράγοντας B φαίνεται να επιδρά σε πολύ μεγάλο βαθμό στο μετρούμενο χαρακτηριστικό. Επίσης τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να βγούν και αντίστροφα. Στο επίπεδο B1, η επίδραση του παράγοντα A μοιάζει αμελητέα ενώ στο επίπεδο B2, η επίδραση του παράγοντα μοιάζει να είναι πολύ μεγάλη. Αυτή η αμοιβαία εξάρτηση των παραγόντων A και B ως προς την επίδρασή τους στο μετρούμενο μέγεθος, ονομάζεται αλληλεπίδραση.

Σε ένα πείραμα στο οποίο εξετάζονται δύο παράγοντες, υπάρχουν τρία στοιχεία που μπορούν να εκτιμηθούν από στατιστική άποψη. Η επιρροή του παράγοντα A στο αποτέλεσμα, η επιρροή του παράγοντα B στο αποτέλεσμα και η επιρροή της αλληλεπίδρασης των A και B στο αποτέλεσμα. Αν πράγματι υπάρχει αλληλεπίδραση τότε θα είναι μεγάλη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα είναι αμελητέα.

Είναι πολύ σημαντικό να συμπεριληφθούν όλες οι αλληλεπιδράσεις που είναι πιθανό να εμφανιστούν μεταξύ των παραγόντων γιατί η επιρροή τους θα υπάρχει στα αποτελέσματα, ασχέτως με το αν αυτές συμπεριλήφθηκαν στο σχεδιασμό του πειράματος. Επίσης πρέπει να

σημειωθεί ότι οι αλληλεπιδράσεις μπορούν να εμφανιστούν και ανάμεσα σε τρεις, τέσσερις ή και περισσότερους παράγοντες (να είναι δηλαδή τρίτης ή και υψηλότερης τάξης), αν και κάτι τέτοιο είναι σπανιότερο σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης.

4.3 Διαδικασία εφαρμογής του σχεδιασμού των πειραμάτων

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων αποτελείται από τρεις φάσεις, τη φάση σχεδιασμού, τη φάση της διεξαγωγής και τη φάση της ανάλυσης. Από αυτές η πιο σημαντική είναι η φάση του σχεδιασμού, γιατί από αυτή εξαρτάται το αν το πείραμα θα δώσει ή όχι τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στη φάση του σχεδιασμού επιλέγονται οι παράγοντες που θα εξεταστούν καθώς και τα επίπεδα αυτών. Στη φάση διεξαγωγής τα πειράματα εκτελούνται και τα δεδομένα συλλέγονται, ενώ η φάση της ανάλυσης ασχολείται με τη στατιστική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Αν το πείραμα σχεδιαστεί καλά κατά την πρώτη φάση, ο απαιτούμενος όγκος εργασίας για τις επόμενες δύο είναι σημαντικά μειωμένος

Αναλυτικά για την σχεδίαση ενός πειράματος πρέπει να εκτελεστούν τα ακόλουθα βήματα:

1. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του προβλήματος ή του πεδίου ενδιαφέροντος.
2. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του σκοπού του πειράματος.
3. Επιλογή των μετρούμενων μεγεθών και των μετρητικών διατάξεων.
4. Επιλογή των παραγόντων που πιστεύεται ότι επηρεάζουν το μετρούμενο μέγεθος
5. Επιλογή των επιπέδων των παραγόντων.
6. Επιλογή του κατάλληλου ή των κατάλληλων ορθογώνιων πινάκων.
7. Επιλογή των αλληλεπιδράσεων που πιστεύεται ότι μπορεί να υπάρχουν ή επιστροφή στο βήμα 4.
8. Τοποθέτηση των παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα και εντοπισμός των αλληλεπιδράσεων.

9. Διεξαγωγή του πειράματος με βάση τους συνδυασμούς που προκύπτουν από τον ορθογώνιο πίνακα.
10. Ανάλυση και ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων.
11. Διεξαγωγή πειράματος επιβεβαίωσης.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, η φάση του σχεδιασμού περιλαμβάνει τα βήματα 1-8, το βήμα 9 είναι η φάση της διεξαγωγής και η φάση της ανάλυσης περιλαμβάνει τα βήματα 10 και 11.

Από τη παραπάνω ανάλυση προκύπτουν δύο πολύ βασικά συμπεράσματα. Πρώτον, επιβεβαιώνεται ότι η φάση του σχεδιασμού είναι η σημαντικότερη του σχεδιασμού των πειραμάτων αφού σε αυτή λαμβάνονται οι πιο καθοριστικές αποφάσεις όπως το ποιές θα είναι οι μετρητικές διατάξεις, ποιοί παράγοντες και ποιές τιμές αυτών θα ληφθούν υπόψη, ποιές αλληλεπιδράσεις είναι πιθανότερο να εμφανιστούν και ποιος ορθογώνιος πίνακας θα χρησιμοποιηθεί.

4.4 Ορθογώνιοι πίνακες

Αν τα βήματα του σχεδιασμού ενός πειράματος εξεταστούν προσεκτικά, τότε γίνεται αντιληπτό ότι τα μόνα που είναι άγνωστα είναι τα βήματα 6 έως 8. Τα συγκεκριμένα βήματα αναφέρονται στους ορθογώνιους πίνακες ή πίνακες Taguchi, οι οποίοι είναι θεμελιώδους σημασίας για ένα σχεδιασμένο πείραμα. Ο τρόπος χρησιμοποίησής τους αναφέρεται παρακάτω.

4.4.1 Τύποι ορθογωνίων πινάκων

Υπάρχουν γενικά τρεις τύποι ορθογωνίων πινάκων οι ονομασίες των οποίων αναφέρονται στον αριθμό των επιπέδων των παραγόντων που εξετάζονται. Έτσι σχηματίζονται οι πίνακες δύο επιπέδων, οι πίνακες τριών επιπέδων και οι πίνακες μικτών επιπέδων. Οι τελευταίοι προκύπτουν με κατάλληλο μετασχηματισμό των πρώτων. Κάθε πίνακας συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα L, ακολουθούμενο από έναν αριθμό, ο οποίος καθορίζει το

πλήθος των γραμμών του ορθογώνιου πίνακα. Για παράδειγμα αναφέρονται οι ορθογώνιοι πίνακες δύο επιπέδων :

L4, L8, L16, L32

όπως και οι ορθογώνιοι πίνακες τριών επιπέδων :

L9, L18, L27

από τους οποίους ο L8 έχει 8 γραμμές, ο L16 έχει 16 γραμμές, ο L27 έχει 27 γραμμές και ούτω καθ' εξής.

Πρέπει ο αριθμός των γραμμών ενός ορθογώνιου πίνακα να ισούται με τον αριθμό των διαφορετικών επαναλήψεων που γίνονται κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα για ένα σχεδιασμένο πείραμα είναι τα εξής, καταταγμένα από το περισσότερο στο λιγότερο σημαντικό:

- ❖ Ο αριθμός των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνονται υπ' όψιν.
- ❖ Ο αριθμός των επιπέδων για τους υπ' όψιν παράγοντες.
- ❖ Η επιθυμητή ανάλυση του πειράματος ή η ύπαρξη περιορισμών χρόνου και κόστους.

Με βάση τα δύο πρώτα κριτήρια καθορίζεται ο μικρότερος ορθογώνιος πίνακας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, κάτι που σημαίνει ότι το πείραμα που θα προκύψει θα έχει τη μικρότερη ανάλυση αλλά και το χαμηλότερο κόστος (αφού θα γίνονται οι ελάχιστες επαναλήψεις). Ανάλογα με το τρίτο κριτήριο είναι δυνατόν να επιλεγεί ένας μεγαλύτερος ορθογώνιος πίνακας έτσι ώστε να αυξηθεί η ανάλυση του πειράματος. Η ανάλυση ενός πειράματος είναι αυτή που υποδηλώνει τη βεβαιότητα με την οποία μπορεί να εκτιμηθεί η επιρροή κάθε παράγοντα και αλληλεπίδρασης σε ένα πείραμα ξεχωριστά. Υπάρχουν τέσσερα επίπεδα ανάλυσης, με το πρώτο να είναι η ελάχιστη και το τέταρτο η μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί. Ο καθορισμός της ανάλυσης γίνεται ανάλογα με τον ορθογώνιο πίνακα που χρησιμοποιείται και με τις ακόλουθες συμβάσεις :

- ❖ Αν κάθε παράγοντας και κάθε αλληλεπίδραση βρίσκονται σε ξεχωριστές στήλες, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 4 και ισοδυναμεί με ένα πλήρως παραγοντοποιημένο πείραμα.
- ❖ Αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τέταρτης τάξης ή αν μία αλληλεπίδραση δεύτερης

τάξης βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τρίτης τάξης, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 3

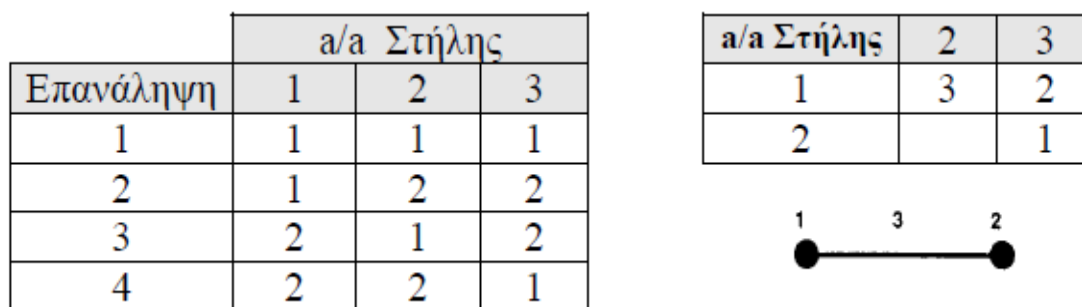
- ❖ Αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τρίτης τάξης ή αν δύο αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης βρίσκονται στην ίδια στήλη, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 2
- ❖ Τέλος, αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 1

4.4.2 Τοποθέτηση παραγόντων και εντοπισμός αλληλεπιδράσεων

Το βήμα 8, που αποτελεί και το τελευταίο της φάσης του σχεδιασμού του πειράματος, είναι και πολυπλοκότερο από όλα τα άλλα. Η σωστή εκτέλεσή του βασίζεται στην κατανόηση της παρακάτω μαθηματικής ιδιότητας των ορθογώνιων πινάκων. Αν ένας οποιοσδήποτε παράγοντας τοποθετηθεί σε μία συγκεκριμένη στήλη ενός ορθογώνιου πίνακα και ένας δεύτερος παράγοντας σε μία άλλη, τότε μία συγκεκριμένη τρίτη στήλη θα περιέχει αυτόματα την αλληλεπίδραση των παραγόντων αυτών.

Το ποιές στήλες θα είναι στήλες αλληλεπίδρασης είναι γνωστό για όλους τους ορθογώνιους πίνακες. Για τη διευκόλυνση του προσδιορισμού τους, χρησιμοποιούνται δύο εργαλεία, οι πίνακες αλληλεπίδρασης και τα γραμμικά διαγράμματα. Κάθε ορθογώνιος πίνακας έχει έναν πίνακα αλληλεπίδρασης και μία ομάδα γραμμικών διαγραμμάτων αντιστοιχισμένα σε αυτόν. Ο πίνακας αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει όλες τις δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στηλών του ορθογώνιου πίνακα. Τα γραμμικά διαγράμματα υποδεικνύουν διάφορες στήλες στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν παράγοντες και τις προκύπτουσες στήλες που θα περιέχουν τις αλληλεπιδράσεις αυτών. Αποτελούν δηλαδή, μία οπτική απεικόνιση ενός τμήματος του πίνακα αλληλεπίδρασης.

Ως παράδειγμα δίνεται ο ορθογώνιος πίνακας L4 με τον πίνακα αλληλεπίδρασής του και το μοναδικό γραμμικό του διάγραμμα (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Ορθογώνιος πίνακας L4, πίνακας αλληλεπίδρασης και γραμμικό διάγραμμα

Μέσω του πίνακα αλληλεπίδρασης φαίνεται, ότι οι τρεις στήλες του ορθογώνιου πίνακα L4 είναι αμοιβαία αλληλεπιδραστικές. Αυτό σημαίνει ότι αν οι δύο παράγοντες τοποθετηθούν στις στήλες 1 και 2 η αλληλεπίδρασή τους θα είναι στη στήλη 3, αν τοποθετηθούν στις στήλες 2 και 3 η αλληλεπίδρασή τους θα είναι στη στήλη 1 και αν τοποθετηθούν στις στήλες 1 και 3 η αλληλεπίδρασή τους θα είναι στη στήλη 2.

Στο γραμμικό διάγραμμα απεικονίζεται η πρώτη από τις παραπάνω περιπτώσεις. Στο διάγραμμα, οι στήλες που είναι διαθέσιμες για την τοποθέτηση των παραγόντων συμβολίζονται με δύο τελείες και η στήλη που θα περιέχει την αλληλεπίδραση συμβολίζεται με μία γραμμή που ενώνει τις τελείες αυτές.

Προφανώς η ιδανική περίπτωση κατά την τοποθέτηση των παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα και τον εντοπισμό των αλληλεπιδράσεων θα ήταν, κάθε στήλη να περιέχει μόνο έναν παράγοντα ή μία αλληλεπίδραση. Όμως, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό να γίνει λόγω περιορισμών χρόνου και κόστους όπως αναφέρεται και στο τρίτο κριτήριο επιλογής του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα. Σαν αποτέλεσμα, πολλές φορές σε μία στήλη γίνεται ανάμειξη (confounding) αλληλεπίδρασης με κύριους παράγοντες κάτι που σημαίνει ότι δεν είναι πλέον δυνατή η εκτίμηση της επιρροής του κάθε ένα από αυτούς. Το γεγονός αυτό αποτελεί έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην υψηλή ανάλυση του πειράματος και στο μειωμένο αριθμό επαναλήψεων. Αν η ανάμειξη κάποιου ή κάποιων κύριων παραγόντων με αλληλεπίδραση ή αλληλεπιδράσεις δε μπορεί να αποφευχθεί, τότε το βασικό σημείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη διατήρηση της υψηλότερης δυνατής ανάλυσης σε ένα δεδομένο ορθογώνιο πίνακα, είναι ότι

οι παράγοντες πρέπει να τοποθετούνται σε στήλες οι οποίες περιέχουν τις αλληλεπιδράσεις της υψηλότερης τάξης.

4.4.3 Ορθογώνιοι πίνακες μικτών επιπέδων

Οι ορθογώνιοι πίνακες μικτών επιπέδων χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό πειραμάτων όπου κάποιοι, αλλά όχι όλοι, από τους παράγοντες μπορούν να έχουν μόνο δύο επίπεδα (πχ. μία ρύθμιση τύπου on-off) ή και σε περιπτώσεις όπου επιβάλλεται η χρησιμοποίηση περισσότερων των τριών επιπέδων για κάποιο παράγοντα λόγω ενός μεγάλου εύρους τιμών που αυτός μπορεί να πάρει.

Ο μετασχηματισμός των πινάκων δύο επιπέδων γίνεται μέσω της αναβάθμισης ή και της υποβάθμισης των στηλών. Η διαδικασία είναι σχετικά απλή, αρκεί να ακολουθούνται κάποιοι συγκεκριμένοι κανόνες. Τη βάση για την αναβάθμιση και υποβάθμιση των στηλών αποτελεί η έννοια των βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom). Στους ορθογώνιους πίνακες ισχύουν οι εξής κανόνες σχετικά με του βαθμούς ελευθερίας:

1. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας για ένα παράγοντα σε ένα ορθογώνιο πίνακα ισούται με τον αριθμό των επιπέδων που ο παράγοντας έχει μείον τη μονάδα (πχ. ένας παράγοντας με τρία επίπεδα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας $3-1=2$, ένας με τέσσερα επίπεδα έχει τρεις $4-1=3$ και ούτω καθ' εξής).

2. Ο απαιτούμενος αριθμός βαθμών ελευθερίας για την εκτίμηση μιας αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο παραγόντων ισούται με το γινόμενο των βαθμών ελευθερίας των παραγόντων αυτών (πχ. για την αλληλεπίδραση των δύο προηγούμενων, απαιτούνται έξι βαθμοί ελευθερίας $(3-1) \times (4-1)=6$).

3. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας πρέπει να διατηρείται κατά την αναβάθμιση στηλών. Μία στήλη που περιέχει έναν παράγοντα με τέσσερα επίπεδα και συνεπώς έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, είναι ισοδύναμη με τρεις στήλες που περιέχουν παράγοντες δύο επιπέδων και συνεπώς έχουν έναν βαθμό ελευθερίας η κάθε μια.

Σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες, περιγράφεται η αναβάθμιση από δύο σε τέσσερα επίπεδα και η αναβάθμιση από δύο σε οχτώ επίπεδα.

Στα συγκεκριμένα παραδείγματα, χρησιμοποιούνται οι ορθογώνιοι πίνακες L8 και L16 αντίστοιχα.

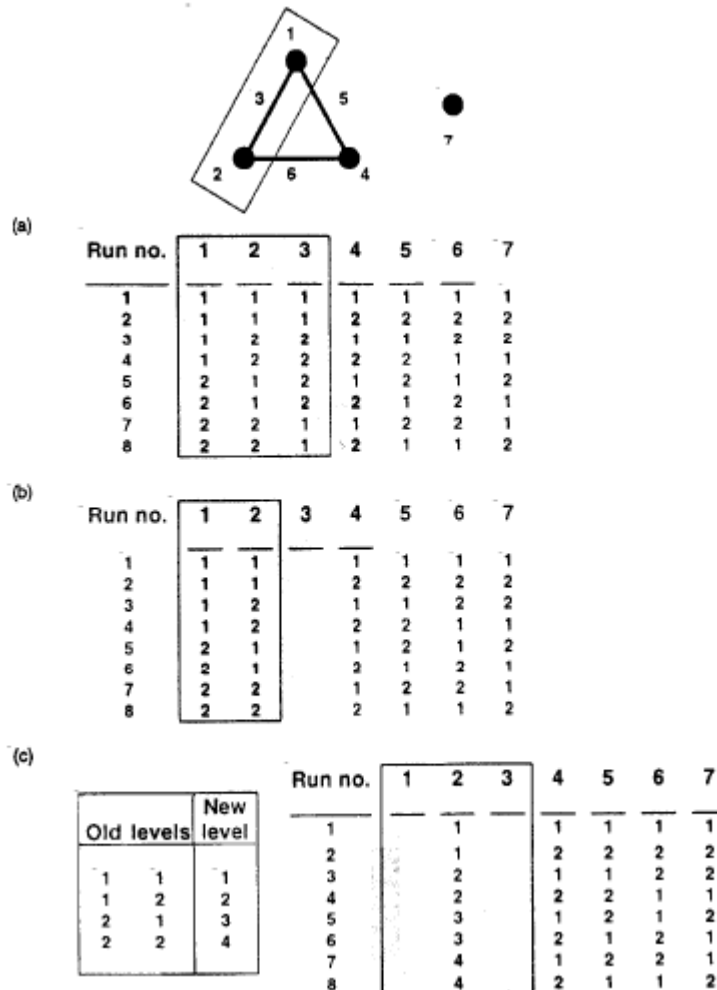
Παράδειγμα 1^ο.

Η διαδικασία αναβάθμισης από δύο σε τέσσερα επίπεδα έχει ως εξής:

1. Από τον ορθογώνιο πίνακα, επιλέγεται οποιαδήποτε ομάδα τριών στηλών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός γραμμικού διαγράμματος (σχήμα 3.3a).

2. Από τις τρεις στήλες επιλέγονται αυθαίρετα οι δύο και αγνοείται η τρίτη (σχήμα 3.3b).

3. Οι συνδυασμοί των επιπέδων των δύο στηλών αντικαθίστανται σύμφωνα με το σχήμα 4.3c



Σχήμα 4.3: Αναβάθμιση από δύο σε τέσσερα επίπεδα

Το σημείο στο οποίο απαιτείται προσοχή είναι η διατήρηση των βαθμών ελευθερίας. Όπως φαίνεται από το παράδειγμα, αντικαταστάθηκαν

τρεις στήλες δύο επιπέδων (άρα τρεις συνολικά βαθμοί ελευθερίας) από μία στήλη τεσσάρων επιπέδων (άρα και πάλι τρεις συνολικά βαθμοί ελευθερίας).

Παράδειγμα 2°.

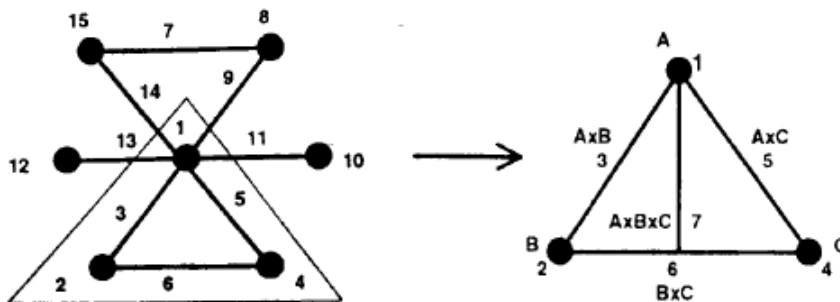
Η αναβάθμιση από δύο σε οχτώ επίπεδα είναι πιο πολύπλοκη και γίνεται ως εξής :

1. Επιλέγεται μια ομάδα επτά στηλών ,από τις οποίες τρεις περιέχουν κύριους παράγοντες και οι υπόλοιπες όλες τις δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, συμπεριλαμβανομένης και της αλληλεπίδρασης τρίτης τάξης (σχήμα 3.4a)

2. Επιλέγονται οι τρεις στήλες των κυρίων παραγόντων και υπόλοιπες αγνοούνται (σχήμα 3.4b).

3. Οι συνδυασμοί των επιπέδων των στηλών αυτών αντικαθίστανται σύμφωνα με το σχήμα 4.4c.

(a)



(b)

Run	1	2	4	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2
4	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1
5	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1

(c)

Old levels			New level
1	1	1	1
1	1	2	2
1	2	1	3
1	2	2	4
2	1	1	5
2	1	2	6
2	2	1	7
2	2	2	8

Run	1	2	4	8	9	10	11	12	13	14	15
1		1		1	1	1	1	1	1	1	1
2		1		2	2	2	2	2	2	2	2
3		2		1	1	1	1	2	2	2	2
4		2		2	2	2	2	1	1	1	1
5		3		1	1	2	2	1	1	2	2
6		3		2	2	1	1	2	2	1	1
7		4		1	1	2	2	2	2	1	1
8		4		2	2	1	1	1	1	2	2
9		5		1	2	1	2	1	2	1	2
10		5		2	1	2	1	2	1	2	1
11		6		1	2	1	2	2	1	2	1
12		6		2	1	2	1	1	2	1	2
13		7		1	2	2	1	1	2	2	1
14		7		2	1	1	2	2	1	1	2
15		8		1	2	2	1	2	1	1	2
16		8		2	1	1	2	1	2	2	1

Σχήμα 4.4: Αναβάθμιση από δύο σε οχτώ επίπεδα

Στο παράρτημα μπορεί κανείς να αναζητήσει τους σημαντικότερους πίνακες δύο, τριών και μικτών επιπέδων με τα κυριότερα γραμμικά διαγράμματα.

4.5 Διεξαγωγή των πειραμάτων

Η εκτέλεση των πειραμάτων μπορεί να φαίνεται μια βαρετή και καταναγκαστική διαδικασία, ειδικά όταν κάποιος έχει αφιερώσει πολύ χρόνο και προσπάθεια στη φάση του σχεδιασμού του πειράματος, όμως η πραγματικότητα είναι διαφορετική. Ακόμα και στη φάση αυτή πρέπει να ακολουθούνται ορισμένοι κανόνες.

Με το τέλος της φάσης του σχεδιασμού και με τη συμπλήρωση του ορθογώνιου πίνακα καθορίζονται αυτόματα τόσο το πλήθος των διαφορετικών επαναλήψεων όσο και ο συνδυασμός των τιμών των παραγόντων για καθεμιά από αυτές. Μία μεθοδολογία θα ήταν να εκτελεστούν οι επαναλήψεις αυτές με τη σειρά και να συλλεχθούν τα πειραματικά δεδομένα. Παρόλο που κάτι τέτοιο

δεν θα ήταν λάθος, υπάρχουν κάποια σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Προκειμένου να μην οδηγηθούμε σε λανθασμένα συμπεράσματα, στη φάση της διεξαγωγής του πειράματος συνίσταται να λαμβάνονται κάθε φορά υπόψη τα εξής :

1. Σε κάθε επανάληψη πρέπει να λαμβάνονται τουλάχιστον δύο μετρήσεις και να υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί αφ' ενός να εκτιμηθεί το πειραματικό σφάλμα και αφ' ετέρου να εξασφαλιστεί η πιο προσεκτική εκτέλεση των μετρήσεων. Επίσης, μετριάζεται η επίδραση εξωτερικών τυχαίων παραγόντων στο σφάλμα.

2. Οι επαναλήψεις πρέπει να εκτελούνται με τυχαία σειρά και όχι με αυτή που παρουσιάζεται στις γραμμές του ορθογώνιου πίνακα. Αν η μετρητική διάταξη επηρεάζεται από παράγοντες όπως η συχνή χρήση ή από κάποιες υψηλές τιμές των παραγόντων τότε οι τελευταίες μετρήσεις θα εμπεριέχουν μεγαλύτερο σφάλμα από τις πρώτες. Η τυχαία σειρά εκτέλεσης διασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή του συστηματικού σφάλματος στα πειραματικά δεδομένα.

Γενικά η επιτυχημένη χρησιμοποίηση του σχεδιασμού των πειραμάτων βασίζεται σε δύο αρχές. Σύμφωνα με την πρώτη, ακόμα και σε συστήματα πολλών μεταβλητών, τα συστήματα συμπεριφέρονται σύμφωνα μόνο με κάποιες από αυτές, και με κάποιες αλληλεπιδράσεις τους χαμηλής τάξης. Συνεπώς, αρκεί να ελεγχθούν μόνον αυτές, αφού πρώτα αναγνωριστούν. Σύμφωνα με τη δεύτερη, τα αποτελέσματα πειραμάτων κλασματικής παραγοντοποίησης μπορούν να προβληθούν σε πιο πολύπλοκα σχήματα όσον αφορά τους παράγοντες που κρίνονται σημαντικοί. Στην περίπτωση λοιπόν που ο αριθμός των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε ένα πείραμα είναι αρκετά μεγάλος, η προτεινόμενη στρατηγική είναι να χρησιμοποιηθεί ο μικρότερος δυνατός ορθογώνιος πίνακας έτσι ώστε να προσδιοριστούν σε μία πρώτη φάση οι σημαντικότεροι από τους παράγοντες αυτούς. Στη συνέχεια οι παράγοντες που διαχωρίστηκαν λαμβάνονται υπ' όψιν σε ένα δεύτερο σχεδιασμένο πείραμα, το οποίο όμως θα βασίζεται σε ένα μεγαλύτερο ορθογώνιο πίνακα και συνεπώς θα έχει μεγαλύτερη ανάλυση. Με τον παραπάνω τρόπο, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία που ξεκινά από πειράματα με παράγοντες σε δύο επίπεδα και με χαμηλή ανάλυση και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε πειράματα πλήρους παραγοντοποίησης.

4.6 Πεδίο εφαρμογών – πλεονεκτήματα

Όπως έχει γίνει φανερό από τα παραπάνω, ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι μια γενική μεθοδολογία που βρίσκει εφαρμογή σε κάθε περίπτωση εκτέλεσης πειραμάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις διαδικασίες που είναι σημαντικότερες από την χρησιμοποίηση του εργαλείου αυτού :

- ❖ Βελτίωση και βελτιστοποίηση κατασκευαστικών διεργασιών: στις περισσότερες των περιπτώσεων η απόδοση της παραγωγής εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, ελεγχόμενων και μη. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων μπορεί να αναγνωρίσει τους παράγοντες εκείνους που είναι σημαντικοί και να καθορίσει τις τιμές που πρέπει να πάρουν.
- ❖ Βελτίωση σχεδιασμού προϊόντων: ο σχεδιασμός των πειραμάτων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία εναλλακτικών λύσεων και σε συνδυασμό με την υπολογιστική προσομοίωση μέσω πακέτων πεπερασμένων στοιχείων, να περιορίσει δραματικά το χρόνο ανάπτυξης.
- ❖ Βελτίωση συμπεριφορά προϊόντος : το προϊόν μπορεί να σχεδιαστεί και να ελεγχθεί ως προς τη συμπεριφορά του σε ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας και να γίνει έτσι περισσότερο «ανθεκτικό» στις μεταβολές αυτών.

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα, ο σχεδιασμός των πειραμάτων οδηγεί σε :

- ❖ Αυξημένη απόδοση διεργασιών.
- ❖ Μειωμένο κόστος.
- ❖ Μειωμένο απαιτούμενο χρόνο.
- ❖ Μείωση της μεταβλητότητας των προϊόντων και αυξημένη συμφωνία αυτών με τις προδιαγραφές.

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων και οι στατιστικές διαδικασίες που τον συνοδεύουν δεν μπορούν να παράγουν γνώση, αλλά μπορούν να βοηθήσουν στην διεξαγωγή και την οργάνωση της γνώσης που εμπεριέχεται σε μία διεργασία.

4.7 Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

Η φάση της ανάλυσης είναι και η τελευταία του σχεδιασμού των πειραμάτων. Η συλλογή των δεδομένων, ενώ είναι το πιο ορατό κομμάτι ενός πειράματος και θα μπορούσε να θεωρηθεί από κάποιον ως το πιο σημαντικό, εντούτοις είναι το πιο γρήγορο και το πιο εύκολο. Αυτό γιατί η έμφαση στο σχεδιασμό των πειραμάτων δίνεται, στο σχεδιασμό και την λειτουργία του πειράματος ώστε να είναι αποδοτικό της κατασκευής και επεξεργασίας δειγμάτων.

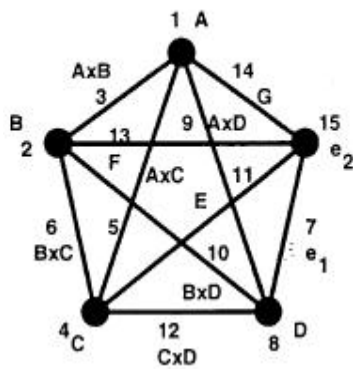
Ύστερα από την συλλογή των δεδομένων ενός καλοσχεδιασμένου πειράματος δεν είναι ασυνήθιστο να βρεθούν τρόποι να εξαχθούν πληροφορίες οι οποίες δεν είχαν ληφθεί υπ' όψιν προηγουμένως. Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων παρατίθενται το ακόλουθο παράδειγμα.

Έστω οι παράγοντες A, B, C, D, E, F, G για τους οποίους έχει βρεθεί ότι επηρεάζουν περισσότερο ένα πρόβλημα (πχ. προκαλούν μειονεκτήματα σε μια κάρτα δεδομένων). Ακόμα μας ενδιαφέρουν και οι έξι αλληλεπιδράσεις αυτών : AxB, AxC, BxC, AxD, BxD, CxD. Αυτοί οι επτά παράγοντες και οι έξι αλληλεπιδράσεις έχουν του ακόλουθους βαθμούς ελευθερίας:

Κύριοι παράγοντες : $(7 \text{ factors}) \times [(2-1)=1 \text{dF/factor}] = 7 \text{ dF}$

Αλληλεπιδράσεις : $(6 \text{ factors}) \times [(1 \times 1)=1 \text{dF/factor}] = 6 \text{ dF}$

Είναι φανερό ότι ο συνολικός αριθμός βαθμών ελευθερίας στο πείραμα είναι 13 και συνεπώς απαιτούνται τουλάχιστον δεκατρείς επαναλήψεις. Καθώς δεν υπάρχει πίνακας L13 θα πρέπει να πάμε στον αμέσως επόμενο, δηλαδή τον L16 ο οποίος έχει 15 βαθμούς ελευθερίας. Το πρώτο βήμα είναι να τοποθετηθούν, με βάση τα γραφήματα, οι παράγοντες στις κατάλληλες στήλες. Χρησιμοποιείται το πρώτο γράφημα καθώς φαίνεται πως οι αλληλεπιδράσεις κατανέμονται ομοιόμορφα ανάμεσα στους παράγοντες. Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το γράφημα καθώς και ο πίνακας με τους παράγοντες (Σχήμα 4.5).



Run no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
	A	B	A	C	A	B	e ₁	D	A	B	E	C	F	G	e ₂
			X		X	X			X	X		X			
		B		C	C				D	D		D			

Σχήμα 4.5: Γράφημα και πίνακας του L16

Το γεγονός ότι οι παράγοντες E και F έχουν τοποθετηθεί σε γραμμές και όχι σε στήλες δεν επηρεάζει το πρόβλημα. Ακόμη παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο άδειες στήλες όπου τοποθετούνται τα σφάλματα e₁ και e₂. Έστω ότι γίνονται τρεις επαναλήψεις του πειράματος με σκοπό να βρισκεται κάθε φορά ο αριθμός των ελαττωμάτων που προκαλούν στην κάθε κάρτα δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 48 κάρτες. Τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις τρεις κάρτες σε κάθε επανάληψη, φαίνονται στον πίνακα 4.2. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του \bar{Y} για κάθε εκτέλεση είναι:

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n}$$

Μιας και βασικό κριτήριο αποτελεί ο αριθμός των ελαττωμάτων (όσο πιο λίγα τόσο το καλύτερο) χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right)$$

Ένα δείγμα των υπολογισμών για το \bar{Y} και το S/N για τις πρώτες τέσσερις εκτελέσεις φαίνεται στον πίνακα 4.3, ενώ τα αποτελέσματα για όλες τις εκτελέσεις του πειράματος φαίνονται στον πίνακα 4.4.

Run no.	Defects per Board			\bar{Y}	S/N
	Y_1	Y_2	Y_3		
1	13	30	26		
2	4	16	11		
3	20	15	20		
4	42	43	64		
5	14	15	17		
6	10	17	16		
7	36	29	53		
8	5	9	16		
9	29	0	14		
10	10	26	9		
11	28	173	19		
12	100	129	151		
13	11	15	11		
14	17	2	17		
15	53	70	89		
16	23	22	7		

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα καρτών

$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n}$
\bar{Y} for run no. 1: $(13 + 30 + 26)/3 = 23.0$
\bar{Y} for run no. 2: $(4 + 16 + 11)/3 = 10.3$
\bar{Y} for run no. 3: $(20 + 15 + 20)/3 = 18.3$
\bar{Y} for run no. 4: $(42 + 43 + 64)/3 = 49.7$
$S/N = -10 \log \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right)$
S/N for run no. 1: $-10 \log [(13^2 + 30^2 + 26^2)/3] = -27.6$
S/N for run no. 2: $-10 \log [(4^2 + 16^2 + 11^2)/3] = -21.2$
S/N for run no. 3: $-10 \log [(20^2 + 15^2 + 20^2)/3] = -25.3$
S/N for run no. 4: $-10 \log [(42^2 + 43^2 + 64^2)/3] = -34.1$

Πίνακας 4.3: Υπολογισμός \bar{Y} και S/N

Run no.	Defects per Board			\bar{Y}	S/N
	Y_1	Y_2	Y_3		
1	13	30	26	23.0	-27.6
2	4	16	11	10.3	-21.2
3	20	15	20	18.3	-25.3
4	42	43	64	49.7	-34.1
5	14	15	17	15.3	-23.7
6	10	17	16	14.3	-23.3
7	36	29	53	39.3	-32.2
8	5	9	16	10.0	-20.8
9	29	0	14	14.3	-25.4
10	10	26	9	15.0	-24.6
11	28	173	19	73.3	-40.2
12	100	129	151	126.7	-42.2
13	11	15	11	12.3	-21.9
14	17	2	17	12.0	-22.9
15	53	70	89	70.7	-37.2
16	23	22	7	17.3	-25.5

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα εκτελέσεων πειραμάτων

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως τα καλύτερα αποτελέσματα ελήφθησαν στην σειρά 8 ενώ τα χειρότερα στην σειρά 12 της εκτέλεσης του πειράματος.

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογισθεί το $\bar{\bar{Y}}$ και το $\bar{\bar{S/N}}$ για κάθε κύριο παράγοντα και αλληλεπίδραση. Ο πίνακας 4.5 είναι αυτός που πρέπει να συμπληρωθεί ενώ στον πίνακα 4.6 υπάρχει ένα δείγμα του τρόπου με τον οποίο γίνονται οι υπολογισμοί. Έτσι έχουμε τον συμπληρωμένο πίνακα 4.7.

Factor	Level	\bar{Y}	S/N
A-prebake	A ₁		
	A ₂		
B-flux density	B ₁		
	B ₂		
-	(AxB) ₁		
	(AxB) ₂		
C-conveyor speed	C ₁		
	C ₂		
	(AxC) ₁		
	(AxC) ₂		
	(BxC) ₁		
	(BxC) ₂		
	e1 ₁		
	e1 ₂		
D-upper preheat	D ₁		
	D ₂		

Factor	Level	$\bar{\bar{Y}}$	$\bar{\bar{S/N}}$
	(AxD) ₁		
	(AxD) ₂		
	(BxD) ₁		
	(BxD) ₂		
E-cooling time	E ₁		
	E ₂		
	(CxD) ₁		
	(CxD) ₂		
F-omega	F ₁		
	F ₂		
G-solder temperature	G ₁		
	G ₂		
	e2 ₁		
	e2 ₂		

Πίνακας 4.5: Πίνακας συμπλήρωσης

<p>Effects for $\bar{\bar{Y}}$:</p> <p>A₁: $\bar{\bar{Y}} = \text{average of } \bar{Y} \text{'s for all runs in which A is at level 1}$ $= (23.0 + 10.3 + 18.3 + 49.7 + 15.3 + 14.3 + 39.3 + 10.0)/8 = 22.5$</p> <p>A₂: $\bar{\bar{Y}} = \text{average of } \bar{Y} \text{'s for all runs in which A is at level 2}$ $= (14.3 + 15.0 + 73.3 + 126.7 + 12.3 + 12.0 + 70.7 + 17.3)/8 = 42.7$</p> <p>B₁: $\bar{\bar{Y}} = (23.0 + 10.3 + 18.3 + 49.7 + 14.3 + 15.0 + 73.3 + 126.7)/8 = 41.3$</p> <p>B₂: $\bar{\bar{Y}} = (15.3 + 14.3 + 39.3 + 10.0 + 12.3 + 12.0 + 70.7 + 17.3)/8 = 23.9$</p>
<p>Effects for $\bar{\bar{S/N}}$:</p> <p>A₁: $\bar{\bar{S/N}} = \text{average of S/N's for all runs in which A is at level 1}$ $= (-27.6 - 21.2 - 25.3 - 34.1 - 23.7 - 23.3 - 32.2 - 20.8)/8 = -26.0$</p> <p>A₂: $\bar{\bar{S/N}} = \text{average of S/N's for all runs in which A is at level 2}$ $= (-25.4 - 24.6 - 40.2 - 42.2 - 21.9 - 22.9 - 37.2 - 25.5)/8 = -30.0$</p> <p>B₁: $\bar{\bar{S/N}} = (-27.6 - 21.2 - 25.3 - 34.1 - 25.4 - 24.6 - 40.2 - 42.2)/8 = -30.1$</p> <p>B₂: $\bar{\bar{S/N}} = (-23.7 - 23.3 - 32.2 - 20.8 - 21.9 - 22.9 - 37.2 - 25.5)/8 = -25.9$</p>

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός $\bar{\bar{Y}}$ και το $\bar{\bar{S/N}}$

Factor	Level	\bar{Y}	S/N
A-prebake	A ₁	22.5	-26.0
	A ₂	42.7	-30.0
B-flux density	B ₁	41.3	-30.1
	B ₂	23.9	-25.9
	(AxB) ₁	26.7	-27.0
	(AxB) ₂	38.5	-29.0
C-conveyor speed	C ₁	14.6	-23.8
	C ₂	50.7	-32.2
	(AxC) ₁	43.9	-30.1
	(AxC) ₂	21.4	-25.9
	(BxC) ₁	25.0	-26.8
	(BxC) ₂	40.3	-29.2
	e ₁₁	38.4	-28.6
	e ₁₂	26.9	-27.4
D-upper preheat	D ₁	33.3	-29.2
	D ₂	31.9	-26.8

Factor	Level	\bar{Y}	S/N
	(AxD) ₁	33.4	-28.0
	(AxD) ₂	31.9	-28.0
	(BxD) ₁	22.8	-26.4
	(BxD) ₂	42.4	-29.6
E-cooling time	E ₁	36.3	-27.9
	E ₂	29.0	-28.1
	(CxD) ₁	33.6	-27.7
	(CxD) ₂	31.7	-28.3
F-omega	F ₁	33.6	-28.9
	F ₂	31.6	-27.1
G-solder temperature	G ₁	43.8	-30.6
	G ₂	21.5	-25.4
	e ₂₁	30.5	-28.7
	e ₂₂	34.7	-27.3

Πίνακας 4.7: Συμπληρωμένος πίνακας αποτελεσμάτων

Ο κανόνας αλληλεπίδρασης είναι : αν οι κύριοι παράγοντες, που συμμετέχουν σε μια αλληλεπίδραση είναι στο ίδιο επίπεδο, τότε η αλληλεπίδραση είναι επιπέδου 1, αν είναι σε διαφορετικό επίπεδο τότε είναι επιπέδου 2. Με άλλα λόγια έχουμε:

$$1 \times 1 = 1$$

$$1 \times 2 = 2$$

$$2 \times 1 = 2$$

$$2 \times 2 = 1$$

Ο αριθμός που βρίσκεται κάτω δεξιά από τις παρενθέσεις στον πίνακα 4.7 δείχνει το επίπεδο στο οποίο αναφέρεται η αλληλεπίδραση. Σε αυτό το σημείο μπορούν να βγουν κάποια συμπεράσματα για τα αποτελέσματα του πειράματος. Βλέποντας τις στήλες 1 e και 2 e παρατηρείται ότι οι διαφορές στα επίπεδα τους είναι πολύ μικρές που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποιος παράγοντας τον οποίο να μην λάβαμε υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό του πειράματος. Στη συνέχεια μπορεί να προχωρήσει η ανάλυση των μεταβλητών. Πρόκειται για μια αρκετά σύνθετη διαδικασία η οποία περιγράφεται παρακάτω με λεπτομέρεια για καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη.

Ο πίνακας 4.8 που ακολουθεί είναι ένας συμπληρωμένος πίνακας ANOVA (analysis of variance).

Factor level	\bar{Y} total	dF	S_x	Pool?	dF _e	S_e	V_x	V_e	F	S_x	P (%)
A ₁	180.3	1	1626.78	no			1626.78		13.22	1503.74	9.4
A ₂	341.7										
B ₁	330.7	1	1213.36	no			1213.36		9.86	1090.32	6.8
B ₂	191.3										
(AxB) ₁	213.7	1	560.11	no			560.11		4.55	437.07	2.7
(AxB) ₂	308.3										
C ₁	116.7	1	5208.03	no			5208.03		42.33	5084.99	31.9
C ₂	405.3										
(AxC) ₁	351.0	1	2025.00	no			2025.00		16.46	1901.96	11.9
(AxC) ₂	171.0										
(BxC) ₁	200.0	1	930.25	no			930.25		7.56	807.21	5.1
(BxC) ₂	322.0										
e ₁₁	307.0	1	529.00	yes	1	529.00	529.00	529.00			
e ₁₂	215.0										
D ₁	266.7	1	8.03	yes	1	8.03	8.03	8.03			
D ₂	255.3										
(AxD) ₁	267.0	1	9.00	yes	1	9.00	9.00	9.00			
(AxD) ₂	255.0										
(BxD) ₁	182.7	1	1534.03	no			1534.03		12.47	1410.99	8.9
(BxD) ₂	339.3										
E ₁	290.3	1	215.11	yes	1	215.11	215.11	215.11			
E ₂	231.7										
(CxD) ₁	268.7	1	14.69	yes	1	14.69	14.69	14.69			
(CxD) ₂	253.3										
F ₁	269.0	1	16.00	yes	1	16.00	16.00	16.00			
F ₂	253.0										
G ₁	350.0	1	1980.25	no			1980.25		16.09	1857.21	11.7
G ₂	172.0										
e ₂₁	244.3	1	69.44	yes	1	69.44	69.44	69.44			
e ₂₂	277.7										
e total					7	861.28		123.04		1845.60	11.6
Total		15	15939.08				1062.61				

Πίνακας 4.8: Πίνακας ANOVA

Η πρώτη στήλη που αναγράφει “Factor level”, είναι η λίστα των παραγόντων και των επιπέδων αυτών. Η δεύτερη στήλη περιέχει το άθροισμα όλων των \bar{Y} για κάθε επίπεδο του κάθε παράγοντα. Για παράδειγμα έχουμε:

$$A_1 = 23.0 + 10.3 + 18.3 + 49.7 + 15.3 + 14.3 + 39.3 + 10.0 = 180.3$$

$$A_2 = 14.3 + 15.0 + 73.3 + 126.7 + 12.3 + 12.0 + 70.7 + 17.3 = 341.7$$

Η επόμενη στήλη στην οποία αναγράφεται ‘dF’ είναι οι βαθμοί ελευθερίας. Για κάθε πείραμα Taguchi ο βαθμός ελευθερίας ενός παράγοντα είναι ίσος με τον αριθμό των επιπέδων του παράγοντα αυτού μείον ένα. Όλοι οι παράγοντες δύο επιπέδων αυτού του πειράματος έχουν ένα βαθμό ελευθερίας.

Η μεταβλητή πηγής, όπως λέγεται, ενός παράγοντα είναι ο ποσοτικός υπολογισμός του μεγέθους της επιρροής του, συναρτήσει των αλλαγών σε κάθε επίπεδο. Συμβολίζεται με S_x και υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$S_x = \left[\frac{X_1^2 + X_2^2}{n/2} \right] - \left[\frac{T^2}{n} \right]$$

όπου,

X_1 = το άθροισμα των τιμών του παράγοντα X στο επίπεδο 1.

X_2 = το άθροισμα των τιμών του παράγοντα X στο επίπεδο 2.

n = ο συνολικός αριθμός των εκτελέσεων.

T = το άθροισμα όλων των τιμών του κάθε παράγοντα.

Για τον παράγοντα A έχουμε :

$$A_1 = 180.3$$

$$A_2 = 341.7$$

$$n = 16$$

$$T = A_1 + A_2 = 180.3 + 341.7 = 522.0$$

και

$$S_A = \left[\left(180.3^2 + 341.7^2 \right) / (16 / 2) \right] - 522.0^2 / 16 = 1626.78$$

Η επόμενη στήλη αναγράφει τον όρο 'pool' και είναι πολύ σημαντική . Για να κατανοηθεί η σημασία της στήλης αυτής πρέπει για λίγο να απομακρυνθούμε από τα δεδομένα μας και να θυμηθούμε τον λόγο για τον οποίο εκτελείται το πείραμα ANOVA. Γίνεται προσπάθεια να καθορισθεί αν κάθε παράγοντας ενός πειράματος είναι σημαντικός συγκρίνοντας τον με την 'ολική' τιμή, η οποία μερικές φορές ονομάζεται μεταβλητή σφάλματος.

Η μεταβλητή σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι να χρησιμοποιηθούν κενές στήλες. Αν δεν έχει «ανατεθεί» παράγοντας σε μια στήλη και αν αυτή δεν επηρεάζει το πείραμα με κανένα τρόπο, τότε αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως στήλη σφάλματος. Εδώ έχουμε δύο στήλες κενές και αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως στήλες σφάλματος.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν στήλες στους οποίους έχουν ανατεθεί παράγοντες οι οποίοι αρχικά θεωρούνταν σημαντικοί, στην πορεία όμως φάνηκε πως ήταν ασήμαντοι. Γενικά, αν η τιμή ενός παράγοντα είναι μικρότερη από αυτή της στήλης σφάλματος ή αν είναι πολύ πιο μικρή από αυτή κάποιων άλλων στηλών, μπορεί να θεωρηθεί 'τυχαία' και μαζί με άλλους ασήμαντους παράγοντες να χρησιμοποιηθεί σαν μια βάση δεδομένων για τον υπολογισμό της τυχαίας τιμής του πειράματος.

Βέβαια η απόφαση για το αν μια τιμή θα πρέπει να θεωρηθεί pooled ή όχι (δηλαδή να απομακρυνθεί) είναι καθαρά υποκειμενική. Υπάρχουν μάλιστα περιπτώσεις όπου δεν αποσύρονται δεδομένα ακόμα και αν η τιμή τους είναι μικρότερη από αυτή της στήλης σφάλματος. Σε πειράματα χωρίς κενές στήλες γίνεται μια εκτίμηση και απομακρύνονται οι λιγότερο σημαντικοί παράγοντες.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα όλες οι τιμές του S_x έχουν συγκριθεί με την μεγαλύτερη, από τις δύο τιμές, των στηλών σφάλματος. Οι τιμές των στηλών σφάλματος είναι 529.00(e_1) και 69.44(e_2). Αν οποιαδήποτε τιμή της στήλης S_x είναι μικρότερη της τιμής 529.00 τότε αυτή απομακρύνεται, δηλαδή θεωρείται 'rooled'. Εδώ είχαμε τους επτά ακόλουθους παράγοντες:

e_1 , D, AxD, E, CxD, F, και e_2

Σε αυτούς τους παράγοντες τοποθετούμε 'yes' στην στήλη που αναγράφει 'rool?'. Οι τιμές τους στη συνέχεια μεταφέρονται στις στήλες 'dF' , για τους βαθμούς ελευθερίας του σφάλματος και ' S_e ' για την πηγή μεταβλητής του σφάλματος. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.8 οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας για τους όρους του σφάλματος είναι 7 και η συνολική πηγή μεταβλητής του σφάλματος είναι 861.28.

Η τιμή της πηγής V_x είναι η μεταβλητή της πηγής διορθωμένη για τους βαθμούς ελευθερίας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_x = \frac{S_x}{dF_x}$$

Μιας και στο συγκεκριμένο πείραμα έχουμε μόνο παράγοντες δύο επιπέδων, όλες οι μεταβλητές πηγής θα είναι οι ίδιες με αυτές της στήλης S_x . Έτσι έχουμε :

$$V_A = \frac{1626.78}{1} = 1626.78$$

$$V_B = \frac{1213.36}{1} = 1213.36$$

Οι τιμές V_x φαίνονται για όλους τους παράγοντες στον πίνακα 3.8, αλλά οι τιμές V_e φαίνονται μόνο για τους παράγοντες που έχουν απομακρυνθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως το συνολικό σφάλμα στο κάτω μέρος της στήλης V_e ισούται με $\frac{S_e}{7}$ ή 123.04.

Στην επόμενη στήλη υπάρχει το λεγόμενο F-πείραμα το οποίο εφαρμόζεται μόνο για τους παράγοντες που δεν έχουν απομακρυνθεί. Πρόκειται για ένα πείραμα σημαντικότητας και ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι :

$$F_x = \frac{V_x}{V_e}$$

Έτσι για παράδειγμα έχουμε:

$$F_A = \frac{1626.78}{123.04} = 13.22$$

$$F_B = \frac{1213.36}{123.04} = 9.86$$

Στη συνέχεια οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις τιμές που φαίνονται στους πίνακες στο παράρτημα. Ενδεικτικά να αναφερθεί πως στο συγκεκριμένο πείραμα ο βαθμός ελευθερίας στον αριθμητή είναι 1 και τον παρανομαστή 7, οπότε η τιμή του F για 95% εμπιστοσύνη είναι 5.59 και από τον πίνακα 4.8 φαίνεται πως οι σημαντικοί παράγοντες είναι οι:

A, B, C, AxC, BxC, BxD, και G

Για 99% εμπιστοσύνη έχουμε 12.25 και σε αυτό το επίπεδο οι σημαντικοί παράγοντες είναι οι :

A, C, AxC, BxD, και G

δηλαδή, οι παράγοντες των οποίων οι τιμές βρίσκονται πάνω από τις αντίστοιχες που παίρνουμε από τους πίνακες. Στην επόμενη στήλη υπάρχει η καθαρή τιμή της μεταβλητής S_x η οποία υπολογίζεται μόνο για παράγοντες που δεν έχουν απομακρυνθεί. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι :

$$S_x = S_x - (dF \times V_e)$$

Για παράδειγμα έχουμε:

$$S_A = 1626.78 - (1)(123.04) = 1503.74$$

$$S_B = 1213.36 - (1)(123.04) = 1090.32$$

Εν συνεχεία στην τελευταία στήλη υπολογίζεται η επί τοις εκατό συμμετοχή του κάθε παράγοντα στο συνολικό αποτέλεσμα. Να τονιστεί ότι υπολογίζεται μόνο για τους παράγοντες που δεν έχουν απομακρυνθεί. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι:

$$\rho_x = \left(\frac{S'_x}{S_T} \right) (100\%)$$

Για παράδειγμα έχουμε:

$$\rho_A = \frac{1503.74}{15939.08} = 9.4\%$$

$$\rho_B = \frac{1090.32}{15939.08} = 6.8\%$$

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα 3.8 ο παράγοντας που συμμετείχε περισσότερο στο αποτέλεσμα, κατά 31.9%, είναι ο C και οι αμέσως επόμενοι, η αλληλεπίδραση AxC και ο παράγοντας G. Σε κάθε πείραμα, το συνολικό ποσοστό από την άθροιση των ποσοστών των παραγόντων ποτέ δεν είναι το 100%. Η επιτυχία του πειράματος εξαρτάται από το κατά πόσο βρισκόμαστε κοντά 100% και στο συγκεκριμένο πείραμα το ποσοστό 88.4% είναι αρκετά ικανοποιητικό ώστε να μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής. Να τονιστεί ότι ο αριθμός 11.6 στο τέλος της στήλης ρ είναι η διαφορά από το 100 του αθροίσματος των παραγόντων της στήλης ρ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 4.8 φαίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν το πρόβλημα είναι οι :

$A_1, B_2, C_1, D_2, E_2, F_2$ και G_2

και οι αλληλεπιδράσεις,

$(A \times B)_1, (A \times C)_2, (B \times C)_1, (B \times D)_1$

Παρατηρείται λοιπόν πως για όλους τους παράγοντες η επιρροή τους στο πείραμα φαίνεται παρακάτω:

- A) 9.4%
- B) 6.8%
- C) 31.9%
- D) Pooled
- E) Pooled
- F) Pooled
- G) 11.7%
- H) 8.9%

Βελτιστοποιώντας τους παράγοντες αυτούς θα εμφανίζονται τα καλύτερα αποτελέσματα στο πρόβλημα που εξετάζεται, δηλαδή λιγότερα μειονεκτήματα στην κάρτα δεδομένων.

Κεφάλαιο 5 **Σχεδιασμός των πειραμάτων κοπής του σκαφιδίου**

5.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός της κοπής του σκαφιδίου θα γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού SolidCAM. Οι παράγοντες που θα καθορίσουν την καλύτερη μέθοδο κοπής είναι:

- ❖ Ο χρόνος κοπής
- ❖ Ο όγκος του υλικού που απομένει και

Μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης που διαθέτει το πρόγραμμα SolidCAM μπορούν με βάση τα παραπάνω κριτήρια να συλλεχθούν δεδομένα τα οποία θα επεξεργαστούν για να βρεθεί η βέλτιστη στρατηγική. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κοπής θα προκύψουν από την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας (analysis of variance - ANOVA).

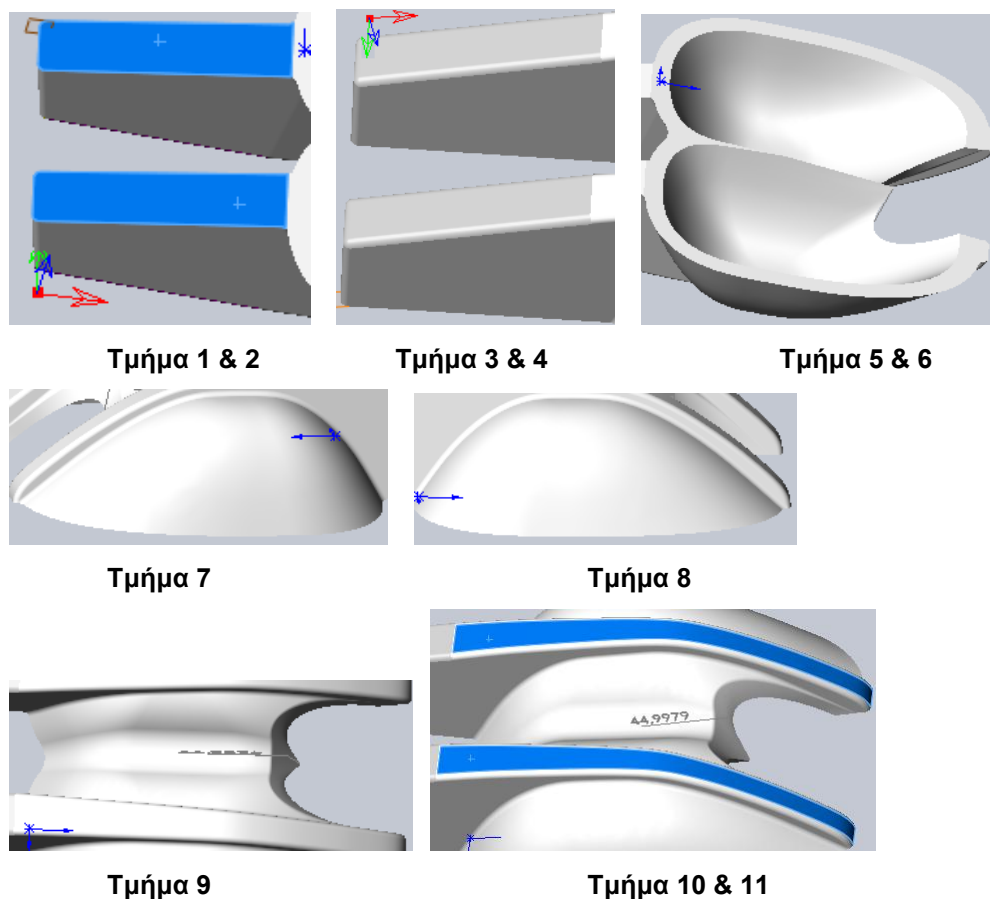
Σε κάθε περιοχή θα μελετηθεί ξεχωριστά η εκχόνδριση και η αποπεράτωση του τεμαχίου. Κατά τη διαδικασία της εκχόνδρισης αφαιρείται από το τεμάχιο βασικός όγκος υλικού και δίνεται στο τεμάχιο η πρώτη του μορφή. Στην διαδικασία της αποπεράτωσης το τεμάχιο αποκτά την τελική του μορφή δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις καθώς και την ποιότητα στην επιφάνεια.

5.2 Διαχωρισμός τεμαχίου σε τμήματα

Για μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια αποτελεσμάτων το σκαφίδιο χωρίστηκε σε έντεκα τμήματα έτσι ώστε να επεξεργαστεί το κάθε ένα ξεχωριστά. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Αναλυτικότερα το τμήμα 1 και 2 αποτελεί το πάνω μέρος των “δοντιών”, το τμήμα 3 και 4 το κάτω μέρος των “δοντιών”, το τμήμα 5 και 6 το κυρτό μέρος των “κουταλιών”, το τμήμα 7 το αριστερό κοίλο του “κουταλιού”, το τμήμα 8 το δεξί κοίλο του

“κουταλιού”, το τμήμα 9 την περιοχή ανάμεσα στα κοίλα μέρη του κουταλιού και το τμήμα 20 και 11 τις “καρίνες”.

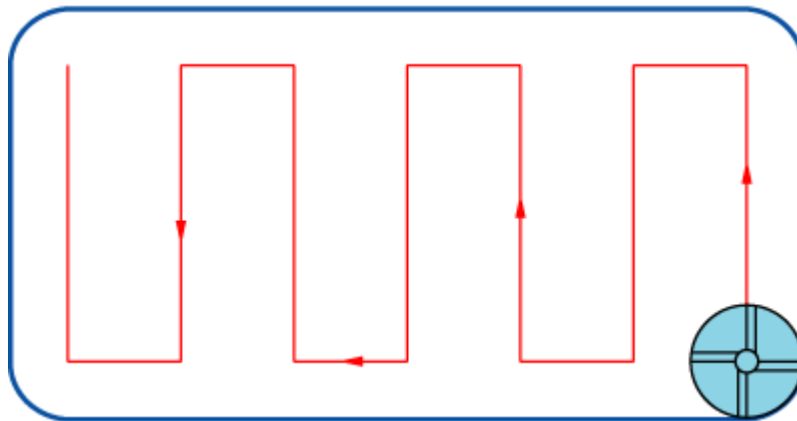
Λόγω της συμμετρίας αρκετών τμημάτων δεν θα διεξαχθούν πειράματα για όλα τα τμήματα. Συνεπώς τα τμήματα για τα οποία σχεδιαστεί η κοπή είναι τα: 1, 3, 5, 7, 9, 10. Στα υπόλοιπα τμήματα θα εφαρμοστεί η βέλτιστη στρατηγική που έχει προκύψει για το αντίστοιχο συμμετρικό τους τμήμα.



Σχήμα 5.1: Ο διαχωρισμός του τεμαχίου σε τμήματα

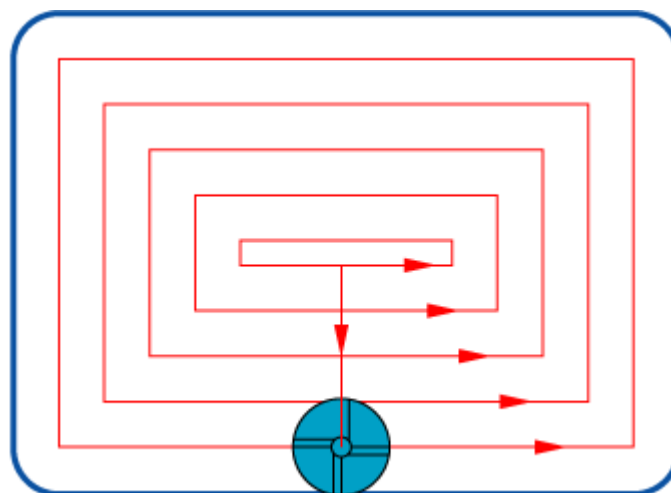
5.3 Διαδικασία εκχόνδρισης

Η εκχόνδριση του τεμαχίου μπορεί να γίνει με δύο στρατηγικές. Η μία στρατηγική είναι η **Hatch** και η άλλη η **Contour**. Η στρατηγική Hatch δημιουργεί μία γραμμική πορεία στο εργαλείο η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Στρατηγική Hatch

Η στρατηγική Contour δίνει στο SolidCAM την δυνατότητα να παράγει Constant-Z rockets σε διάφορα Z-επίπεδα. Μέσα στα rockets το εργαλείο κινείται σε κάθε βήμα σε παράλληλα offsets από το περίγραμμα του τμήματος του τεμαχίου. Στο σχήμα 5.3 απεικονίζει την στρατηγική Contour.



Σχήμα 5.3: Στρατηγική Hatch

5.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις στρατηγικές κοπής

Και στις δύο στρατηγικές υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την κοπή. Προκειμένου να διαπιστωθεί ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την κοπή του σκαφιδίου έγιναν πάρα πολλές δοκιμές και μετρήσεις. Με βάση τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει,

διαπιστώθηκε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την κοπή είναι οι παρακάτω:

- Overlap
- Step Down
- Mode

Ο παράγοντας Overlap είναι η απόσταση ή αλλιώς βήμα μεταξύ δύο οριζοντίων διαδοχικών τροχιών του κοπτικού εργαλείου. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την διάμετρο του κοπτικού εργαλείου, για παράδειγμα με διάμετρο κοπτικού 10 και overlap 0,7 σημαίνει ότι η επόμενη οριζόντια κίνηση του εργαλείου θα είναι με βήμα 3.

Ο επόμενος παράγοντας είναι το πάχος υλικού που αφήνει το κοπτικό εργαλείο καθώς κόβει. Όπως θα δειχθεί και κατά την διάρκεια του πειράματος, για διαφορετικές διαμέτρους κοπτικού εργαλείου το πάχος παίζει σημαντικό ρόλο στο χρόνο καθώς και στο υλικό που απομένει. Το stepdown είναι μια από τις επιλογές των Z heights, δηλαδή αναφέρεται στον αριθμό των επιπέδων–στρωμάτων (των λεγόμενων ‘πάσων’), κατά τον άξονα z, στα οποία θα χωριστεί το αρχικό τεμάχιο και κατά τα οποία θα κινηθεί το κοπτικό εργαλείο.

Με τον παράγοντα Mode δίνεται η δυνατότητα στο SolidCAM να εντοπίσει τις open pocket περιοχές και να τις κόψει μία συγκεκριμένη στρατηγική. Αυτή η στρατηγική δίνει τη δυνατότητα να συνδυαστούν pocket και profile βήματα εργαλείου έτσι ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή παραγωγικότητα στην κοπή open pocket περιοχών.

5.4 Διαδικασία αποπεράτωσης

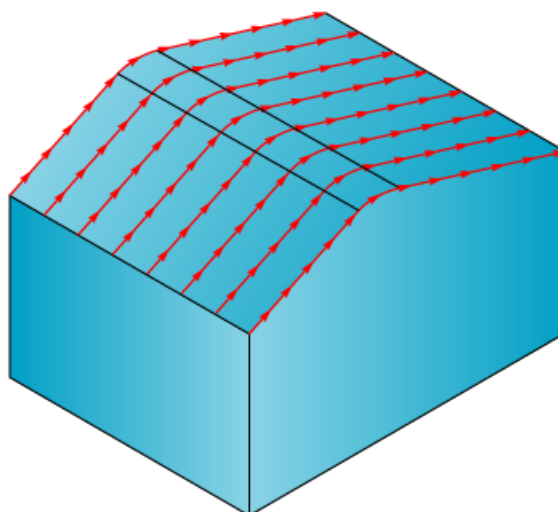
Η αποπεράτωση είναι ένα είδος κοπής που ακολουθεί την εκχόνδριση και προσδίδει στο τεμάχιο τις τελικές του διαστάσεις και φυσικά την ποιότητα της επιφάνειας που επιθυμούμαι κάθε φορά. Οι σημαντικότερες μέθοδοι αποπεράτωσης που θα χρησιμοποιηθούν στην αποπεράτωση του σκαφιδίου είναι η **Linear**, η **Constant-Z** και η **Constant StepOver**.

Στην αποπεράτωση κάθε τμήματος δεν θα χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι, θα χρησιμοποιηθούν αυτές που έχουν διαπιστωθεί ότι επηρεάζουν

περισσότερο την κοπή ως προς τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η κάθε μέθοδος ξεχωριστά καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του κάθε τμήματος, οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή δεν θα είναι ίδιοι για κάθε τμήμα. Παρακάτω αναφέρονται συνολικά οι παράγοντες που θα εξεταστούν στην αποπεράτωση του τεμαχίου. Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν θα ασχοληθούμε με την εκχόνδριση και την αποπεράτωση κάθε τμήματος ξεχωριστά και εκεί θα αναφερθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποπεράτωση του κάθε τμήματος.

5.4.1 Στρατηγική Linear

Χρησιμοποιώντας τη Linear στρατηγική δημιουργούνται γραμμές ενός γραμμικού προτύπου σε δισδιάστατο επίπεδο πάνω από το μοντέλο. Στη συνέχεια αυτό το γραμμικό πρότυπο εφαρμόζεται στο τρισδιάστατο μοντέλο. Κατά τη διάρκεια αυτής της εφαρμογής υπολογίζεται η θέση του εργαλείου στον Z-άξονα έτσι ώστε να αποφευχθούν αστοχίες στο υλικό. Στο σχήμα 5.4 απεικονίζεται η μέθοδος Linear.



Σχήμα 5.4: Η μέθοδος Linear

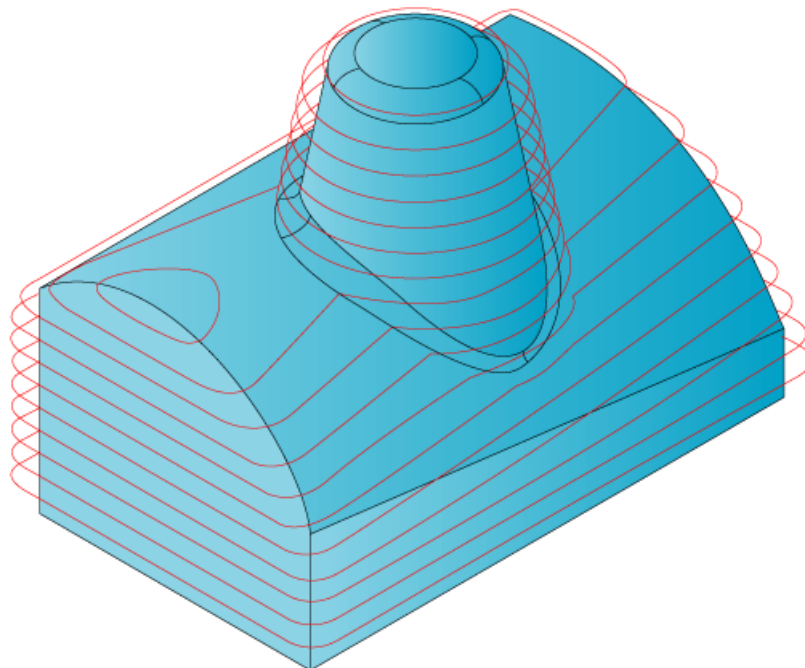
Οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την διαδικασία της αποπεράτωσης του σκαφιδίου είναι:

- Scallop
- Maximum StepOver
- Angle

Ο πρώτος παράγοντας ρυθμίζει την απόσταση μεταξύ των βημάτων του εργαλείου. Ο δεύτερος παράγοντας ή αλλιώς το βήμα μεταξύ δύο οριζοντίων διαδοχικών τροχιών του κοπτικού εργαλείου. Και ο τρίτος παράγοντας είναι η γωνία κατά την οποία προσανατολίζεται το κοπτικό εργαλείο κατά την αποπεράτωση.

5.4.2 Στρατηγική Constant – Z

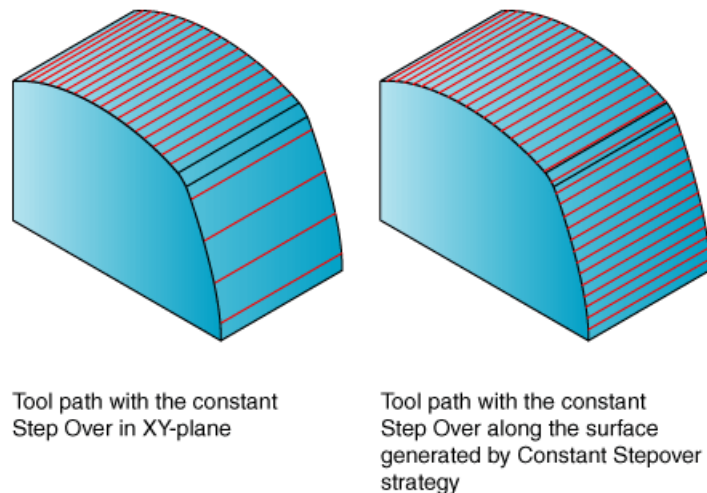
Η στρατηγική αυτή παράγει πολύ υψηλής ποιότητας φινίρισμα ειδικά σε απότομες επιφάνειες και ελαχιστοποιεί την πλήρη κίνηση στους τρεις άξονες η οποία επιβραδύνει τις μεγάλες μηχανές και τους ελεγκτές. Ο παράγοντας Scallop, ο οποίος είναι ο μόνος που επηρεάζει το φινίρισμα του σκαφιδίου, προσαρμόζει τα αναγκαία βήματα του εργαλείου στον Z-άξονα στην επιφάνεια και μειώνει τους χρόνους κατεργασίας. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η στρατηγική Constant Z.



Σχήμα 5.5: Η μέθοδος Constant-Z

5.5 Η μέθοδος Constant StepOver

Μέσω της στρατηγικής Constant StepOver επιτυγχάνεται μία εξαιρετικής ποιότητας επιφάνεια διότι ο παράγοντας Step Over είναι σταθερός κατά μήκος όλων των επιφανειών ανεξάρτητα από το αν είναι κάθετα τοιχώματα ή ρηχές περιοχές. Η στρατηγική αυτή δημιουργεί ένα δισδιάστατο βήμα στο εργαλείο, με σταθερό Step Over, πάνω σε ένα επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο XY του τρέχοντος συστήματος συντεταγμένων. Αυτό το δισδιάστατο βήμα του εργαλείου στη συνέχεια εφαρμόζεται στο τρισδιάστατο μοντέλο και έτσι δημιουργείται το τρισδιάστατο βήμα του εργαλείου. Αυτή η μέθοδος παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις πρισματικές κατεργασίες αλλά έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα στις κατεργασίες καμπύλων επιφανειών, διότι δε λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα της επιφάνειας. Στο σχήμα 5.6 απεικονίζεται η μέθοδος Constant StepOver.



Σχήμα 5.6: Η μέθοδος Constant StepOver

Ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την κοπή είναι ο παράγοντας Step Over. Ο παράγοντας αυτός καθορίζει το βήμα μεταξύ δύο διαδοχικών τροχιών του κοπτικού εργαλείου

Κεφάλαιο 6

Σχεδιασμός κοπής κάτω τμήματος δοντιού

6.1 Εκχόνδριση

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εκχόνδριση μπορεί να γίνει με δύο στρατηγικές. Η μία είναι η Hatch και η άλλη είναι η Contour. Και οι δύο περιπτώσεις θα εξεταστούν με διάμετρο εργαλείου $D=20$. Κατά την εκχόνδριση θεωρείται πιο σημαντικός ο χρόνος κοπής από τον όγκο του υλικού που απομένει.

6.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα

Η επιλογή των επιπέδων των παραγόντων είναι μία διαδικασία εξίσου σημαντική και χρονοβόρα, όπως και η επιλογή των παραγόντων. Έχουν προηγηθεί πολλές μετρήσεις και πειράματα προκειμένου να καθοριστούν οι οριακές και μη τιμές που συμβάλλουν καθοριστικά στο αποτέλεσμα, τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει στην συγκεκριμένη περίπτωση. Συνεπώς πριν την επιλογή τους έχει προηγηθεί εκτενής ανάλυση όλων των δυνατών συνδυασμών τους, έτσι ώστε να προκύψουν οι τιμές που αναφέρονται στη συνέχεια. Οι τιμές αυτές παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων, και οποιαδήποτε αλλαγή τους έχει μικρή έως ελάχιστη επιρροή σε αυτά, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι παράγοντες με τα αντίστοιχα επίπεδα τους.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Step Down	1	1,5	2
Mode	Pockets	Profiles	Pockets + Profiles

Πίνακας 6.1: Παράγοντες και επίπεδα παραγόντων για την εκχόνδριση

Προκειμένου να αρχίσει η διεξαγωγή των πειραμάτων πρέπει πρώτα να επιλεγεί ο κατάλληλος ορθογώνιος πίνακας. Όπως παρατηρείται στον

πίνακα 6.1 οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή είναι δύο και ο καθένας από αυτούς έχει τρία επίπεδα.

Ο ορθογώνιος πίνακας που θα επιλεγεί πρέπει να έχει τουλάχιστον δύο στήλες. Σύμφωνα με το παράρτημα ο κατάλληλος ορθογώνιος πίνακας είναι ο L9. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι θα υπάρχει μικρή ανάλυση. Οι παράγοντες Step Down και Mode τοποθετούνται στις στήλες 1 και 2 αντίστοιχα. Απομονώνοντας τις στήλες που μας ενδιαφέρουν προκύπτει ο πίνακας 6.2 ο οποίος δείχνει τον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται τα διάφορα επίπεδα των παραγόντων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων για αυτό και μπορούν να αγνοηθούν. Σε περίπτωση που υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση θα φανεί στη συνέχεια, στην ανάλυση ευαισθησίας (ANOVA).

Στήλη	1	2
Παράγοντας/ Επανάληψη	Step Down	Mode
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Πίνακας 6.2: Πίνακας L9

Αντικαθιστώντας στον πίνακα 6.2 τα επίπεδα των παραγόντων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Στήλη	1	2
Παράγοντας/ Επανάληψη	Step Down	Mode
1	1	Pockets
2	1	Profiles
3	1	Pockets + Profiles
4	1,5	Pockets
5	1,5	Profiles
6	1,5	Pockets + Profiles
7	2	Pockets
8	2	Profiles
9	2	Pockets + Profiles

Πίνακας 6.3: Πίνακας πειραμάτων για την εκχόνδριση

Με βάση τον παραπάνω πίνακα εκτελούνται τα πειράματα για την στρατηγική Hatch και Contour. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	02':04"	907686.291
2	00':47"	907605.079
3	02':26"	907659.931
4	01':22"	908021.532
5	00':31"	907856.864
6	01':36"	907987.954
7	00':59"	908335.057
8	00':23"	908246.175
9	01':11"	908288.835

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα κοπής της στρατηγικής Hatch

Επανάληψη	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
α/α	t (min)	V (mm ³)
1	01':27"	907686.299
2	00':47"	907605.079
3	01':57"	907685.925
4	00':58"	908021.534
5	00':31"	907856.864
6	01':18"	908021.412
7	00':43"	908335.073
8	00':23"	908246.175
9	00':57"	908334.95

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα κοπής της στρατηγικής Contour

6.1.2 Εφαρμογή μεθόδου βελτιστοποίησης

6.1.2.1 Μέθοδοι και δείκτες βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιγράφεται γενικά από τον δείκτη βελτιστοποίησης I :

$$I = (P_1, P_2, \dots, P_N) = MIN$$

όπου P_1, P_2, \dots, P_N οι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται ο I . Παράλληλα με την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούνται και οι ανισοτικοί περιορισμοί g :

$$g_k(P_1, P_2, \dots, P_N) \leq 0$$

Από τις σχέσεις αυτές παίρνουμε τη λεγόμενη συνάρτηση ποινής L (penalty function):

$$L(P_1, P_2, \dots, P_N) = I + \sum_{k=1}^k \lambda_k * (g_k)_+ = MIN$$

όπου λ_k είναι θετικοί συντελεστές που καλούνται και ως συντελεστές Lagrange, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται με την ονομασία συντελεστές βαρύτητας. Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου διανύσματος:

$$P_{opt}^T = (P_1, P_2, \dots, P_N)_{opt}$$

εφαρμόζονται μέθοδοι παραμετρικής βελτιστοποίησης.

6.1.2.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση

Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση κοπής χρησιμοποιείται η συνάρτηση ποινής. Στην εκχόνδριση της περιοχής του κάτω μέρους του δοντιού μεγαλύτερη βαρύτητα έχει ο χρόνος κοπής από τον εναπομείναντα όγκο του υλικού. Η συνάρτηση ποινής που θα ελαχιστοποιεί τον χρόνο κοπής και τον όγκο του υλικού που απομένει είναι η παρακάτω:

$$L[(t, V), \kappa, \lambda] = \kappa * t + \lambda * V = MIN$$

όπου κ , λ είναι οι συντελεστές που καθορίζουν την βαρύτητα των παραγόντων του χρόνου κοπής και του εναπομείναντος όγκου. Για την κατεργασία της εκχόνδρισης ο χρόνος κοπής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα για αυτό και οι συντελεστές αυτοί ορίζονται ως εξής:

$$\kappa=0,7$$

$$\lambda=0,3$$

Επειδή οι δύο παράγοντες είναι διαφορετικά μεγέθη θα πρέπει να γίνει μετατροπή έτσι ώστε να βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους. Έτσι ο χρόνος κοπής μετατρέπεται σε αριθμό, δηλ. τα 07':58" μετατρέπονται σε 7,58, και ο όγκος του υλικού μετατρέπεται σε m^3 .

Η συνάρτηση ποινής εφαρμόζεται για κάθε μία από τις 9 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της για κάθε μία από τις στρατηγικές Hatch και Contour παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	273,7338873
2	272,6105237
3	273,8799793
4	273,2604596
5	272,5740592
6	273,3483862
7	272,9135171
8	272,6348525
9	273,2636505

Πίνακας 6.6: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Hatch

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	273,1948897
2	272,6105237
3	273,4047775
4	272,8124602
5	272,5740592
6	273,2324236
7	272,8015219
8	272,6348525
9	272,899485

Πίνακας 6.7: Συνάρτηση ποινής για την στρατηγική Contour

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ποινής και στις δύο στρατηγικές είναι ίδια και είναι η 5^η επανάληψη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει σημασία ποια από τις δύο στρατηγικές θα επιλεγεί για την διαδικασία της εκχόνδρισης αφού τα αποτελέσματα θα είναι ίδια. Συνεπώς επιλέγεται η στρατηγική Contour.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δύο στρατηγικών κοπής. Με ανοιχτό χρώμα είναι οι στήλες στις οποίες αντιστοιχεί η ελάχιστη τιμή.



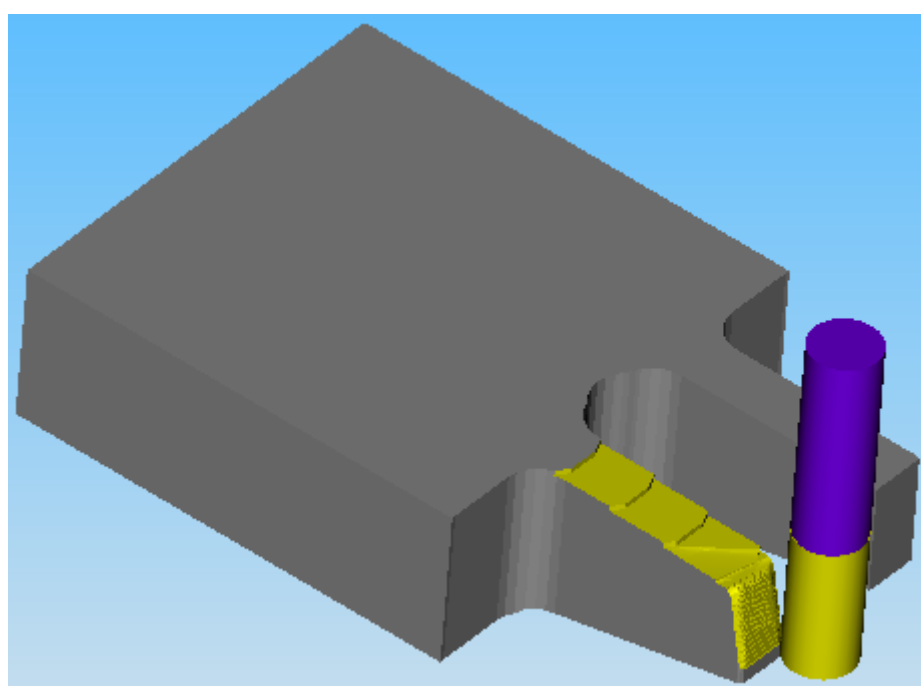
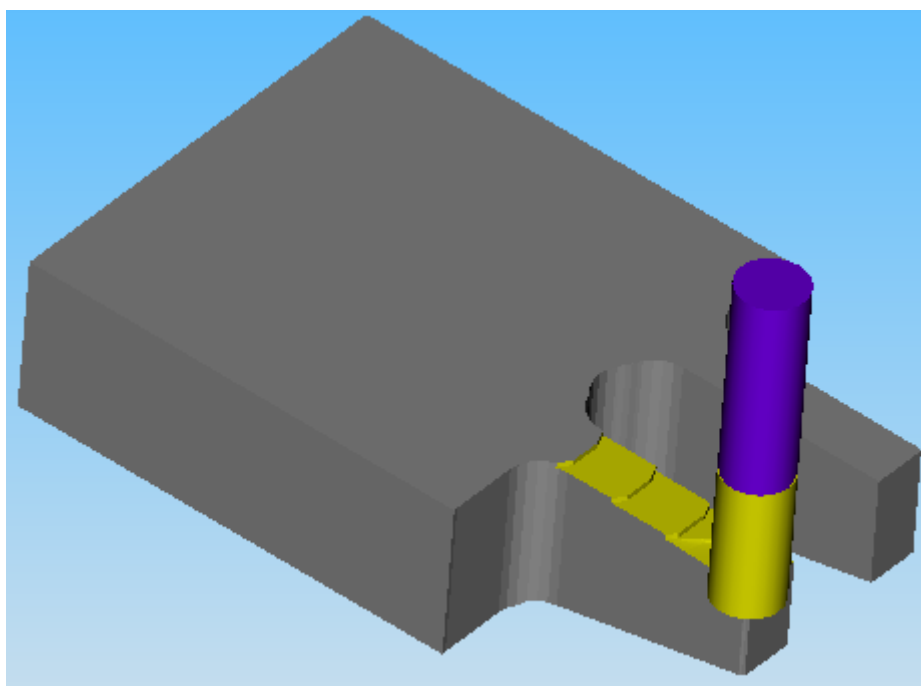
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής στρατηγικής Hatch



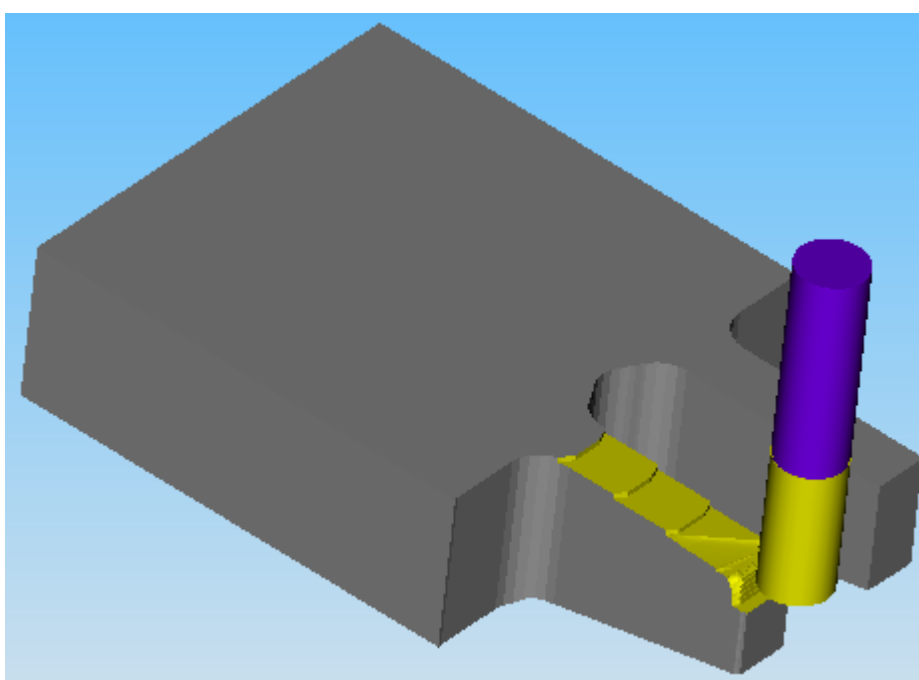
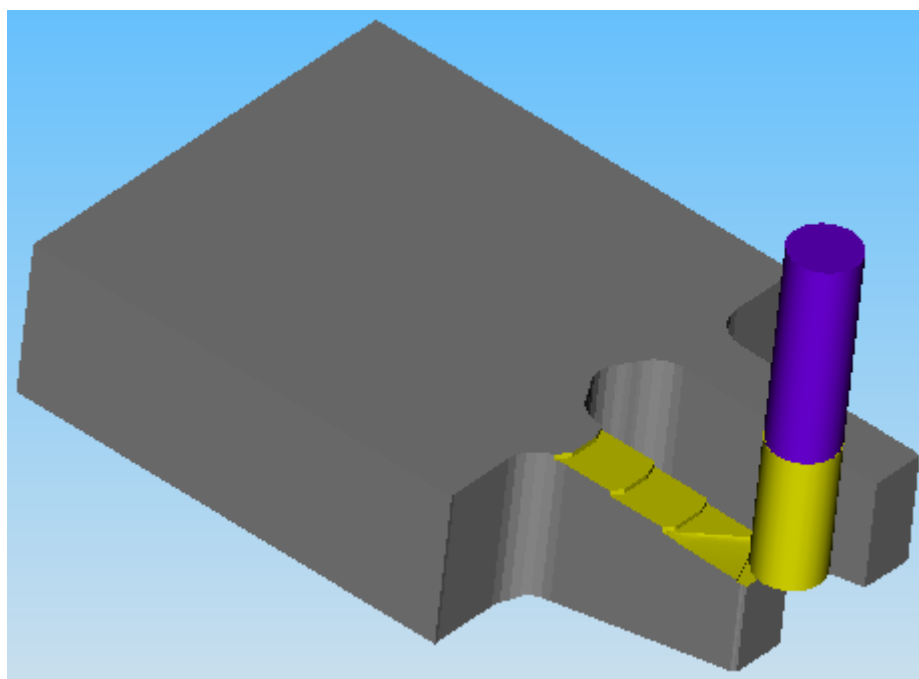
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής στρατηγικής Contour

Ακολουθούν κάποιες εικόνες από την κατεργασία του τεμαχίου στο SolidCAM.

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ HATCH



ΣΡΑΤΗΓΙΚΗ CONTOUR



6.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης

Η συνάρτηση ποινής μας δίνει τη βέλτιστη λύση όμως δε μας δίνει το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την κοπή και σε ποιο βαθμό. Αυτά τα συμπεράσματα εξάγονται εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας.

Ο πίνακας που πρέπει να συμπληρωθεί είναι ο πίνακας 6.11. Αρχικά, όμως πρέπει να προσδιοριστεί ο παράγοντας Y , ο οποίος προκύπτει από μία συνάρτησης συσχέτισης του χρόνου κοπής και του όγκου του υλικού που απομένει. Απαιτείται, λοιπόν, η δημιουργία της συνάρτησης αυτής.

Ο χρόνος κοπής μετριέται σε second και ο όγκος του υλικού που απομένει μετριέται σε mm³. Διαπιστώνεται ότι οι παράγοντες αυτοί είναι ανόμοιοι για αυτό το λόγο πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος έτσι ώστε να μπορούν να συσχετιστούν. Αυτός είναι η επί τοις εκατό μετατροπή των παραγόντων αυτών.

Βασιζόμενοι στους πίνακες 6.8 και 6.5 προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες όπου φαίνεται η μετατροπή των παραγόντων σε ποσοστά καθώς και ο υπολογισμός του Y για κάθε μία από τις στρατηγικές εκχόνδρισης.

Επανάληψη α/α	A	B	C	D	E
	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	124	907686,3	82,67	99,9104	88,41
2	47	907605,1	31,33	99,9015	54,19
3	146	907659,9	97,33	99,9075	98,19
4	82	908021,5	54,67	99,9473	69,76
5	31	907856,9	20,67	99,9292	47,09
6	96	907988	64,00	99,9436	75,98
7	59	908335,1	39,33	99,9818	59,55
8	23	908246,2	15,33	99,9721	43,55
9	71	908288,8	47,33	99,9768	64,88

Πίνακας 6.9: Υπολογισμός Y στρατηγικής Hatch

Στη στρατηγική Hatch οι τύποι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E αντίστοιχα, φαίνονται παρακάτω :

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 150) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 908500) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	87	907686,3	72,50	99,9104	81,64
2	47	907605,1	39,17	99,9015	59,41
3	117	907685,9	97,50	99,9104	98,30
4	58	908021,5	48,33	99,9473	65,54
5	31	907856,9	25,83	99,9292	50,53
6	78	908021,4	65,00	99,9473	76,65
7	43	908335,1	35,83	99,9818	57,22
8	23	908246,2	19,17	99,9721	46,10
9	57	908335	47,50	99,9818	64,99

Πίνακας 6.10: Υπολογισμός Y στρατηγικής Contour

Στη στρατηγική Contour οι τύποι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E αντίστοιχα, φαίνονται παρακάτω :

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 120) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 908500) * 100$$

Αφού έχει υπολογιστεί το Y μπορούν τώρα να συμπληρωθούν οι στήλες του πίνακα ANOVA. Η πρώτη στήλη είναι η Factor Level η οποία αποτελεί μία λίστα των παραγόντων και των επιπέδων αυτών. Ενδεικτικά η συμπλήρωση της στήλης γίνεται ως εξής:

$$A_1 = 88,41 + 54,19 + 98,19 = 240,80$$

$$A_2 = 69,76 + 47,09 + 75,98 = 192,83$$

$$A_3=59,55+43,55+64,88=167,98$$

Μιας και όλοι οι παράγοντες είναι τριών επιπέδων οι βαθμοί ελευθερίας θα είναι δύο όπως φαίνεται στην στήλη 'dF'. Ο πίνακας της μεταβλητής πηγής της επόμενης στήλης συμπληρώνεται με βάση τη σχέση :

$$S_x = \left[\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2}{n/3} \right] - \left[\frac{T^2}{n} \right]$$

όπου X_i ο παράγοντας A_i , $n=9$ και $T = \sum X_i$. Οπότε έχουμε:

$$S_A = \left[\frac{240,80^2 + 192,83^2 + 167,98^2}{9/3} \right] - \left[\frac{240,80 + 192,83 + 167,98}{9} \right]$$

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.7 συμπληρώνεται και η επόμενη στήλη που αναγράφει 'root'. Σημειώνονται ο τρεις παράγοντες που αντιστοιχούν στις στήλες σφάλματος e_1 , e_2 , e_3 και τοποθετείται 'yes' δίπλα σε όλους τους παράγοντες της στήλης S_x των οποίων οι τιμές είναι μικρότερες από τις τιμές των στηλών σφάλματος. Έτσι εδώ, όποια τιμή είναι μικρότερη από 70.10 θεωρείται 'rooted' και ανγράφεται 'yes'. Οι τιμές τους στη συνέχεια μεταφέρονται στις στήλες 'dF', για τους βαθμούς ελευθερίας του σφάλματος και ' S_e ' για την πηγή μεταβλητής του σφάλματος.

Στην συνέχεια συμπληρώνεται η τιμή της πηγής V_x με βάση τη σχέση:

$$V_x = \frac{S_x}{dF_x}$$

Οπότε έχουμε:

$$V_A = \frac{913,44}{2} = 456,72$$

$$V_B = \frac{1627,66}{2} = 813,83$$

Οι τιμές V_x αναγράφονται για όλους τους παράγοντες ενώ οι τιμές V_e αναγράφονται μόνο για τους παράγοντες που έχουν απομακρυνθεί. Το συνολικό σφάλμα στο κάτω μέρος της στήλης V_e ισούται με $\frac{S_e}{2}$ ή 74,58.

Για το λεγόμενο F-test χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$F_x = \frac{V_x}{V_e}$$

Οπότε έχουμε:

$$F_A = \frac{456,72}{74,58} = 6,12$$

$$F_B = \frac{813,83}{74,58} = 10,91$$

Στην επόμενη στήλη υπάρχει η καθαρή τιμή της μεταβλητής S_x η οποία υπολογίζεται μόνο για παράγοντες που δεν έχουν απομακρυνθεί. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι :

$$S_x = S_x - dF \times V_e$$

Για παράδειγμα έχουμε:

$$S_A = 913,44 - 2 \times 74,58 = 764,29$$

$$S_B = 1627,66 - 2 \times 74,58 = 12478,51$$

Εν συνεχεία στην τελευταία στήλη υπολογίζεται η επί τοις εκατό συμμετοχή του κάθε παράγοντα στο συνολικό αποτέλεσμα. Να τονιστεί ότι υπολογίζεται μόνο για τους παράγοντες που δεν έχουν απομακρυνθεί. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι :

$$\rho_x = \left(\frac{S'_x}{S_T} \right) (100\%)$$

Για παράδειγμα έχουμε:

$$\rho_A = \frac{764,29}{2690,25} \% = 28,41\%$$

$$\rho_B = \frac{1478,51}{2690,25} \% = 54,96\%$$

Σε κάθε πείραμα, το συνολικό ποσοστό από την άθροιση των ποσοστών των παραγόντων ποτέ δεν είναι το 100%. Η επιτυχία του πειράματος εξαρτάται από το κατά πόσο βρισκόμαστε κοντά στο 100%.

Η ανάλυση ευαισθησίας για την κάθε στρατηγική φαίνεται στους πίνακες της επόμενης σελίδας.

Σχεδιασμός κοπής κάτω τμήματος δοντιού

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	240,80	2	913,44	no			456,72		6,12	764,29	28,41
A2	192,83										
A3	167,98										
B1	217,72	2	1627,66	no			813,83		10,91	1478,51	54,96
B2	144,82										
B3	239,05										
(AxB)1	200,38	2	79,06	yes	2	79,06	39,53	79,06			
(AxB)2	189,72										
(AxB)3	211,50										
e1	207,94	2	70,10	yes	2	70,10	35,05	70,10			
e2	188,83										
e3	204,83										
e Total					4	149,15		74,58			
Total		8	2690,25				1345,12			2242,79	16,63

Πίνακας 6.11: Ανάλυση ευαισθησίας στρατηγικής Hatch

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	239,35	2	868,56	no			434,28		8,43	765,55	35,54
A2	192,72										
A3	168,31										
B1	204,39	2	1182,32	no			591,16		11,48	1079,31	50,11
B2	156,05										
B3	239,95										
(AxB)1	197,16	2	50,69	no		50,69	25,35	50,69			
(AxB)2	193,28										
(AxB)3	209,94										
e1	204,39	2	52,32	yes	2	52,32	26,16	52,32			
e2	189,94										
e3	206,05										
e Total					2	103,01					
Total		8	2153,89				1076,94	51,50		1844,86	14,35

Πίνακας 6.12: Ανάλυση ευαισθησίας στρατηγικής Contour

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι επηρεάζουν και οι δύο παράγοντες την κοπή ενώ δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

6.2 Αποπεράτωση

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εκχόνδριση μπορεί να γίνει με τρεις στρατηγικές. Η αποπεράτωση της περιοχής “κάτω δοντιού” θα εξεταστεί με τις στρατηγικές Linear και Constant-Z. Και στις δύο περιπτώσεις θα χρησιμοποιηθεί εργαλείο διαμέτρου $D=6$ mm. Κατά την αποπεράτωση θεωρείται πιο σημαντικός ο όγκος του υλικού που απομένει από τον χρόνο κοπής.

6.2.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα

Ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την κοπή και στις δύο στρατηγικές σε αυτή την περιοχή του σκαφιδίου είναι το Scallop. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα επίπεδα του παράγοντα.

Παράγοντας	Επίπεδα παραγόντων		
Scallop	0,01	0,02	0,03

Πίνακας 6.13: Παράγοντας και επίπεδα αυτού για την αποπεράτωση

Επειδή έχουμε μόνο ένα παράγοντα δεν χρειάζεται να επιλέξουμε κάποιο ορθογώνιο πίνακα. Απλώς εκτελούνται τα πειράματα και λαμβάνεται ο χρόνος κοπής και ο όγκος του υλικού που απομένει. Τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	09':44"	897615,314
2	06':29"	897641,906
3	04':57"	897658,247

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα διεξαγωγής πειραμάτων της μεθόδου Linear

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ³)
1	12':36"	897704,226
2	09':04"	897719,853
3	07':42"	897733,201

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα διεξαγωγής πειραμάτων της μεθόδου Constant-Z

6.2.2 Συνάρτηση ποιινής

Η συνάρτηση ποιινής αποτελεί πλέον το εργαλείο για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χωρίς να οδηγηθούμε σε κάποιο σφάλμα κάνοντας τυχαία επιλογή. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο η συνάρτηση ποιινής δίνεται από τη σχέση:

$$L[(t, V), \kappa, \lambda] = \kappa * t + \lambda * V = MIN$$

όπου κ , λ είναι οι συντελεστές που καθορίζουν την βαρύτητα των παραγόντων του χρόνου κοπής και του εναπομείναντος όγκου. Για την κατεργασία της αποπεράτωσης ο όγκος του υλικού που απομένει έχει μεγαλύτερη βαρύτητα για αυτό και οι συντελεστές αυτοί ορίζονται ως εξής:

$$\kappa=0,3$$

$$\lambda=0,7$$

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η συνάρτηση ποιινής για τις δύο μεθόδους που αναλύθηκαν και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές. Να τονιστεί ότι ο όγκος V έχει διαιρεθεί με το 1000. Αυτό γίνεται γιατί η μέθοδος βελτιστοποίησης δεν λαμβάνει υπόψη τις μονάδες του κάθε παράγοντα αλλά υπάρχει ο περιορισμός οι παράγοντες που θα απαρτίζουν τη συνάρτηση ποιινής να είναι στην ίδια τάξη μεγέθους.

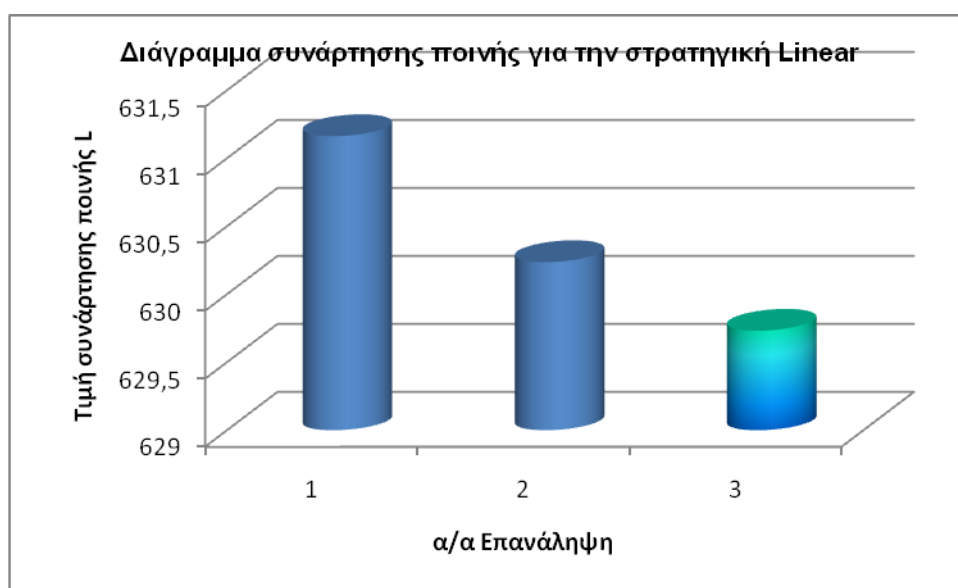
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποιινής
1	631,1627198
2	630,2363342
3	629,7317729

Πίνακας 6.16: Συνάρτηση ποιινής στρατηγικής Linear

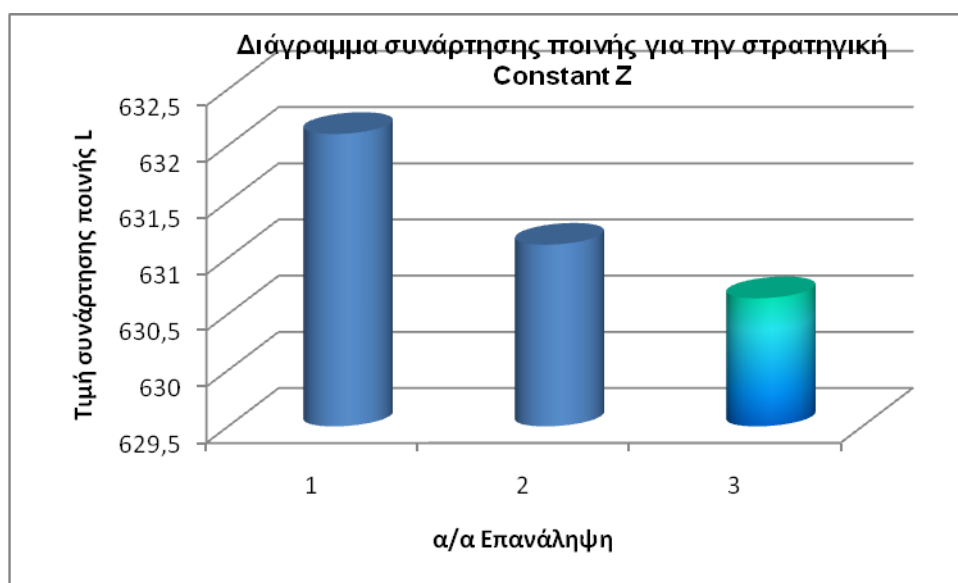
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	632,1009582
2	631,1158971
3	630,6392407

Πίνακας 6.17: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Constant-Z

Ανάμεσα στις δύο μεθόδους επιλέγεται για την κοπή η μέθοδος Linear διότι η συνάρτηση ποινής έχει την μικρότερη τιμή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνάρτησης ποινής με σημειωμένες τις βέλτιστες τιμές.

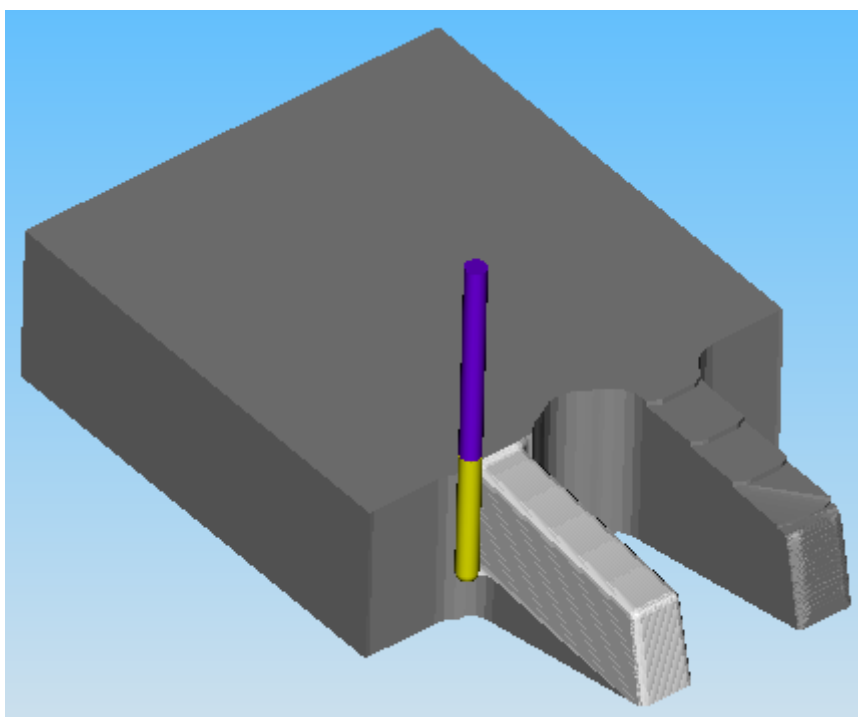
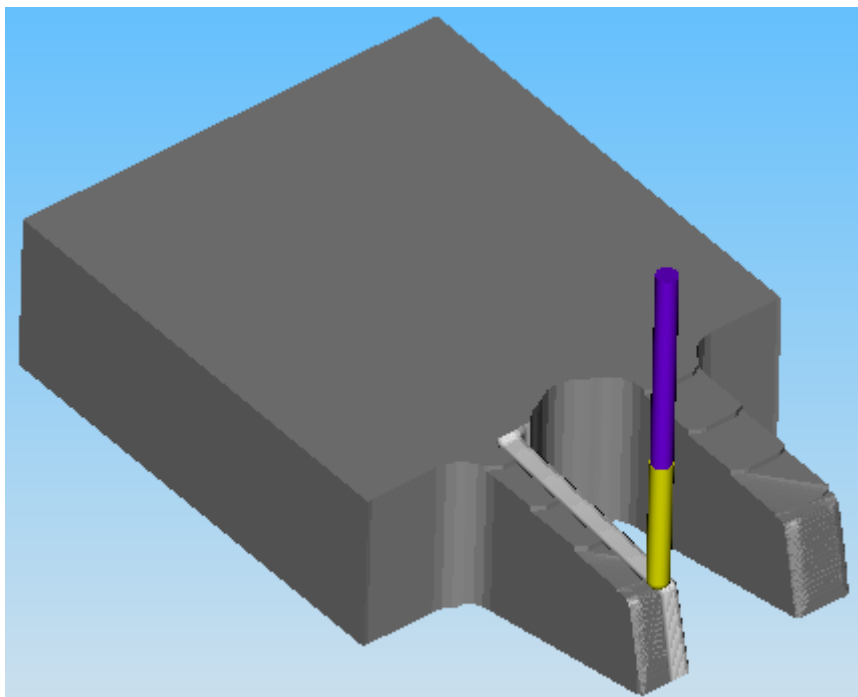


Σχήμα 6.3: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Linear

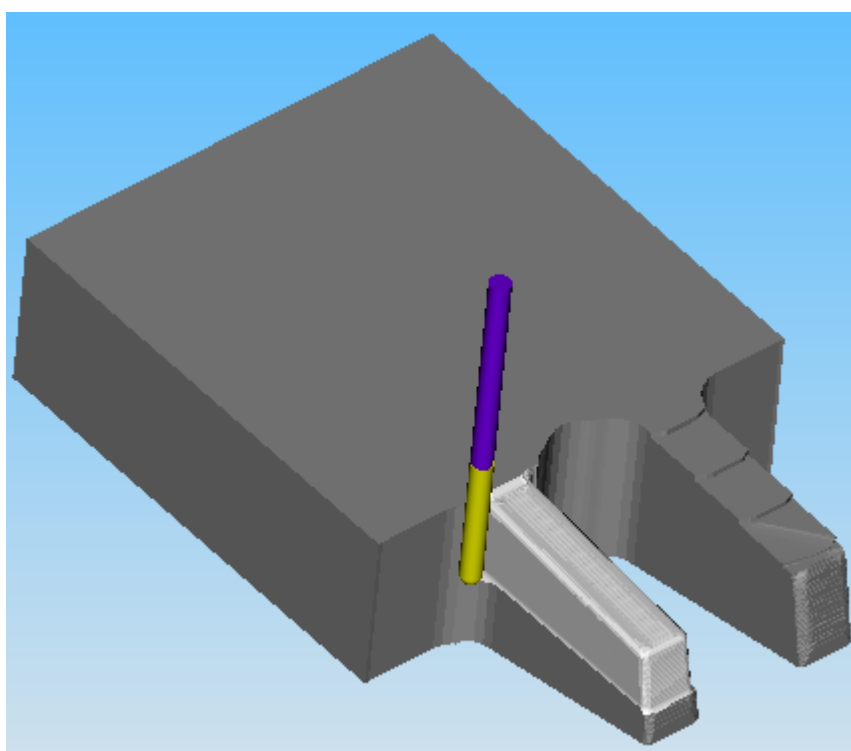
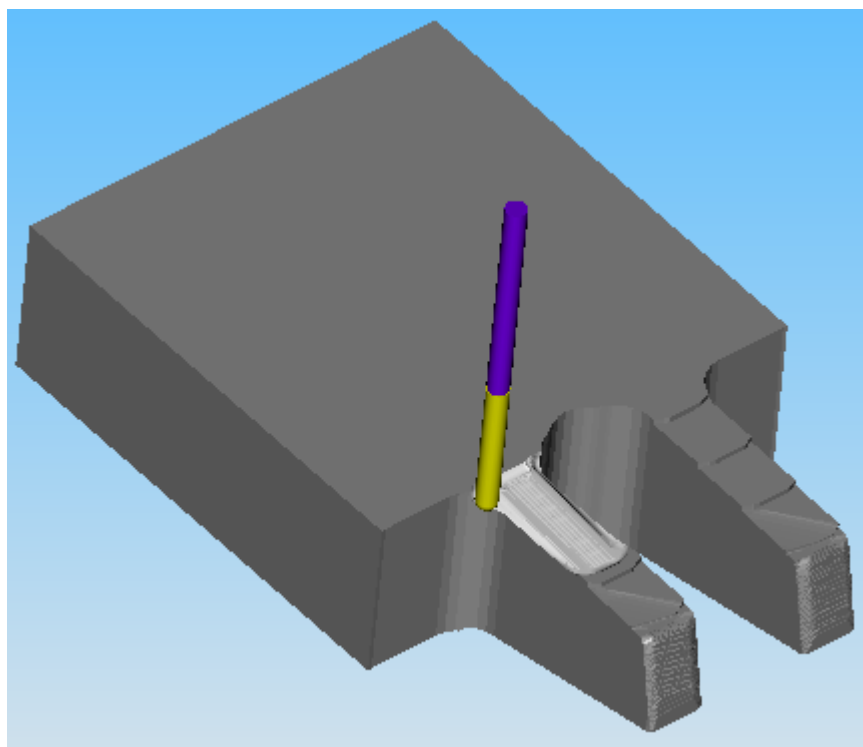


Σχήμα 6.4: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Constant-Z

Στρατηγική φινιρίσματος Linear



Στρατηγική φινιρίσματος Constant-Z



Κεφάλαιο 7

Σχεδιασμός κοπής του κυρτού τμήματος του κουταλιού

7.1 Εκχόνδριση

Οι συνθήκες κοπής είναι ίδιες αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου. Για την εκχόνδριση εφαρμόζονται οι στρατηγικές Hatch και Contour και το κοπτικό εργαλείο είναι διαμέτρου 20mm. Κατά την εκχόνδριση ο παράγοντας του χρόνου κοπής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα.

7.1.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκχόνδριση του κυρτού τμήματος του κουταλιού είναι:

- Overlap
- Step Down
- Mode

Τα επίπεδα των παραγόντων και για τις δύο στρατηγικές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Overlap	0,3	0,5	0,65
Step Down	1	2	3
Mode	Pockets	Profiles	Pockets + Profiles

Πίνακας 7.1: Παράγοντες και επίπεδα παραγόντων για την εκχόνδριση

Διαπιστώνεται ότι οι παράγοντες είναι τρεις και ο κάθε ένας έχει τρία επίπεδα. Ο ορθογώνιος πίνακας που είναι επιλέγεται για τον σχεδιασμό των πειραμάτων είναι ο L9 διότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχει τρεις στήλες. Οι παράγοντες τοποθετούνται αντίστοιχα στις στήλες 1, 2 και 3 του ορθογώνιου πίνακα L9. Απομονώνοντας τις στήλες που μας ενδιαφέρουν

παίρνουμε τον πίνακα 7.2. Να τονιστεί ότι δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Πίνακας 7.2: Πίνακας L9 για την εκχόνδριση του κυρτού τμήματος του κουταλιού

Με αντικατάσταση των τιμών των επιπέδων των παραγόντων στον πίνακα 7.2 προκύπτει ο επόμενος πίνακας.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	0,3	1	Pockets
2	0,3	2	Profiles
3	0,3	3	Pockets + Profiles
4	0,5	1	Profiles
5	0,5	2	Pockets + Profiles
6	0,5	3	Pockets
7	0,65	1	Pockets + Profiles
8	0,65	2	Pockets
9	0,65	3	Profiles

Πίνακας 7.3: Εκτέλεση πειραμάτων εκχόνδρισης

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα εκτελούνται τα πειράματα για την κάθε στρατηγική και λαμβάνεται ο χρόνος κοπής και ο όγκος του υλικού που απομένει. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	02':19"	629517.444
2	01':01"	632526.955
3	01':00"	634650.984
4	02':08"	629522.689
5	01':31"	632507.541
6	00':48"	634659.237
7	03':30"	629505.813
8	01':23"	632524.016
9	00':53"	634651.419

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα πειραμάτων εκχόνδρισης της στρατηγικής Hatch

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	02':03"	629522.976
2	00':55"	632547.010
3	00':50"	634642.999
4	01':56"	629534.470
5	01':18"	632525.198
6	00':42"	634653.167
7	03':04"	629512.272
8	01':15"	632538.566
9	00':48"	634646.395

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα πειραμάτων εκχόνδρισης της στρατηγικής Contour

7.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση

Η βέλτιστη λύση για την διαδικασία της εκχόνδρισης βρίσκεται μέσω της συνάρτησης ποινής. Ο τρόπος εφαρμογής της έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνεπώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής της θα είναι:

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	190,3882332
2	190,4650865
3	191,0952952
4	190,3128067
5	190,6692623
6	190,7337711
7	191,1617439
8	190,6182048
9	190,7664257

Πίνακας 7.6: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Hatch

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	190,2778928
2	190,149103
3	190,7428997
4	189,952341
5	190,5835594
6	190,6899501
7	190,9816816
8	190,5665698
9	190,7299185

Πίνακας 7.7: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Contour

Προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή και στις δύο στρατηγικές βρίσκεται στην τέταρτη επανάληψη. Ως στρατηγική κοπής επιλέγεται η Contour διότι η τιμή της συνάρτησης ποινής είναι μικρότερη από την αντίστοιχη βέλτιστη της στρατηγικής Hatch.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνάρτησης ποινής των δύο στρατηγικών. Με ανοιχτό χρώμα είναι οι στήλες στις οποίες αντιστοιχεί η χαμηλότερη τιμή.



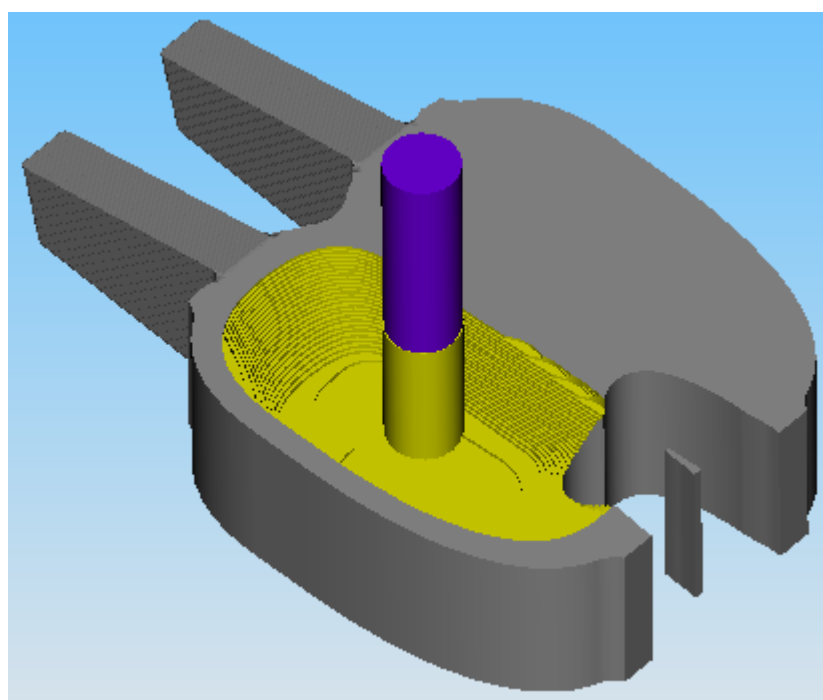
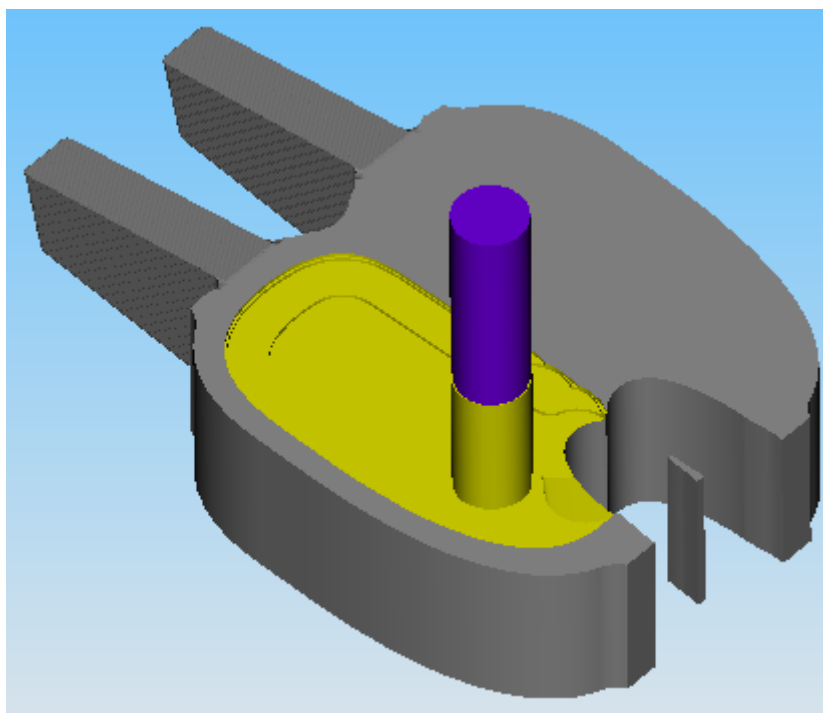
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής για την στρατηγική Hatch



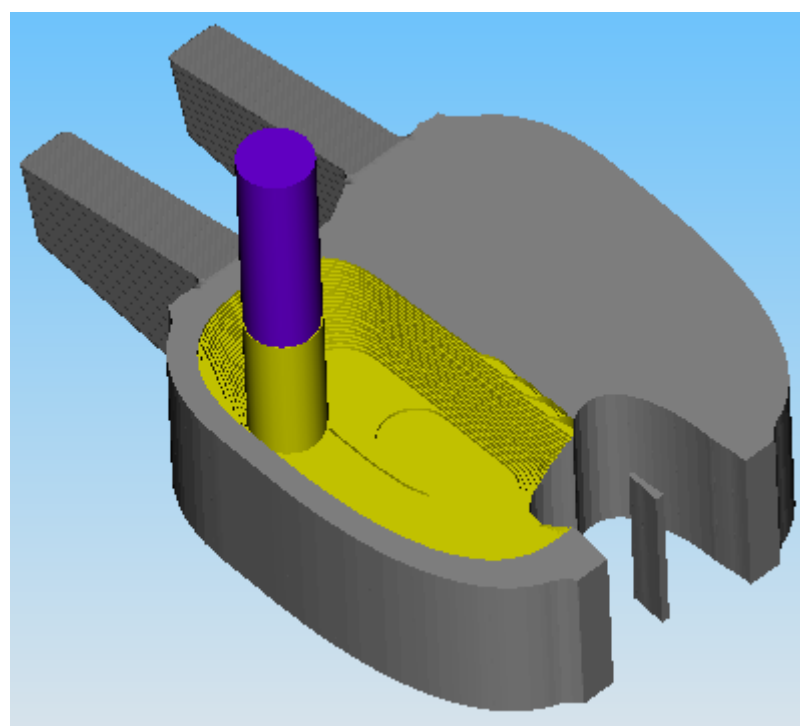
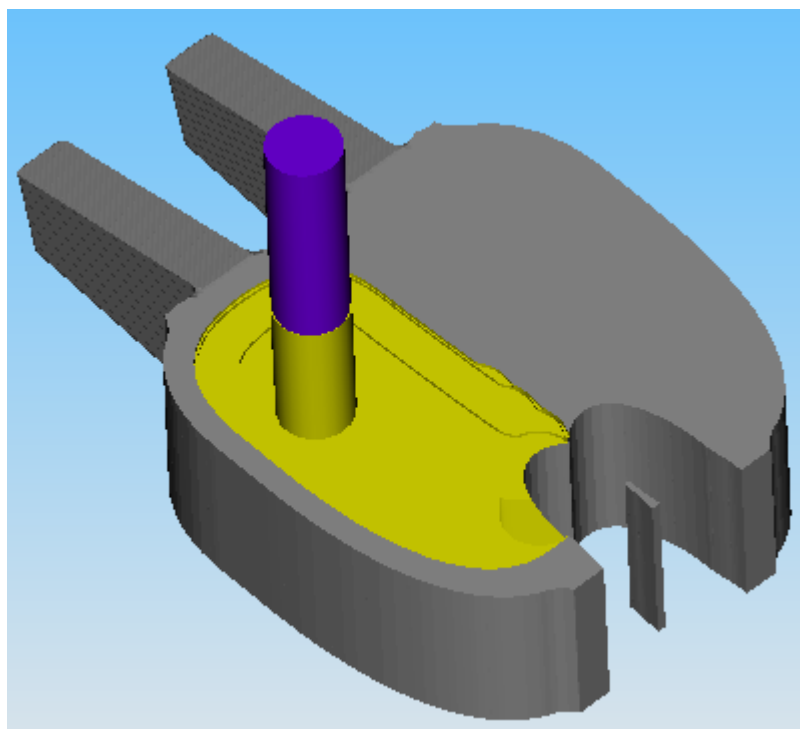
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής για την στρατηγική Contour

Ακολουθούν κάποιες εικόνες από την κατεργασία του τεμαχίου στο SolidCAM.

Στρατηγική Hatch



Στρατηγική Contour



7.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης

Για την ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία που έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η μετατροπή των αποτελεσμάτων κοπής σε ποσοστά καθώς και ο υπολογισμός των αντίστοιχων Y για κάθε στρατηγική.

Στην στρατηγική Hatch οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 215) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 634670) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	139	629517,44	64,65	99,1882	76,16
2	61	632526,96	28,37	99,6623	52,14
3	60	634650,98	27,91	99,9970	51,94
4	128	629522,69	59,53	99,1890	72,75
5	91	632507,54	42,33	99,6593	61,44
6	48	634659,24	22,33	99,9983	48,22
7	210	629505,81	97,67	99,1863	98,18
8	83	632524,02	38,60	99,6619	58,96
9	53	634651,42	24,65	99,9971	49,77

Πίνακας 7.8: Υπολογισμός Y στρατηγικής Hatch

Στην στρατηγική Contour οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 190) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 634670) * 100$$

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	123	629522,98	64,74	99,1890	76,22
2	55	632547,01	28,95	99,6655	52,52
3	50	634643	26,32	99,9957	50,88
4	116	629534,47	61,05	99,1908	73,77
5	78	632525,2	41,05	99,6621	60,59
6	42	634653,17	22,11	99,9973	48,07
7	184	629512,27	96,84	99,1873	97,62
8	75	632538,57	39,47	99,6642	59,54
9	48	634646,4	7,50	99,9963	38,33

Πίνακας 7.9: Υπολογισμός Y στρατηγικής Contour

Οι συμπληρωμένοι πίνακες ANOVA των δύο στρατηγικών παρουσιάζονται παρακάτω. Σε αυτούς τους πίνακες φαίνεται αναλυτικά το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	180,24	2	146,25	no			73,12		1,83	66,18	3,07
A2	182,41										
A3	206,91										
B1	247,09	2	1723,22	no			861,61		21,52	1643,15	76,15
B2	172,54										
B3	149,93										
C1	183,34	2	248,15	no			124,07		3,10	168,08	7,79
C2	174,66										
C3	211,56										
e1	187,37	2	40,04	yes	2	40,04	20,02	40,04			
e2	198,54										
e3	183,65										
e Total					2	40,04		40,04			
Total		8	2157,65				1078,83			1877,40	12,99

Πίνακας 7.10: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Hatch

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	$\rho\%$
A1	179,62	2	47,81	yes	2	47,81	23,91	47,81			
A2	182,43										
A3	195,49										
B1	247,61	2	2115,86	no			1057,93		15,34	1977,97	76,51
B2	172,65										
B3	137,28										
C1	183,83	2	331,63	no			165,82		2,41	193,74	7,49
C2	164,62										
C3	209,09										
e1	175,14	2	90,08	yes	2	90,08	45,04	90,08			
e2	198,21										
e3	184,19										
e Total					4	137,89					
Total		8	2585,38				1292,69	68,94		2171,71	16,00

Πίνακας 7.11: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Contour

Παρατηρείται ότι και στις δύο στρατηγικές μεγαλύτερο ποσοστό επιρροής έχει ο παράγοντας Step Down, ενώ στην στρατηγική Contour δε επηρεάζει καθόλου την κοπή ο παράγοντας Overlap.

7.2 Αποπεράτωση

Οι πιο σημαντικές στρατηγικές διεκπεραίωσης της αποπεράτωση του κυρτού μέρους του κουταλιού είναι η Linear και η Constant - Z. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται έχει διάμετρο 6 mm. Να σημειωθεί ότι ο όγκος του υλικού που απομένει έχει μεγαλύτερη βαρύτητα.

7.2.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα

7.2.1.1 Στρατηγική Linear

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποπεράτωση στην στρατηγική Linear είναι το Scallop και το Angle. Τα επίπεδα των παραγόντων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Scallop	0,01	0,02	0,03
Angle	0	10	20

Πίνακας 7.12: Παράγοντες και επίπεδα αυτών της στρατηγικής Linear

Ο ορθογώνιος πίνακας που επιλέγεται για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι ο L9 λόγω του ότι χρειαζόμαστε τουλάχιστον δύο στήλες και ο κάθε παράγοντας έχει τρία επίπεδα. Οι παράγοντες τοποθετούνται αντίστοιχα στις στήλες 1 και 2 και απομονώνοντας τις στήλες αυτές από τον αρχικό πίνακα L9 θα έχουμε:

Στήλη	1	2
Παράγοντας/ Επανάληψη	Scallop	Angle
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Πίνακας 7.13: Ορθογώνιος πίνακας L9

Αντικαθιστώντας τις τιμές των επιπέδων στον προηγούμενο πίνακα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Στήλη	1	2
Παράγοντας/ Επανάληψη	Scallop	Angle
1	0,01	0
2	0,01	10
3	0,01	20
4	0,02	0
5	0,02	10
6	0,02	20
7	0,03	0
8	0,03	10
9	0,03	20

Πίνακας 7.14: Πίνακας διεξαγωγής πειραμάτων στρατηγικής Linear

Τα αποτελέσματα της διεξαγωγής των πειραμάτων συνοψίζονται στον πίνακα 7.15.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	09':28"	512419.202
2	12':17"	512408.39
3	15':52"	512392.807
4	06':44"	512463.359
5	08':43"	512444.223
6	11':05"	512422.636
7	05':29"	512495.628
8	07':03"	512474.623
9	08':59"	512446.578

Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα για την μέθοδο Linear

7.2.1.2 Στρατηγική Constant - Z

Η στρατηγική αυτή αποπεράτωσης είναι η πιο απλή στην εκτέλεση της καθώς ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την κοπή είναι το Scallor. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα επίπεδα του παράγοντα.

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Scallor	0,01	0,02	0,03

Πίνακας 7.16: Επίπεδα παράγοντα Scallor

Στην συγκεκριμένη περίπτωση καθώς έχουμε ένα παράγοντα δε χρειάζεται να επιλέξουμε κάποιο ορθογώνιο πίνακα. Συνεπώς εκτελούνται κατ' ευθείαν τα πειράματα λαμβάνοντας τον χρόνο κοπής και τον όγκο που απομένει.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	15':17"	512436.683
2	10':50"	512474.756
3	08':53"	512503.633

Πίνακας 7.17: Αποτελέσματα στρατηγικής Constant-Z

7.2.2 Συνάρτηση ποινής

Στους πίνακες που ακολουθούν αναγράφονται οι τιμές της συνάρτησης ποινής για τις δύο στρατηγικές της διαδικασίας της αποπεράτωσης. Η συνάρτηση ποινής εφαρμόζεται όπως στην διαδικασία αποπεράτωσης του κάτω τμήματος του δοντιού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τιμών αυτών και με ανοιχτό χρώμα είναι οι στήλες με την ελάχιστη τιμή.

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	361,4774414
2	362,336873
3	363,3309649
4	360,6563513
5	361,2399561
6	362,0108452
7	360,3339396
8	360,8412361
9	361,2896046

Πίνακας 7.18: Συνάρτηση της Linear

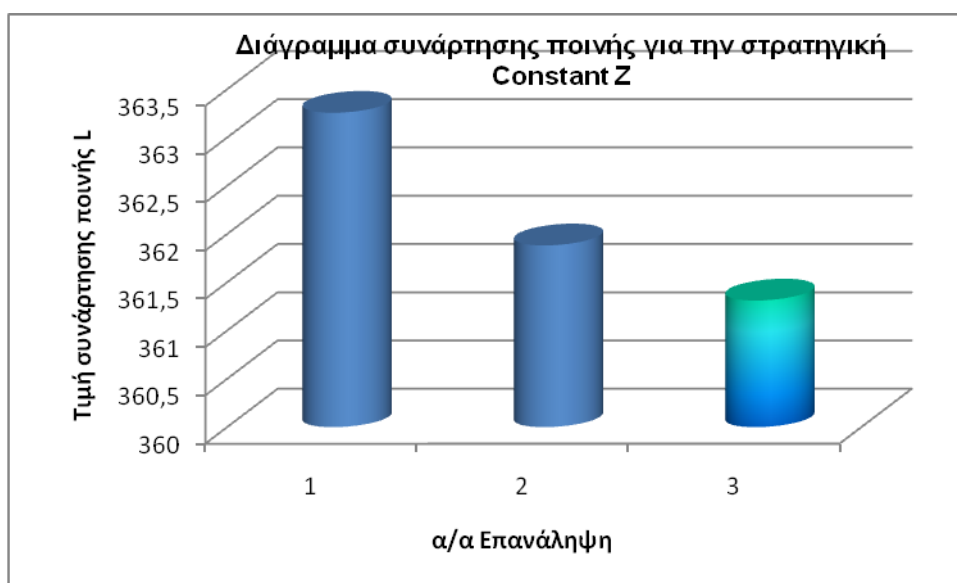
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	363,2566781
2	361,8823292
3	361,3115431

Πίνακας 7.19: Συνάρτηση ποινής της Constant - Z

Ως βέλτιστη μέθοδος κοπής επιλέγεται η Linear και συγκεκριμένα η 7^η επανάληψη καθώς εκεί παρατηρείται η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ποινής.



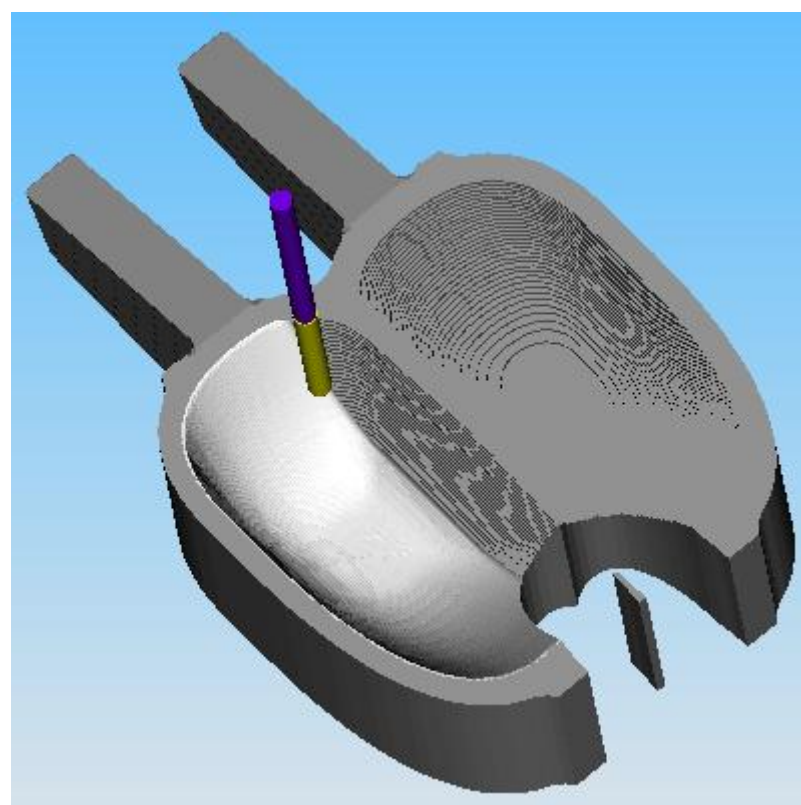
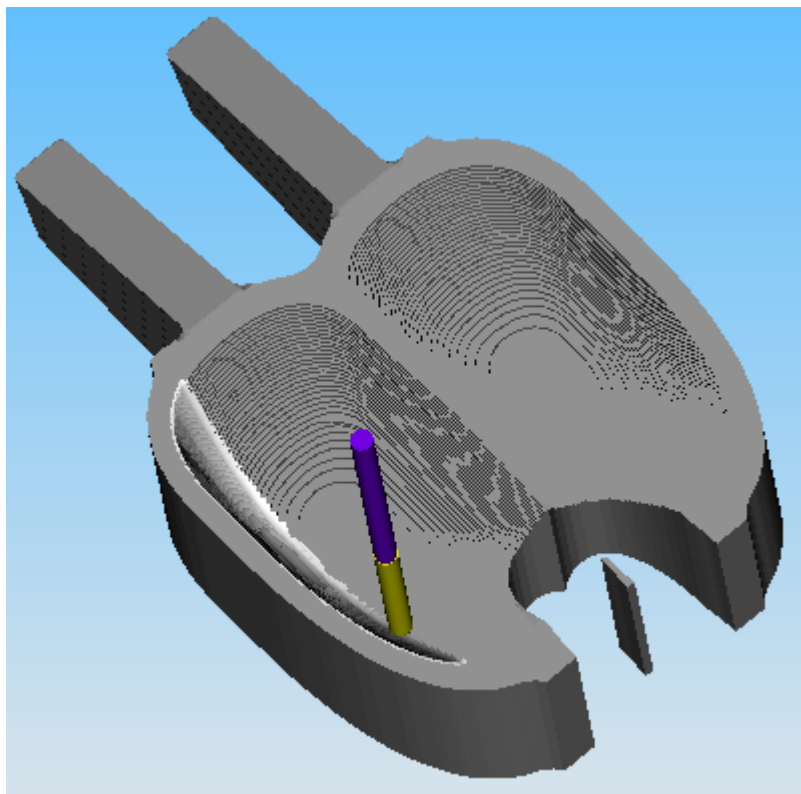
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής της Linear



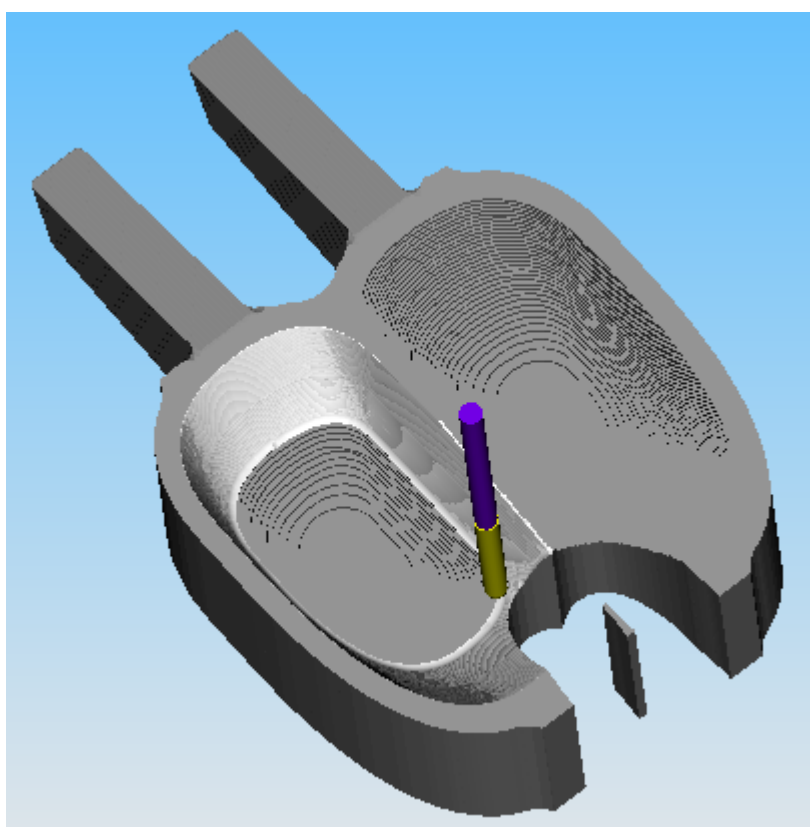
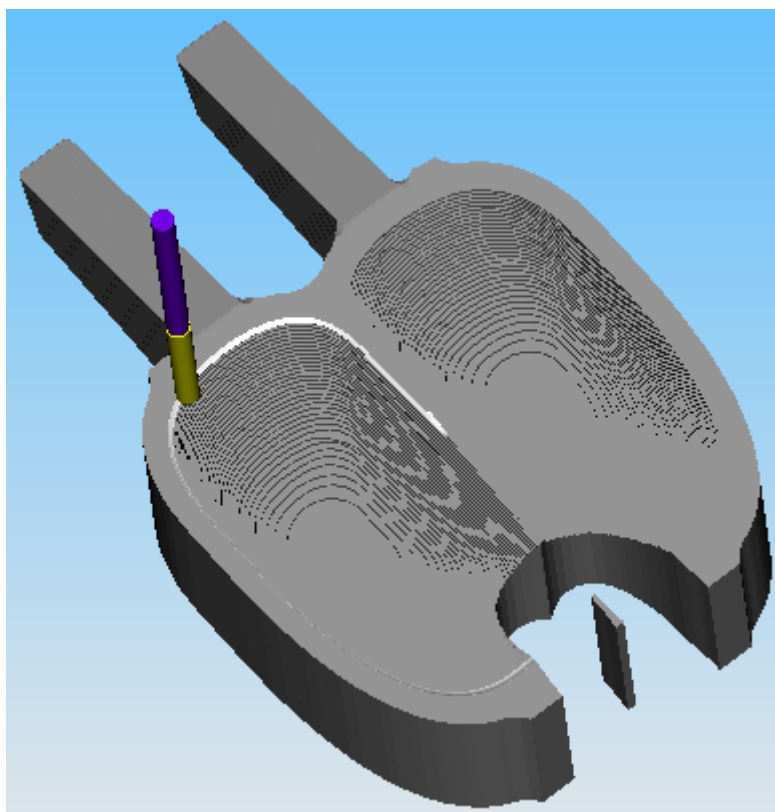
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής της Constant - Z

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από την διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM.

Στρατηγική Linear



Στρατηγική Constant-Z



7.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας για την αποπεράτωση

Η ανάλυση ευαισθησίας θα γίνει μόνο για την στρατηγική Linear διότι στην στρατηγική Constant-Z έχουμε μόνο ένα παράγοντα και θα χρειάζεται να γίνει ανάλυση ευαισθησίας. Για την ανάλυση ευαισθησίας θα εφαρμοστεί η ίδια μέθοδος όπως και σε προηγούμενες παραγράφους. Η συμπλήρωση του πίνακα απαιτεί μία διαδικασία και σειρά πράξεων η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Γι' αυτό και δεν κρίνεται σκόπιμο να επαναληφθεί και θα παρουσιαστούν κατευθείαν τα αποτελέσματα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του Y που έχουν υπολογιστεί. Οι τύποι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του Y και την συμπλήρωση των στηλών C, D και E είναι οι παρακάτω:

$$Y = (C + 2 * D) / 3$$

$$C = (A / 970) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 512500) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι εδώ έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον όγκο που απομένει.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	568	512419,2	58,56	99,9842	86,18
2	737	512408,39	75,98	99,9821	91,98
3	952	512392,81	98,14	99,9791	99,37
4	404	512463,36	41,65	99,9929	80,55
5	523	512444,22	53,92	99,9891	84,63
6	665	512422,64	68,56	99,9849	89,51
7	329	512495,63	33,92	99,9991	77,97
8	423	512474,62	43,61	99,9950	81,20
9	539	512446,58	55,57	99,9896	85,18

Πίνακας 7.20: Υπολογισμός του Y

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	$\rho\%$
A1	277,52	2	192,07	no			96,03		20,15	182,54	52,78
A2	254,69										
A3	244,35										
B1	244,69	2	144,27	no			72,14		15,14	134,74	38,96
B2	257,81										
B3	274,06										
(AxB)1	256,88	2	4,97	yes	2	4,97	2,49	4,97			
(AxB)2	257,71										
(AxB)3	261,97										
e1	255,99	2	4,56	yes	2	4,56	2,28	4,56			
e2	259,46										
e3	261,11										
e Total					4	9,53		4,77			
Total		8	345,87				172,93			317,28	8,27

Πίνακας 7.21: Πίνακας ANOVA

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι οι δύο παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την κοπή, ενώ δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 8

Σχεδιασμός κοπής του κοίλου τμήματος του κουταλιού

8.1 Εκχόνδριση

Η διαδικασία της εκχόνδρισης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο στρατηγικών, της Hatch και της Contour. Η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται είναι 20mm.

8.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή στις δύο στρατηγικές και τα επίπεδα τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Overlap	0,3	0,5	0,65
Step Down	1	2	3
Mode	Pockets	Profiles	Pockets + Profiles

Πίνακας 8.1: Παράγοντες και επίπεδα αυτών.

Ο ορθογώνιος πίνακας που επιλέγεται είναι ο L9 διότι έχουμε τρεις παράγοντες όπου ο κάθε ένας έχει τρία επίπεδα. Ο παράγοντας Overlap θα τοποθετηθεί στη στήλη 1, ο παράγοντας Step Down θα τοποθετηθεί στη στήλη 2 και ο παράγοντας Mode θα τοποθετηθεί στη στήλη 3. Έτσι απομονώνοντας τις τρεις αυτές στήλες προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Πίνακας 8.2: Ορθογώνιος πίνακας L9

Αντικαθιστώντας τις τιμές των επιπέδων στον πίνακα 8.2 προκύπτει ο παρακάτω πίνακας βάσει του οποίου θα εκτελεστούν τα πειράματα για την εκχόνδριση του κοίλου τμήματος του κουταλιού.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	0,3	1	Pockets
2	0,3	2	Profiles
3	0,3	3	Pockets + Profiles
4	0,5	1	Profiles
5	0,5	2	Pockets + Profiles
6	0,5	3	Pockets
7	0,65	1	Pockets + Profiles
8	0,65	2	Pockets
9	0,65	3	Profiles

Πίνακας 8.3: Πίνακας εκτέλεσης πειραμάτων

Εκτελώντας τα πειράματα λαμβάνονται οι τιμές του χρόνου κοπής και του όγκου που απομένει για την κάθε επανάληψη. Αυτές είναι:

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	07':35''	432704.953
2	03':43''	434448.796
3	03':01''	435998.823
4	10':05''	432746.697
5	04':55''	434301.715
6	02':49''	436019.184
7	10':48''	432629.504
8	04':31''	434363.313
9	04':26''	436131.945

Πίνακας 8.4: Αποτελέσματα της Hatch

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	05':08''	432704,993
2	03':44''	434448,796
3	02':20''	436003,085
4	09':49''	432746,697
5	03':29''	434351,18
6	01':45''	436019,256
7	08':09''	432694,177
8	03':26''	434363,365
9	04':26''	436131,945

Πίνακας 8.5: Αποτελέσματα της Contour

8.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση

Στους πίνακες που ακολουθούν αναγράφονται οι τιμές της συνάρτησης ποινής για τις δύο στρατηγικές της διαδικασίας της εκχόνδρισης. Η συνάρτηση ποινής εφαρμόζεται όπως στα προηγούμενα τμήματα του σκαφιδίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τιμών αυτών και με ανοιχτό

χρώμα είναι οι στήλες με την ελάχιστη τιμή. Να τονιστεί ότι ο χρόνος κοπής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από τον όγκο του υλικού που απομένει.

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	134,9564859
2	132,7356388
3	132,9066469
4	136,8590091
5	133,4755145
6	132,5487552
7	137,1248512
8	133,3259939
9	133,8215835

Πίνακας 8.6: Συνάρτηση ποινής της Hatch

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	133,3674979
2	132,7426388
3	132,3409255
4	136,4670091
5	132,608354
6	131,8207768
7	135,4712531
8	132,5910095
9	133,8215835

Πίνακας 8.7: Συνάρτηση ποινής Contour

Διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ποινής βρίσκεται στην έκτη επανάληψη και στις δύο στρατηγικές. Ως στρατηγική κοπής επιλέγεται η Contour διότι συνολικά εκεί παρατηρείται η μικρότερη τιμή της συνάρτησης



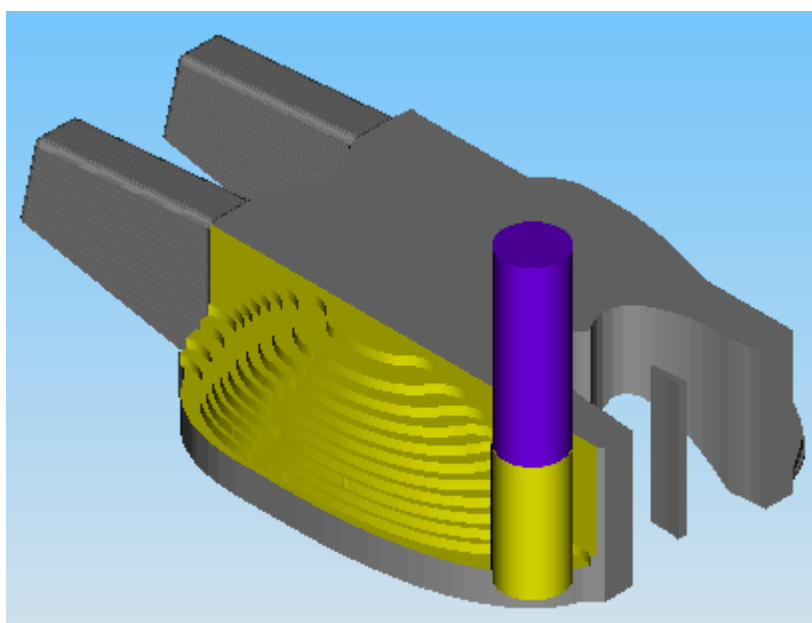
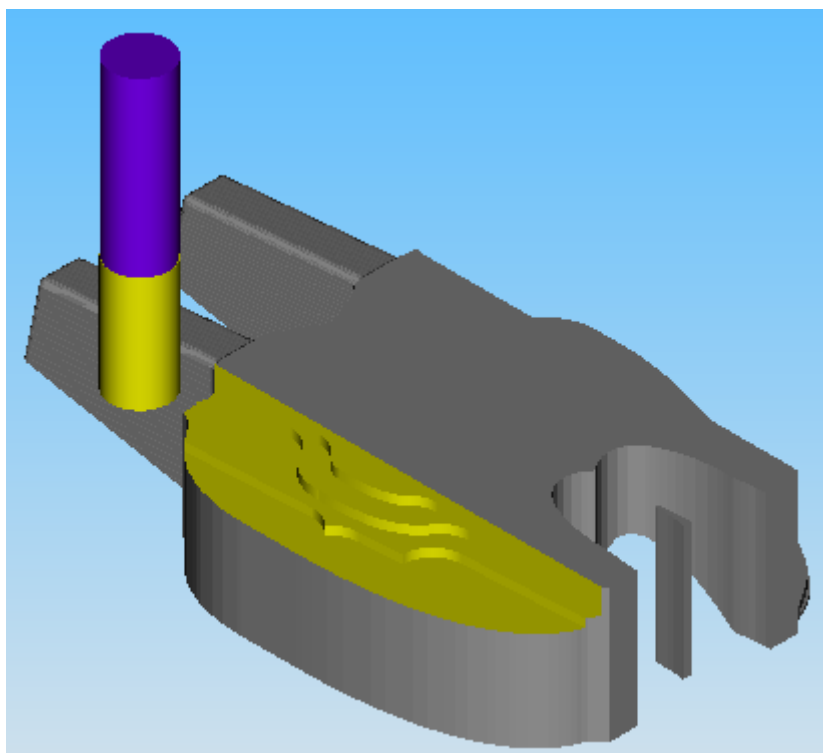
Σχήμα 8.1: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής στρατηγικής Hatch



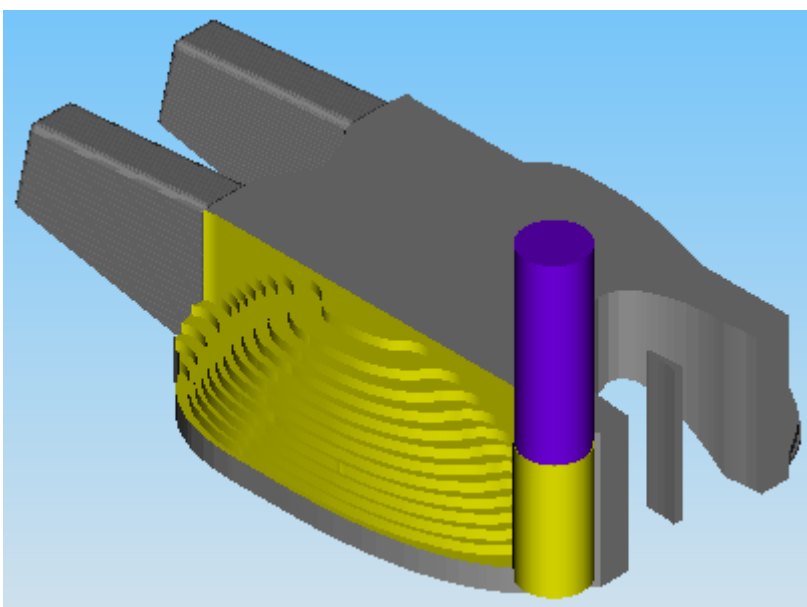
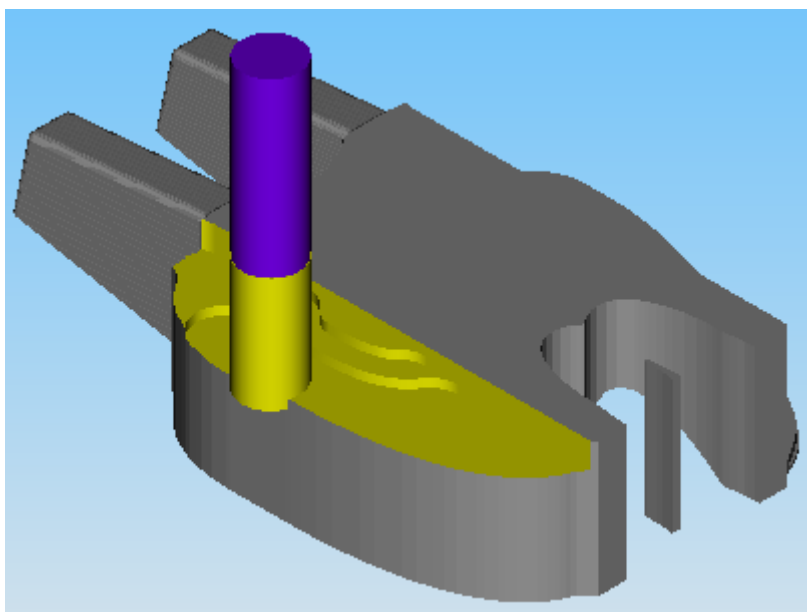
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής στρατηγικής Contour

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από την διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM.

Στρατηγική Hatch



Στρατηγική Contour



8.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης

Για την ανάλυση ευαισθησίας ακολουθείται η διαδικασία που έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η μετατροπή των αποτελεσμάτων κοπής σε ποσοστά καθώς και ο υπολογισμός των αντίστοιχων Y για κάθε στρατηγική.

Στην στρατηγική Hatch οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 650) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 436150) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	455	432704,95	70,00	99,2101	79,74
2	223	434448,8	34,31	99,6099	56,08
3	181	435998,82	27,85	99,9653	51,89
4	605	432746,7	93,08	99,2197	95,12
5	295	434301,72	45,38	99,5762	63,45
6	169	436019,18	26,00	99,9700	50,66
7	648	432629,5	99,69	99,1928	99,53
8	271	434363,31	41,69	99,5904	60,99
9	266	436131,95	40,92	99,9959	60,61

Πίνακας 8.8: Υπολογισμός Y για την στρατηγική Hatch

Στην στρατηγική Hatch οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 590) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 436150) * 100$$

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y ₁
1	308	432704,99	52,20	99,2101	67,87
2	224	434448,8	37,97	99,6099	58,51
3	140	436003,09	23,73	99,9663	49,14
4	589	432746,7	99,83	99,2197	99,63
5	209	434351,18	35,42	99,5876	56,81
6	105	436019,26	17,80	99,9700	45,19
7	489	432694,18	82,88	99,2077	88,32
8	206	434363,37	34,92	99,5904	56,47
9	266	436131,95	45,08	99,9959	63,39

Πίνακας 8.9: Υπολογισμός Y στρατηγικής Contour

Οι συμπληρωμένοι πίνακες ANOVA παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	187,70	2	191,46	no			95,73		32,21	185,51	6,90
A2	209,23										
A3	221,13										
B1	274,39	2	2387,27	no			1193,64		401,59	2381,33	88,51
B2	180,52										
B3	163,16										
C1	191,39	2	108,63	no			54,32		18,27	102,69	3,82
C2	211,81										
C3	214,86										
e1	203,80	2	2,97	yes	2	2,97	1,49	2,97			
e2	206,26										
e3	208,00										
e Total					2	2,97		2,97			
Total		8	2690,33				1345,17			2669,53	0,77

Πίνακας 8.10: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Hatch

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	$\rho\%$
A1	175,53	2	198,97	no			99,48		1,85	91,17	3,53
A2	201,63										
A3	208,19										
B1	255,82	2	1875,87	no			937,94		17,40	1768,07	68,54
B2	171,80										
B3	157,72										
C1	169,53	2	450,94	no			225,47		4,18	343,14	13,30
C2	221,53										
C3	194,28										
e1	188,07	2	53,90	yes	2	53,90	26,95	53,90			
e2	192,03										
e3	205,24										
e Total					2	53,90					
Total		8	2579,68				1289,84	53,90		2202,39	14,63

Πίνακας 8.11: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Contour

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι και οι τρεις παράγοντες συμβάλλουν στην κοπή. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ο Step Down κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο διότι ο παράγοντας αυτός καθορίζει το βήμα του κοπτικού εργαλείου άρα και τον χρόνο κοπής. Οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στον σχεδιασμό της κοπής παρόλα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι.

8.2 Αποπεράτωση

Κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης θα καθοριστούν οι τελικές διαστάσεις και η ποιότητα της επιφάνειας του κοίλου τμήματος του κουταλιού. Οι μέθοδοι που επηρεάζουν την κοπή σε αυτό το τμήμα του σκαφιδίου είναι οι Linear και Constant StepOver.

8.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση

Ο καθορισμός των παραγόντων και των επιπέδων αυτών είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία. Μετά από πολλές μετρήσεις και πειράματα διαπιστώθηκε ότι στη στρατηγική Linear ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την κοπή είναι το Scallop και στην στρατηγική Constant StepOver ο μοναδικός παράγοντας που ασκεί επιρροή στα πειράματα είναι το Step Over. Παρακάτω παρουσιάζονται τα επίπεδα των παραγόντων για την κάθε στρατηγική.

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Scallop	0,01	0,02	0,03

Πίνακας 8.12: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Linear

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Step Over	0,5	0,7	1

Πίνακας 8.13: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Constant StepOver

Επειδή ο σχεδιασμός της κοπής εξαρτάται από ένα παράγοντα στην κάθε περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η επιλογή κάποιου ορθογώνιου πίνακα γι' αυτό και τα πειράματα εκτελούνται κατευθείαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	08,59	354058.353
2	06,21	355016.177
3	05,17	353855.929

Πίνακας 8.14: Αποτελέσματα κοπής της Linear

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	11':26''	353398.018
2	08':11''	353425.751
3	05':27''	353470.284

Πίνακας 8.15: Αποτελέσματα κοπής της Constant StepOver

8.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση

Μέσω της συνάρτησης ποινής θα βρεθεί η βέλτιστη λύση για την αποπεράτωση του κοίλου τμήματος του κουταλιού. Η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης ποινής έχει αναλυθεί παραπάνω γι' αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατευθείαν. Να σημειωθεί ότι ο όγκος του υλικού που απομένει έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης.

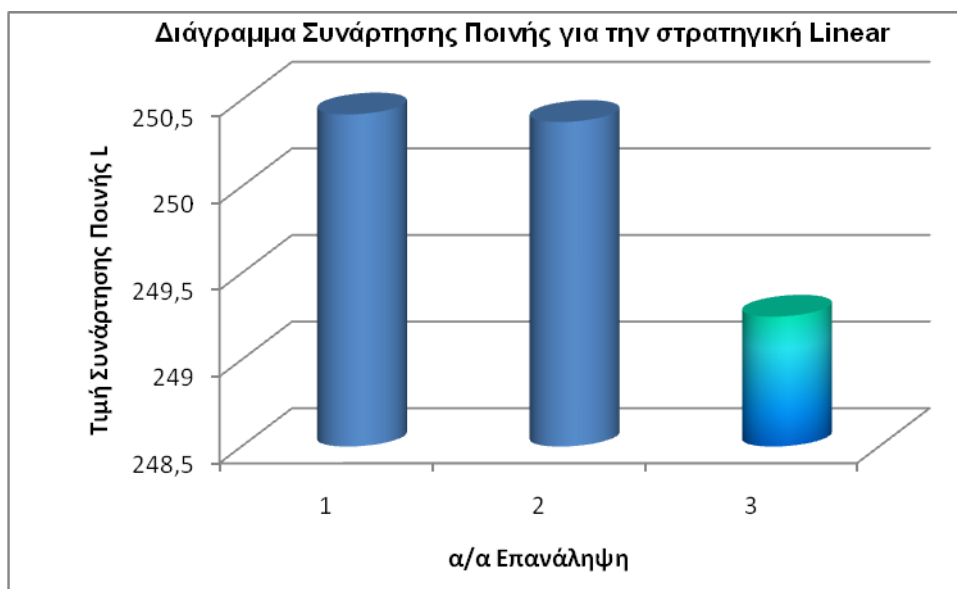
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	250,4178471
2	250,3743239
3	249,2501503

Πίνακας 8.16: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Linear

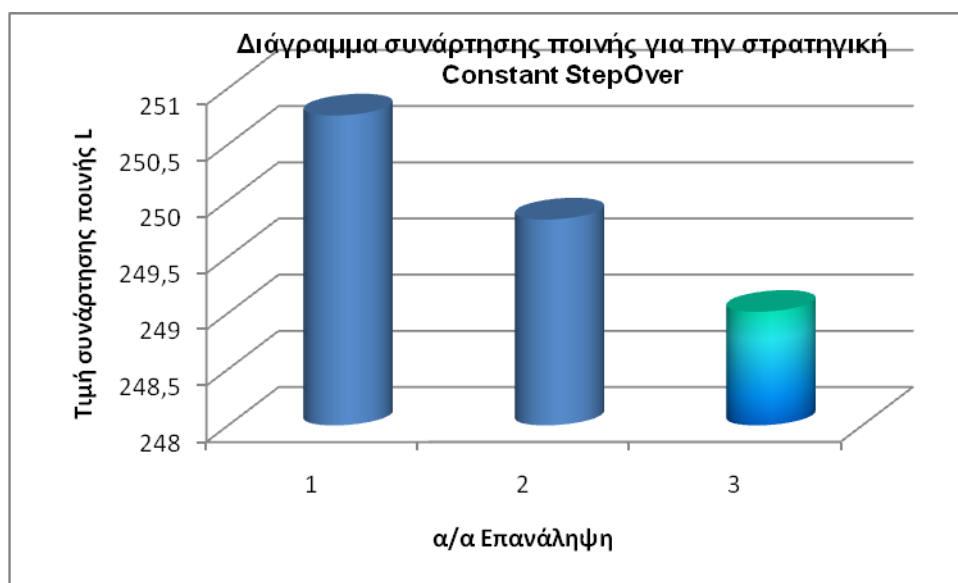
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	250,7566126
2	249,8310257
3	249,0101988

Πίνακας 8.17: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Constant StepOver

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης και στις δύο στρατηγικές βρίσκεται στην τρίτη επανάληψη. Τελικά ως βέλτιστη στρατηγική κοπής επιλέγεται η Constant StepOver και η τρίτη επανάληψη των πειραμάτων.



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Linear

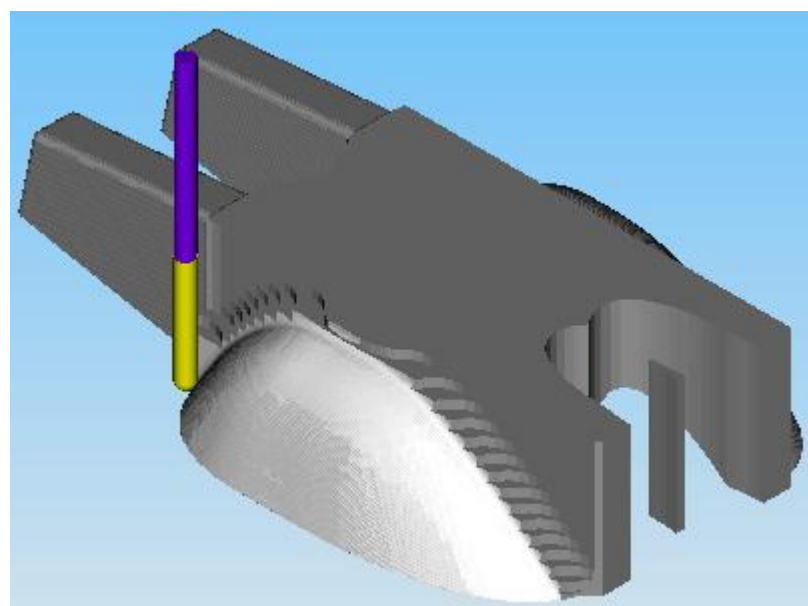
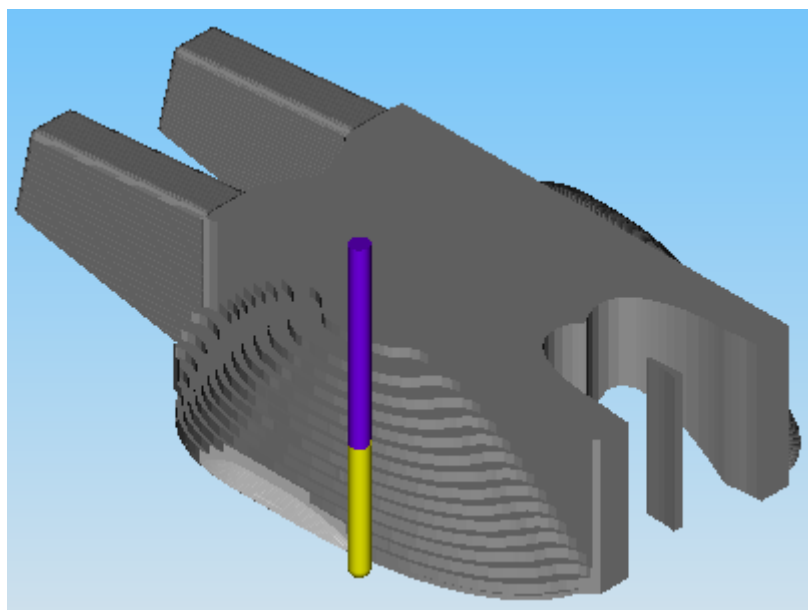


Σχήμα 8.4: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Constant StepOver

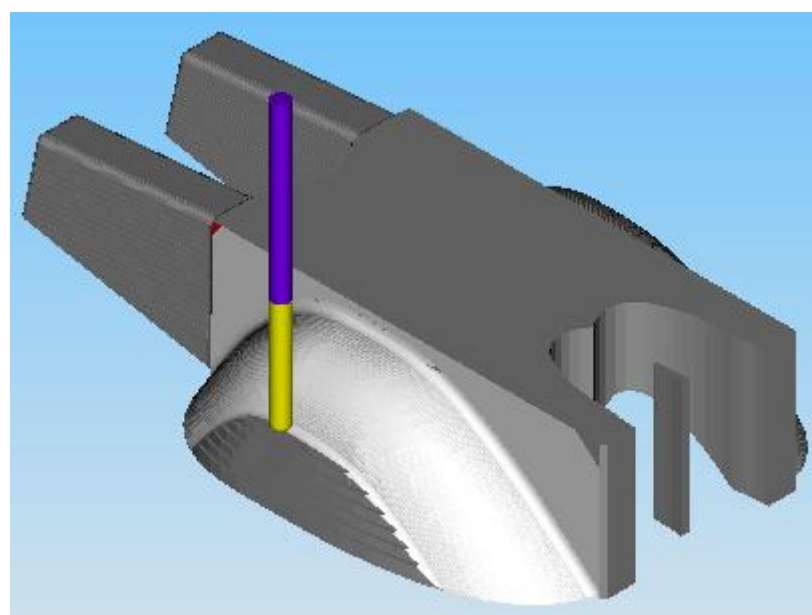
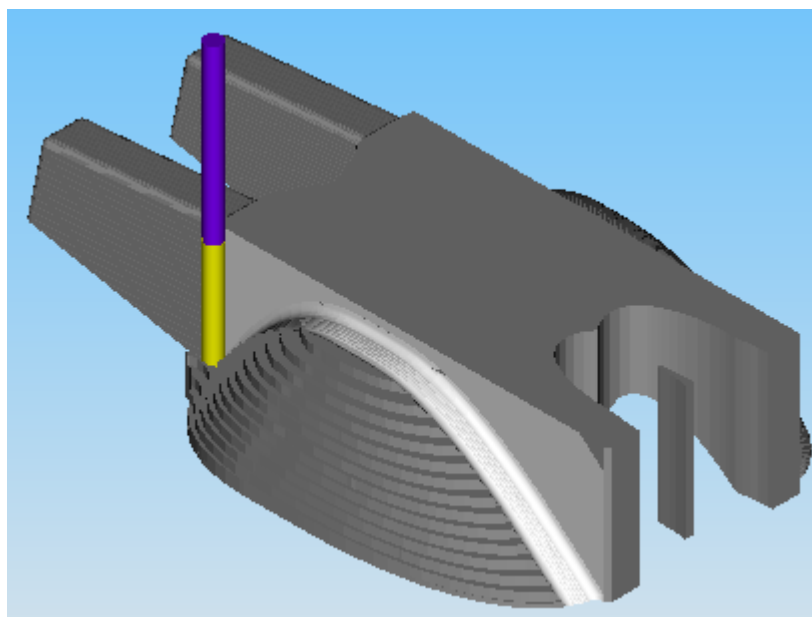
Δεν θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας διότι η κάθε στρατηγική κοπής καθορίζεται από ένα παράγοντα.

Οι εικόνες που ακολουθούν είναι από την διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM.

Στρατηγική Linear



Στρατηγική Constant StepOver



Κεφάλαιο 9

Σχεδιασμός κοπής του κάτω τμήματος ανάμεσα στα κουτάλια

9.1 Εκχόνδριση

Η εκχόνδριση του κάτω τμήματος ανάμεσα στα κουτάλια γίνεται με εργαλείο διαμέτρου 20 mm και πραγματοποιείται με τις μεθόδους Hatch και Contour. Σε αυτή τη διαδικασία ο χρόνος κοπής είναι πιο σημαντικός από τον όγκο του υλικού που απομένει.

9.1.1 Σχεδιασμός πειραμάτων και αποτελέσματα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή και τα επίπεδα τους για τις δύο στρατηγικές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Overlap	0,3	0,5	0,65
Step Down	1	2	3
Mode	Pockets	Profiles	Pockets + Profiles

Πίνακας 9.1: Παράγοντες και επίπεδα αυτών για την εκχόνδριση

Ο ορθογώνιος πίνακας που επιλέγεται είναι ο L9 διότι έχουμε τρεις παράγοντες και τρία επίπεδα για κάθε παράγοντα και απαιτούνται τουλάχιστον τρεις στήλες. Οι παράγοντες τοποθετούνται στις στήλες που 1, 2 και 3. Απομονώνοντας τις στήλες που μας ενδιαφέρουν προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Πίνακας 9.2: ορθογώνιος πίνακας L9

Με αντικατάσταση των τιμών των επιπέδων των παραγόντων στον πίνακα 9.2 προκύπτει ο πίνακας βάσει του οποίου θα εκτελεστούν τα πειράματα.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	0,3	1	Pockets
2	0,3	2	Profiles
3	0,3	3	Pockets + Profiles
4	0,5	1	Profiles
5	0,5	2	Pockets + Profiles
6	0,5	3	Pockets
7	0,65	1	Pockets + Profiles
8	0,65	2	Pockets
9	0,65	3	Profiles

Πίνακας 9.3: Πίνακας διεξαγωγής πειραμάτων.

Τα αποτελέσματα που αφορούν την εκτέλεση των πειραμάτων για την διαδικασία της αποπεράτωσης παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	06':43"	280300.992
2	02':12"	283222.198
3	02':34"	284024.104
4	04':54"	281439.344
5	04':36"	282150.872
6	02':42"	284071.793
7	10':55"	280229.281
8	04':50"	282210.516
9	01':54"	284829.141

Πίνακας 9.4: Αποτελέσματα κοπής για την Hatch

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	04':50"	274533.507
2	02':12"	283222.198
3	01':55"	278403.22
4	04':54"	281439.344
5	02':51"	276786.221
6	01':34"	278775.84
7	06':33"	274108.25
8	02':42"	277164.942
9	01':54"	284829.141

Πίνακας 9.5: Αποτελέσματα κοπής για την Contour

9.1.2 Συνάρτηση ποιικής για την εκχόνδριση

Όσον αφορά την εφαρμογή της συνάρτησης ποιικής, τους τύπους και τους περιορισμούς ισχύουν αυτά που έχουν αναφερθεί και στις προηγούμενες παραγράφους για την εκχόνδριση. Η συνάρτηση ποιικής εφαρμόζεται για κάθε μία από τις 9 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της για κάθε μία από τις στρατηγικές Hatch και Contour παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	88,5912976
2	86,4506594
3	86,8452312
4	87,6098032
5	87,6972616
6	86,9155379
7	91,4537843
8	87,8131548
9	86,5267423

Πίνακας 9.6: Συνάρτηση ποινής μεθόδου Hatch

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	85,5100521
2	86,4506594
3	84,605966
4	87,6098032
5	84,7928663
6	84,570752
7	86,663475
8	84,8434826
9	86,5267423

Πίνακας 9.7: Συνάρτηση ποινής μεθόδου Contour

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές διαπιστώνεται στη στρατηγική Hatch η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης βρίσκεται στην δεύτερη επανάληψη ενώ στην στρατηγική Contour στην έκτη επανάληψη. Ανάμεσα στις δύο στρατηγικές η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ποινής παρατηρείται στην στρατηγική Contour. Αυτή η μέθοδος επιλέγεται για την διαδικασία της εκχόνδρισης και συγκεκριμένα η έκτη επανάληψη των πειραμάτων.

Τα διαγράμματα της συνάρτησης ποινής είναι τα ακόλουθα.



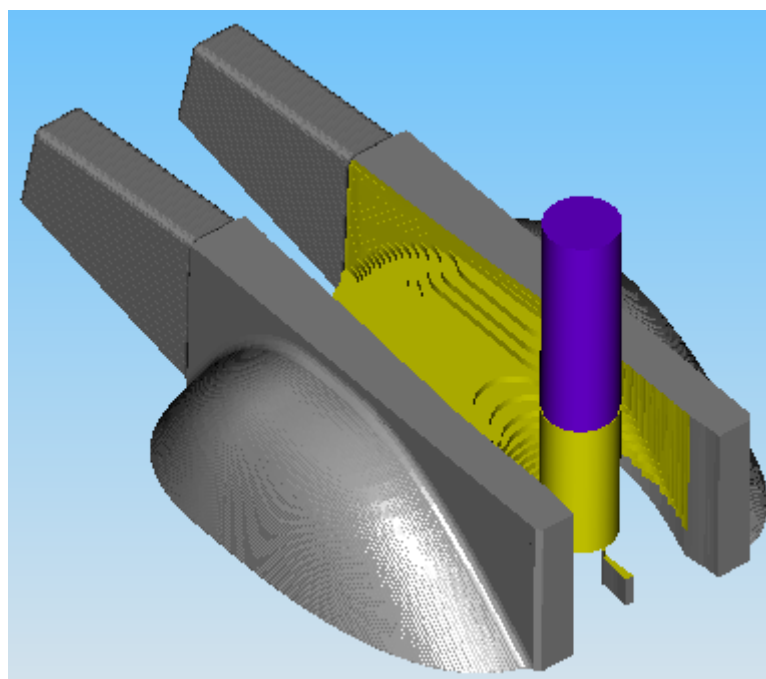
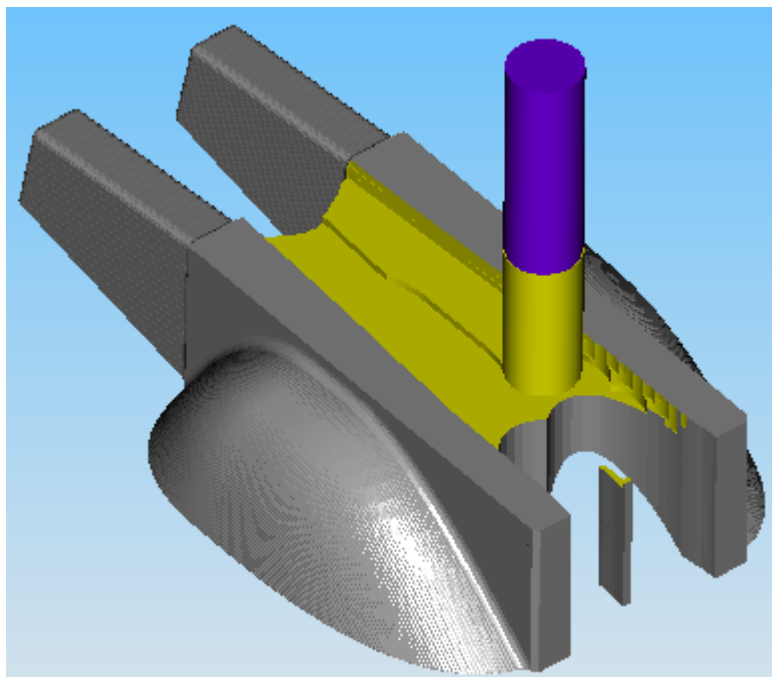
Σχήμα 9.1: Διάγραμμα συνάρτησης ποιότητος της Hatch



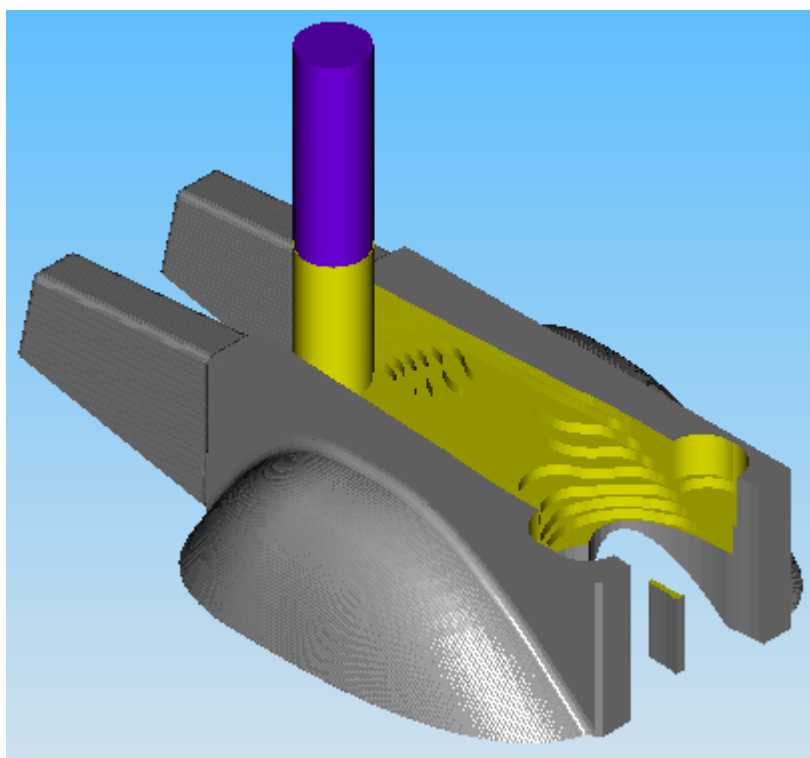
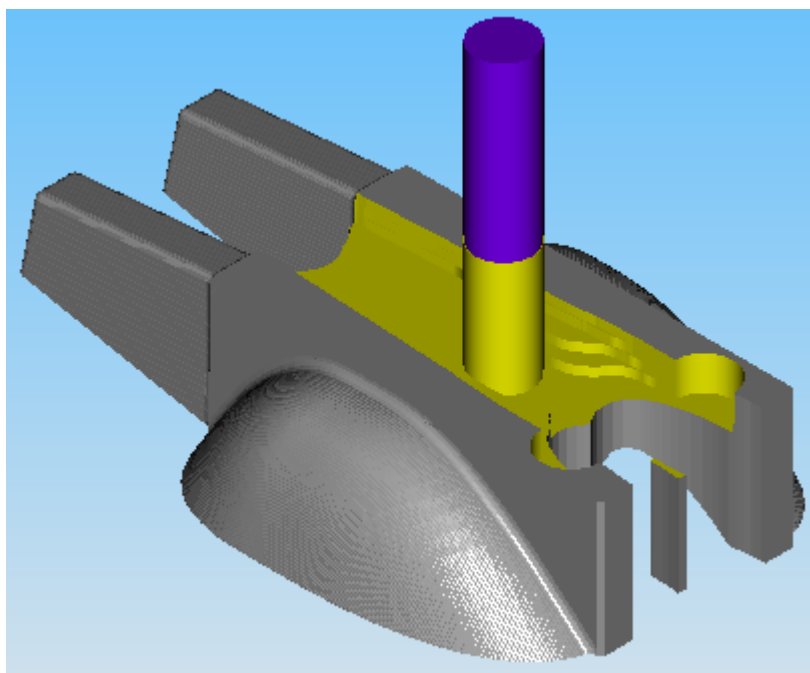
Σχήμα 9.2: διάγραμμα συνάρτησης ποιότητος της στρατηγικής Contour

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από την διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM.

Στρατηγική Hatch



Στρατηγική Contour



9.1.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την εκχόνδριση

Από τον πίνακα της ανάλυσης ευαισθησίας εκλαμβάνονται αποτελέσματα που αφορούν το ποσοστό συμμετοχής του κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα. Πριν τη συμπλήρωση του πίνακα ANOVA πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το Y και να γίνει μετατροπή των παραγόντων σε ποσοστά έτσι ώστε να είναι της ίδιας 'τάξης μεγέθους'.

Στην στρατηγική Hatch οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 660) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 284900) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	403	280300,99	61,06	98,3857	73,50
2	132	283222,2	20,00	99,4111	46,47
3	154	284024,1	23,33	99,6926	48,79
4	294	281439,34	44,55	98,7853	62,63
5	276	282150,87	41,82	99,0351	60,89
6	162	284071,79	24,55	99,7093	49,60
7	655	280229,28	99,24	98,3606	98,95
8	290	282210,52	43,94	99,0560	62,31
9	114	284829,14	17,27	99,9751	44,84

Πίνακας 9.8: Υπολογισμός Y για την Hatch

Στην στρατηγική Contour οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

Σχεδιασμός κοπής του κάτω τμήματος ανάμεσα στα κουτάλια

$$C = (A / 400) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 284900) * 100$$

Επανάληψη α/α	A	B	C	D	E
	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	290	274533,51	72,50	96,3614	80,45
2	132	283222,2	33,00	99,4111	55,14
3	115	278403,22	28,75	97,7196	51,74
4	294	281439,34	73,50	98,7853	81,93
5	171	276786,22	42,75	97,1521	60,88
6	94	278775,84	23,50	97,8504	48,28
7	393	274108,25	98,25	96,2121	97,57
8	162	277164,94	40,50	97,2850	59,43
9	114	284829,14	28,50	99,9751	52,33

Πίνακας 9.9: Υπολογισμός Y για την Contour

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς συμπληρώνονται οι πίνακες ANOVA.

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	168,76	2	277,92	no			138,96		1,71	115,02	4,89
A2	173,12										
A3	206,10										
B1	235,08	2	1490,37	no			745,19		9,15	1327,47	56,44
B2	169,67										
B3	143,23										
C1	185,41	2	502,28	no			251,14		3,08	339,39	14,43
C2	153,94										
C3	208,63										
e1	179,23	2	81,45	yes	2	81,45	40,72	81,45			
e2	195,02										
e3	173,72										
e Total					2	81,45		81,45			
Total		8	2352,03				1176,02			1781,88	24,24

Πίνακας 9.10: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Hatch

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	$\rho\%$
A1	187,33	2	92,24	no			46,12		3,57	66,38	2,83
A2	191,10										
A3	209,32										
B1	259,95	2	2139,25	no			1069,62		82,74	2113,39	90,06
B2	175,45										
B3	152,35										
C1	188,17	2	102,18	no			51,09		3,95	76,32	3,25
C2	189,39										
C3	210,19										
e1	193,66	2	12,93	yes	2	12,93	6,46	12,93			
e2	200,99										
e3	193,10										
e Total					2	12,93					
Total		8	2346,59				1173,30	12,93		2256,10	3,86

Πίνακας 9.11: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Contour

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι και οι τρεις παράγοντες συμβάλλουν στην κοπή. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ο Step Down κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο διότι ο παράγοντας αυτός καθορίζει το βήμα του κοπτικού εργαλείου άρα και τον χρόνο κοπής. Οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν μικρή έως πολύ μικρή συμμετοχή στον σχεδιασμό της κοπής παρόλα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι.

9.2 Αποπεράτωση

Στην διαδικασία της αποπεράτωση το τεμάχιο διαμορφώνεται παίρνοντας την τελική του μορφή. Οι μέθοδοι που επηρεάζουν την κοπή σε αυτό το τμήμα του σκαφιδίου είναι οι Linear και Constant StepOver. Το κοπτικό εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί έχει διάμετρο 6mm. Σε αυτή τη διαδικασία δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον όγκο του υλικού που απομένει.

9.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση

Ο καθορισμός των παραγόντων και των επιπέδων αυτών είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία. Μετά από πολλές μετρήσεις και πειράματα διαπιστώθηκε ότι στη στρατηγική Linear ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την κοπή είναι το Scallop και στην στρατηγική Constant StepOver ο μοναδικός παράγοντας που ασκεί επιρροή στα πειράματα είναι το Step Over. Παρακάτω παρουσιάζονται τα επίπεδα των παραγόντων για την κάθε στρατηγική.

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Scallop	0,1	0,5	1

Πίνακας 9.12: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Linear

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Step Over	0,5	1	1,5

Πίνακας 9.13: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Constant StepOver

Επειδή ο σχεδιασμός της κοπής εξαρτάται από ένα παράγοντα στην κάθε περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η επιλογή κάποιου ορθογώνιου πίνακα γι' αυτό και τα πειράματα εκτελούνται κατευθείαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	05':38"	267459.556
2	02':45"	267585.49
3	02':28"	267739.779

Πίνακας 9.14: Αποτελέσματα κοπής της Linear

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	11':18"	267344,894
2	06':50"	267366,74
3	04':55"	267388,925

Πίνακας 9.15: Αποτελέσματα κοπής της Constant StepOver

9.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση

Μέσω της συνάρτησης ποινής θα βρεθεί η βέλτιστη λύση για την αποπεράτωση του τμήματος ανάμεσα στα κουτάλια. Η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης ποινής έχει αναλυθεί παραπάνω γι' αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατευθείαν. Να σημειωθεί ότι ο όγκος του υλικού που απομένει έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης.

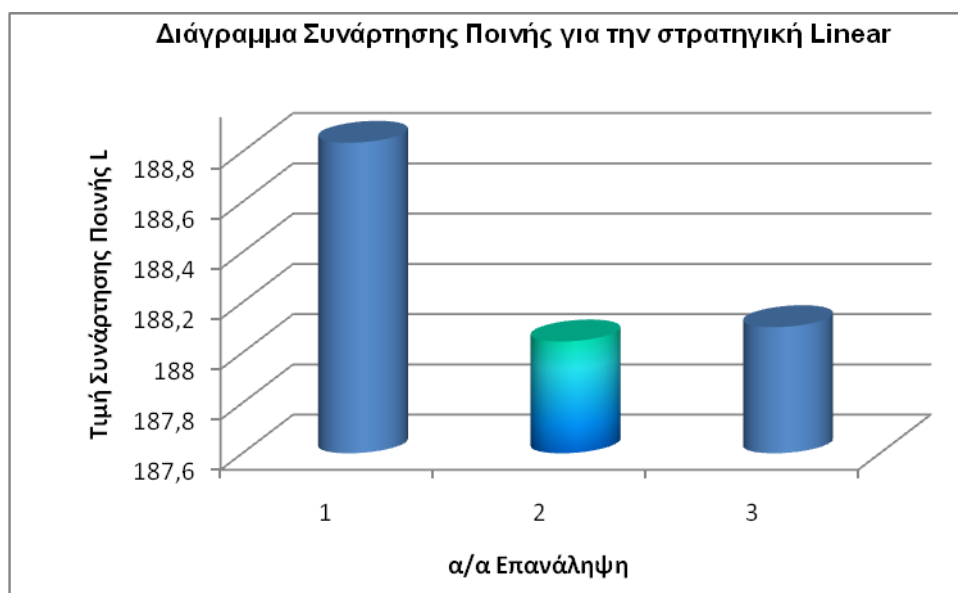
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	188,8356892
2	188,044843
3	188,1018453

Πίνακας 9.16: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Linear

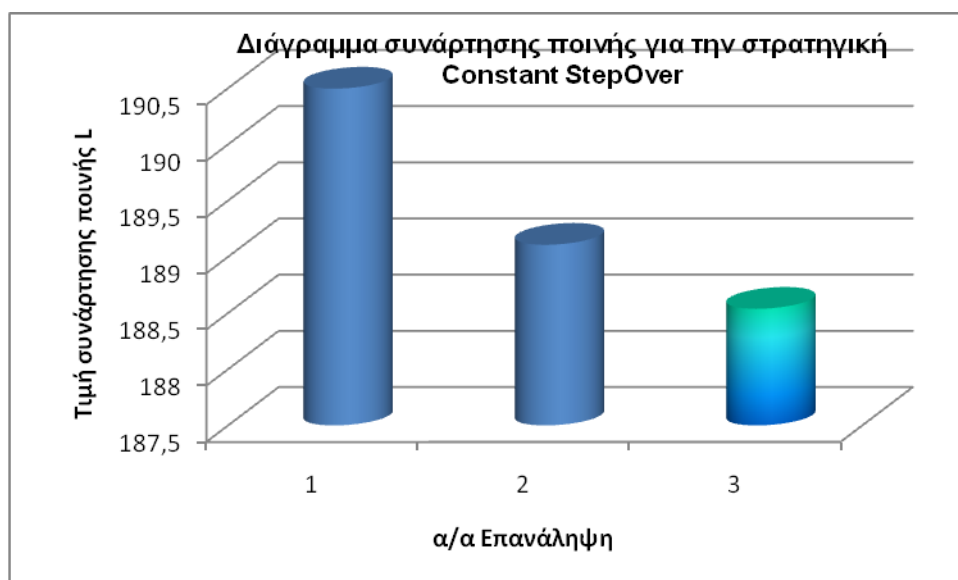
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	190,4954258
2	189,106718
3	188,5372475

Πίνακας 9.17: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Constant StepOver

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ποινής στη πρώτη στρατηγική βρίσκεται στην δεύτερη επανάληψη, ενώ στην άλλη στρατηγική στην τρίτη επανάληψη. Τελικά ως βέλτιστη στρατηγική κοπής επιλέγεται η Linear και η δεύτερη επανάληψη των πειραμάτων.



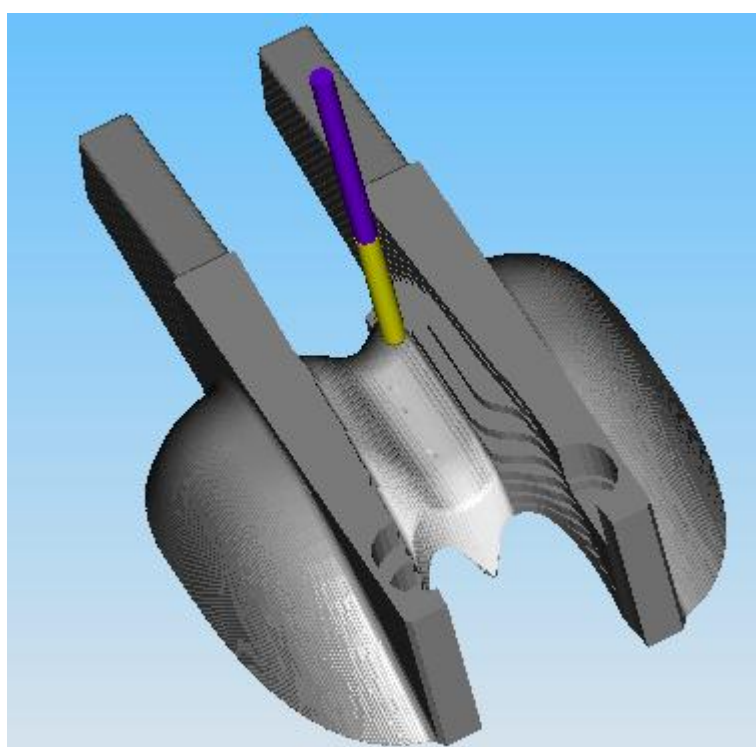
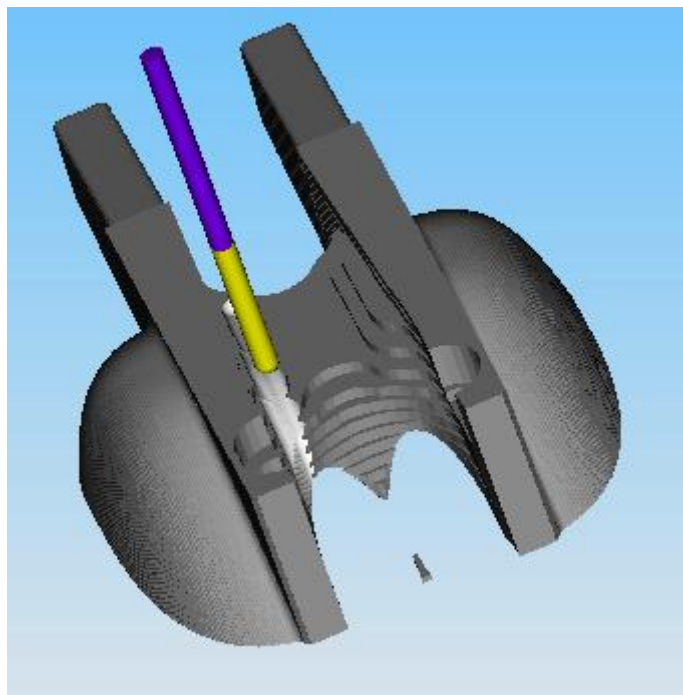
Σχήμα 9.3: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής για τη Linear



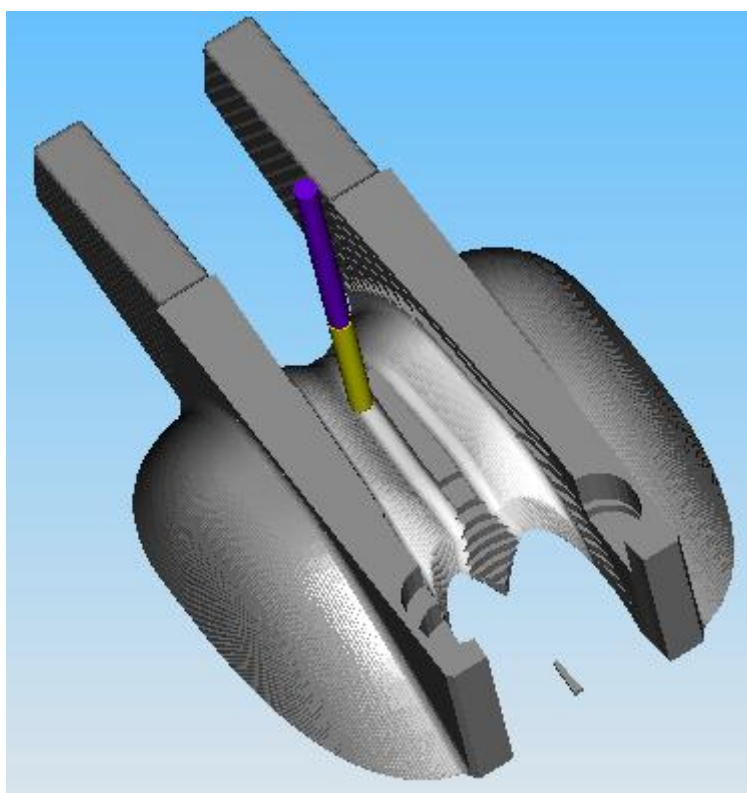
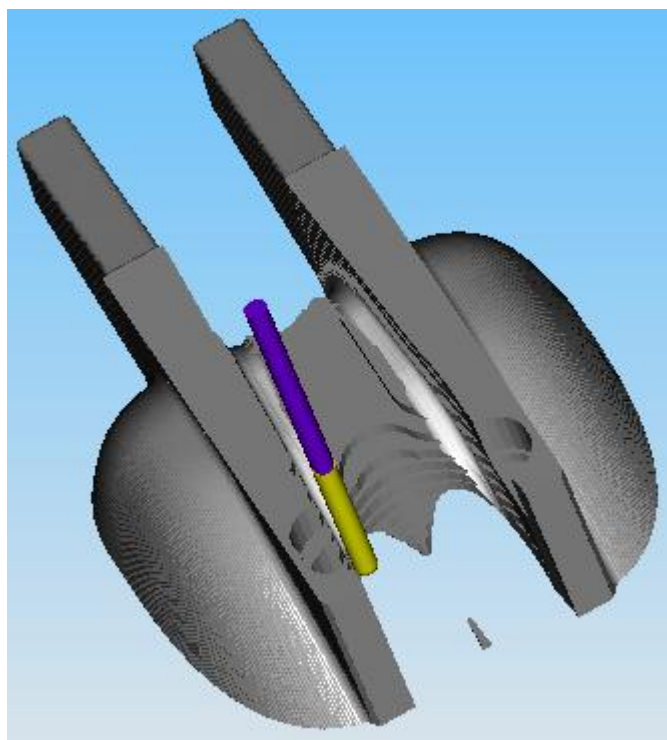
Σχήμα 9.4: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής για την Constant StepOver

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM

Στρατηγική Linear



Στρατηγική Constant StepOver



Κεφάλαιο 10

Σχεδιασμός κοπής του τμήματος της καρίνας

10.1 Εκχόνδριση

Οι συνθήκες κοπής είναι ίδιες αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου. Για την εκχόνδριση εφαρμόζονται οι στρατηγικές Hatch και Contour και το κοπτικό εργαλείο είναι διαμέτρου 20mm. Κατά την εκχόνδριση ο παράγοντας του χρόνου κοπής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα.

10.1.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων και αποτελέσματα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκχόνδριση του κυρτού τμήματος του κουταλιού είναι:

- Overlap
- Step Down
- Mode

Τα επίπεδα των παραγόντων και για τις δύο στρατηγικές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες	Επίπεδα παραγόντων		
Overlap	0,3	0,5	0,65
Step Down	1	2	3
Mode	Pockets	Profiles	Pockets + Profiles

Πίνακας 10.1: Παράγοντες και επίπεδα παραγόντων για την εκχόνδριση

Διαπιστώνεται ότι οι παράγοντες είναι τρεις και ο κάθε ένας έχει τρία επίπεδα. Ο ορθογώνιος πίνακας που είναι επιλέγεται για τον σχεδιασμό των πειραμάτων είναι ο L9 διότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχει τρεις στήλες. Οι παράγοντες τοποθετούνται αντίστοιχα στις στήλες 1, 2 και 3 του ορθογώνιου πίνακα L9. Απομονώνοντας τις στήλες που μας ενδιαφέρουν

παίρνουμε τον πίνακα 10.2. Να τονιστεί ότι δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Πίνακας 10.2: Πίνακας L9 για την εκχόνδριση του κυρτού τμήματος του κουταλιού

Με αντικατάσταση των τιμών των επιπέδων των παραγόντων στον πίνακα 10.2 προκύπτει ο επόμενος πίνακας.

Στήλη	1	2	3
Παράγοντας/ Επανάληψη	Overlap	Step Down	Mode
1	0,3	1	Pockets
2	0,3	2	Profiles
3	0,3	3	Pockets + Profiles
4	0,5	1	Profiles
5	0,5	2	Pockets + Profiles
6	0,5	3	Pockets
7	0,65	1	Pockets + Profiles
8	0,65	2	Pockets
9	0,65	3	Profiles

Πίνακας 10.3: Εκτέλεση πειραμάτων εκχόνδρισης

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα εκτελούνται τα πειράματα για την κάθε στρατηγική και λαμβάνεται ο χρόνος κοπής και ο όγκος του υλικού που απομένει. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	01':10"	258976.099
2	00':11"	259254.588
3	00':26"	259698.913
4	00':22"	259008.253
5	00':39"	259344.279
6	00':23"	259698.92
7	01':16"	258978.922
8	00':35"	259344.283
9	00':10"	259572.291

Πίνακας 10.4: Αποτελέσματα πειραμάτων εκχόνδρισης της στρατηγικής Hatch

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής	Όγκος υλικού
	t (min)	V (mm ²)
1	00':54"	259067.5
2	00':11"	259254.588
3	00':22"	259780.173
4	00':22"	259008.253
5	00':32"	259433.653
6	00':19"	259780.065
7	01':03"	259058.407
8	00':28"	259436.401
9	00':10"	259572.291

Πίνακας 10.5: Αποτελέσματα πειραμάτων εκχόνδρισης της στρατηγικής Contour

10.1.2 Συνάρτηση ποινής για την εκχόνδριση

Η βέλτιστη λύση για την διαδικασία της εκχόνδρισης βρίσκεται μέσω της συνάρτησης ποινής. Ο τρόπος εφαρμογής της έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνεπώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής της θα είναι:

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	78,4628297
2	77,8533764
3	78,0916739
4	77,8564759
5	78,0762837
6	78,070676
7	78,5056766
8	78,0482849
9	77,9416873

Πίνακας 10.6: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Hatch

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	78,09825
2	77,8533764
3	78,0880519
4	77,8564759
5	78,0540959
6	78,0670195
7	78,4385221
8	78,0269203
9	77,9416873

Πίνακας 10.7: Συνάρτηση ποινής στρατηγικής Contour

Προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή και στην μία στρατηγική βρίσκεται στην τέταρτη επανάληψη και στην άλλη στρατηγική στην δεύτερη επανάληψη. Ως στρατηγική κοπής επιλέγεται η Contour διότι η τιμή της συνάρτησης ποινής είναι μικρότερη από την αντίστοιχη βέλτιστη της στρατηγικής Hatch.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνάρτησης ποινής των δύο στρατηγικών. Με ανοιχτό χρώμα είναι οι στήλες στις οποίες αντιστοιχεί η χαμηλότερη τιμή.



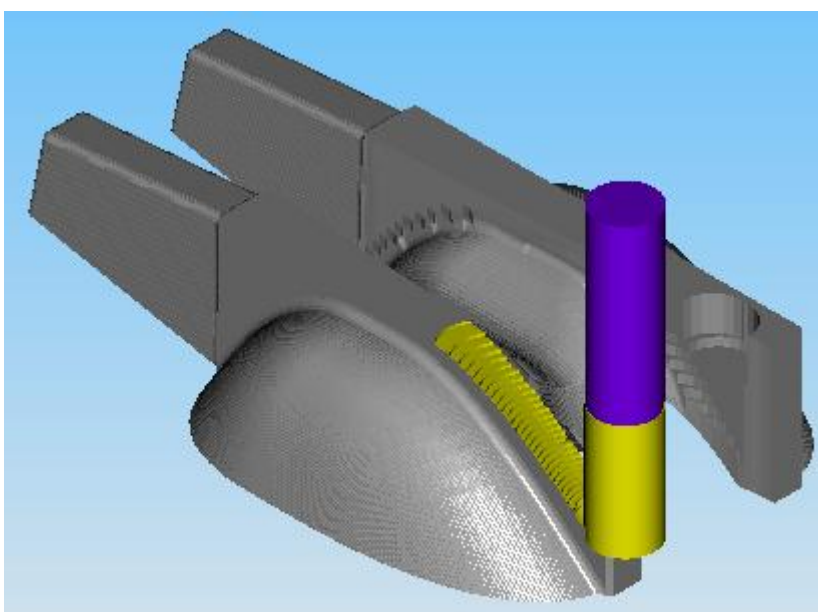
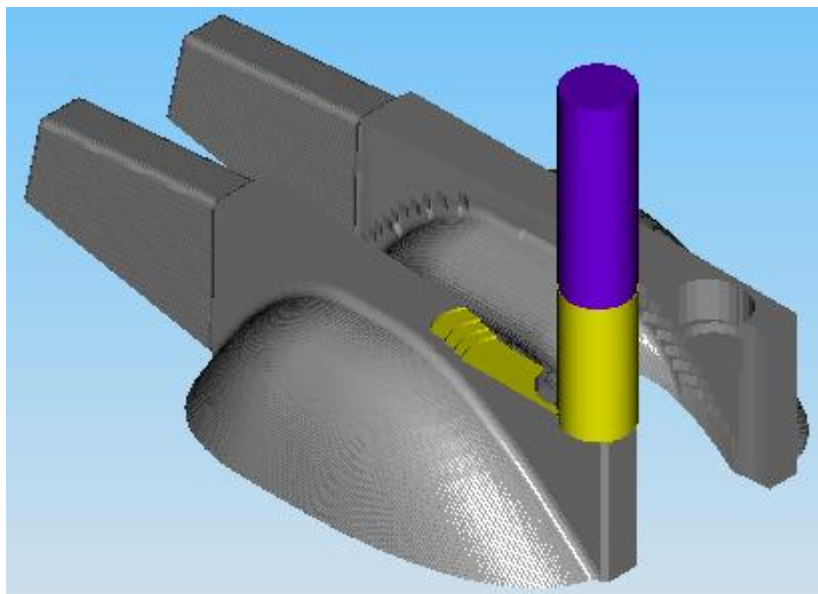
Σχήμα 10.1: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής για την στρατηγική Hatch



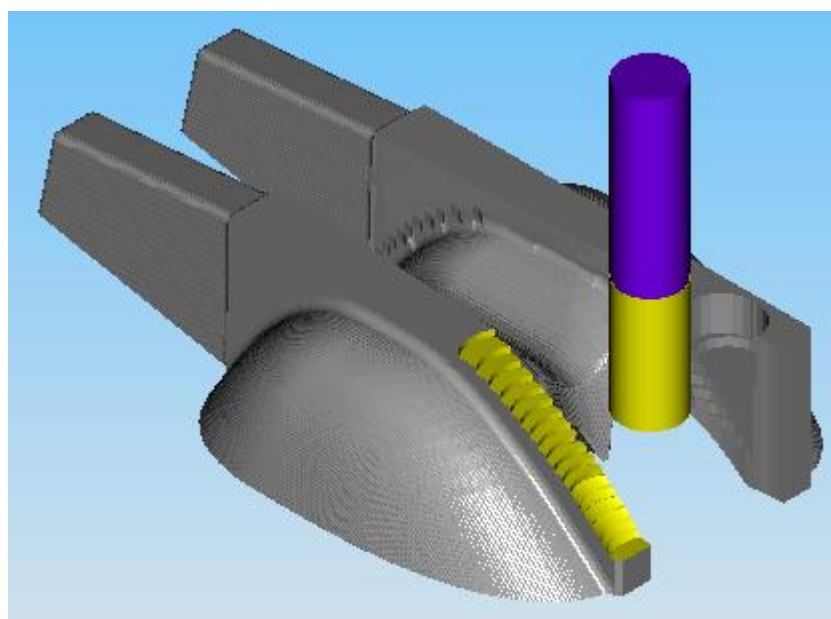
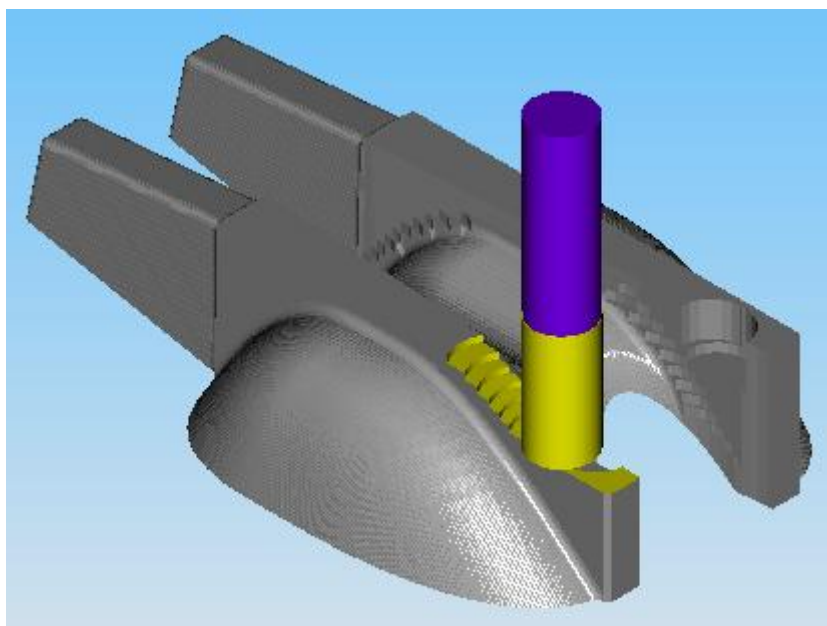
Σχήμα 10.2: Διάγραμμα συνάρτησης ποιινής για την στρατηγική Contour

Ακολουθούν κάποιες εικόνες από την κατεργασία του τεμαχίου στο SolidCAM.

Στρατηγική Hatch



Στρατηγική Contour



10.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας εκχόνδρισης

Για την ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία που έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνεται η μετατροπή των αποτελεσμάτων κοπής σε ποσοστά καθώς και ο υπολογισμός των αντίστοιχων Y για κάθε στρατηγική.

Στην στρατηγική Hatch οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 80) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 259700) * 100$$

Στον τύπο του Y χρησιμοποιείται ο συντελεστής 2 λόγω του ότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στον χρόνο κοπής.

Επανάληψη	A	B	C	D	E
α/α	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	70	258976,1	87,50	99,7213	91,57
2	11	259254,59	13,75	99,8285	42,44
3	26	259698,91	32,50	99,9996	55,00
4	22	259008,25	27,50	99,7336	51,58
5	39	259344,28	48,75	99,8630	65,79
6	23	259698,92	28,75	99,9996	52,50
7	76	258978,92	95,00	99,7223	96,57
8	35	259344,28	43,75	99,8630	62,45
9	10	259572,29	12,50	99,9508	41,65

Πίνακας 10.8: Υπολογισμός Y στρατηγικής Hatch

Στην στρατηγική Contour οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των στηλών C, D, E είναι οι εξής:

$$Y = (2 * C + D) / 3$$

$$C = (A / 65) * 100 \text{ και}$$

$$D = (B / 259800) * 100$$

Επανάληψη α/α	A	B	C	D	E
	sec	mm ³	% sec	% mm ³	Y
1	54	259067,5	83,08	99,7181	88,62
2	11	259254,59	16,92	99,7901	44,55
3	22	259780,17	33,85	99,9924	55,89
4	22	259008,25	33,85	99,6952	55,80
5	32	259433,65	49,23	99,8590	66,11
6	19	259780,07	29,23	99,9923	52,82
7	63	259058,41	96,92	99,7146	97,85
8	28	259436,4	43,08	99,8600	62,00
9	10	259572,29	15,38	99,9124	43,56

Πίνακας 10.9: Υπολογισμός Y στρατηγικής Contour

Οι συμπληρωμένοι πίνακες ANOVA των δύο στρατηγικών παρουσιάζονται παρακάτω. Σε αυτούς τους πίνακες φαίνεται αναλυτικά το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	ρ%
A1	189,02	2	161,36	yes	2	161,36	80,68	161,36			
A2	169,87										
A3	200,68										
B1	239,73	2	1492,71	no			746,35		4,61	1169,07	37,37
B2	170,68										
B3	149,15										
C1	206,53	2	1312,38	no			656,19		4,06	988,74	31,60
C2	135,67										
C3	217,36										
e1	199,01	2	162,28	yes	2	162,28	81,14	162,28			
e2	191,52										
e3	169,03										
e Total					4	323,64		161,82			
Total		8	3128,73				1564,36			2157,81	31,03

Πίνακας 10.10: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Hatch

Παράγοντες	\bar{Y}	dF	Sx	pool	dFe	Se	Vx	Ve	F	Sx	$\rho\%$
A1	189,06	2	137,26	yes	2	137,26	68,63	137,26			
A2	174,72										
A3	203,42										
B1	242,27	2	1484,66	no			742,33		5,78	1227,67	43,74
B2	172,66										
B3	152,27										
C1	203,45	2	1064,86	no			532,43		4,14	807,87	28,79
C2	143,90										
C3	219,86										
e1	198,29	2	119,73	yes	2	119,73	59,87	119,73			
e2	195,22										
e3	173,70										
e Total					4	257,00					
Total		8	2806,52				1403,26	128,50		2035,53	27,47

Πίνακας 10.11: Πίνακας ANOVA στρατηγικής Contour

Παρατηρείται ότι και στις δύο στρατηγικές παράγοντας Overlap δε συμμετέχει καθόλου στην κοπή. Το μεγαλύτερο ποσοστό επιρροής έχει ο παράγοντας Step Down. Όμως και ο παράγοντας Mode είναι εξίσου σημαντικός καθώς έχει μεγάλο ποσοστό επιρροής.

10.2 Αποπεράτωση

Κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης θα καθοριστούν οι τελικές διαστάσεις και η ποιότητα της επιφάνειας στην ‘καρίνα’ του σκαφιδίου. Οι μέθοδοι που επηρεάζουν την κοπή σε αυτό το τμήμα του σκαφιδίου είναι οι Linear και Constant StepOver. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται έχει διάμετρο 3mm.

10.2.1 Σχεδιασμός κοπής για την αποπεράτωση

Ο καθορισμός των παραγόντων και των επιπέδων αυτών είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία. Μετά από πολλές μετρήσεις και πειράματα διαπιστώθηκε ότι στη στρατηγική Linear ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την κοπή είναι το Scallop και στην στρατηγική Constant StepOver ο μοναδικός παράγοντας που ασκεί επιρροή στα πειράματα είναι το Step Over. Παρακάτω παρουσιάζονται τα επίπεδα των παραγόντων για την κάθε στρατηγική.

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Scallop	0,05	0,1	0,15

Πίνακας 10.12: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Linear

Παράγοντας	Επίπεδα παράγοντα		
Step Over	0,5	0,7	1

Πίνακας 10.13: Επίπεδα παράγοντα στρατηγικής Constant StepOver

Επειδή ο σχεδιασμός της κοπής εξαρτάται από ένα παράγοντα στην κάθε περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η επιλογή κάποιου ορθογώνιου πίνακα γι’ αυτό και τα πειράματα εκτελούνται κατευθείαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	18':54''	244079.4
2	11':08''	244159.395
3	08':16''	244237.185

Πίνακας 10.14: Αποτελέσματα κοπής της Linear

Επανάληψη α/α	Χρόνος Κοπής t (min)	Όγκος υλικού V (mm ²)
1	13':07''	244086.763
2	09':34''	244138.249
3	06':56''	244226.939

Πίνακας 10.15: Αποτελέσματα κοπής της Constant StepOver

10.2.2 Συνάρτηση ποινής για την αποπεράτωση

Μέσω της συνάρτησης ποινής θα βρεθεί η βέλτιστη λύση για την αποπεράτωση του συγκεκριμένου τμήματος του σκαφιδίου. Η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης ποινής έχει αναλυθεί παραπάνω γι' αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατευθείαν. Να σημειωθεί ότι ο όγκος του υλικού που απομένει έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης.

Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	176,41758
2	174,2355765
3	173,4140295

Πίνακας 10.16: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Linear

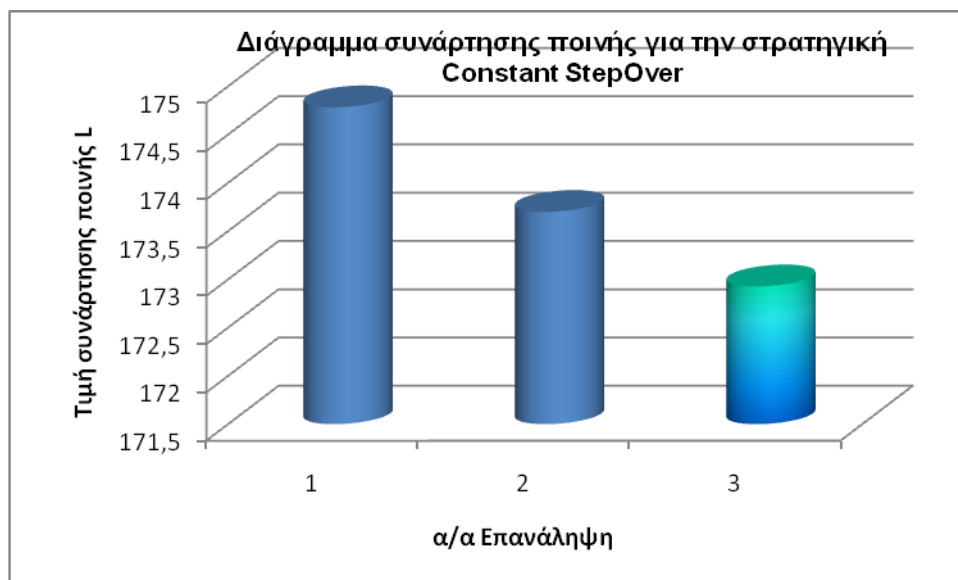
Επανάληψη α/α	Συνάρτηση Ποινής
1	174,7817341
2	173,6987743
3	172,9268573

Πίνακας 10.17: Αποτελέσματα συνάρτησης ποινής για την Constant StepOver

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης και στις δύο στρατηγικές βρίσκεται στην τρίτη επανάληψη. Τελικά ως βέλτιστη στρατηγική κοπής επιλέγεται η Constant StepOver και η τρίτη επανάληψη των πειραμάτων.



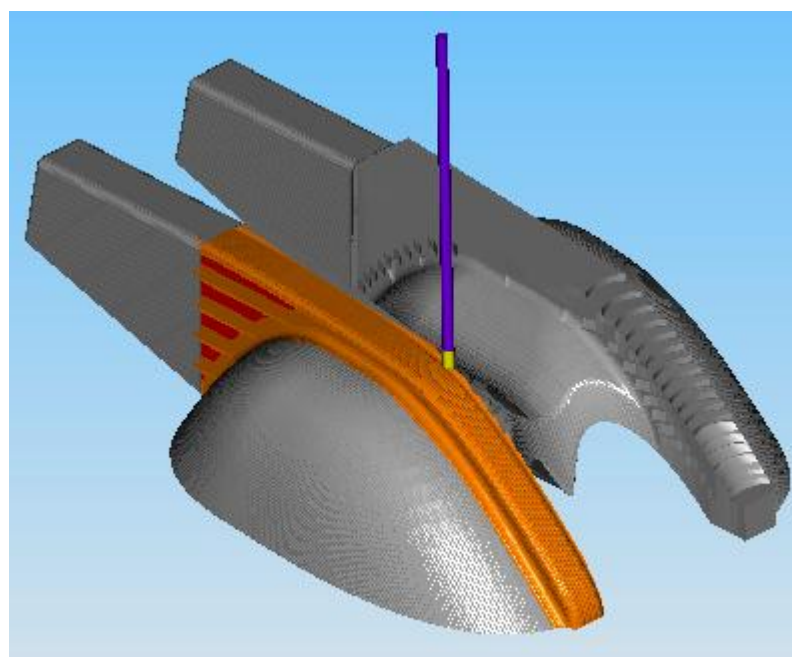
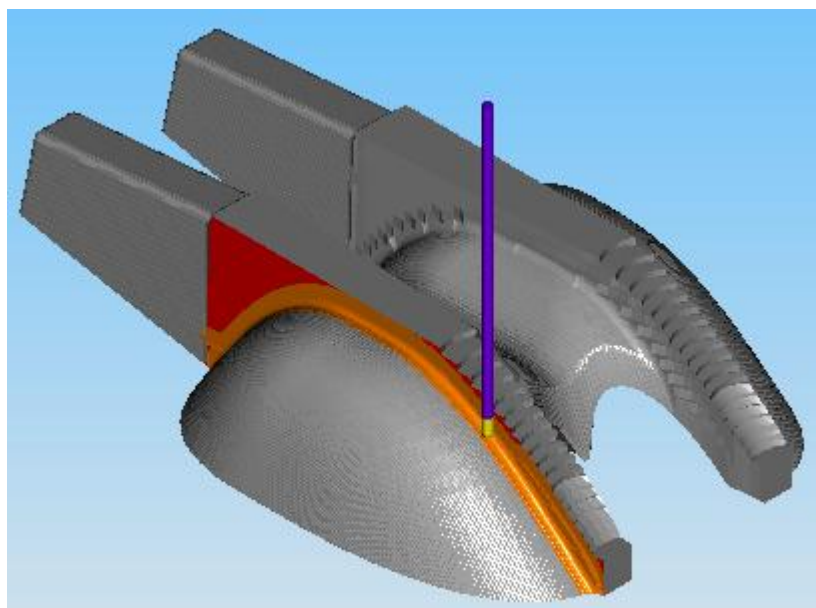
Σχήμα 10.3: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Linear



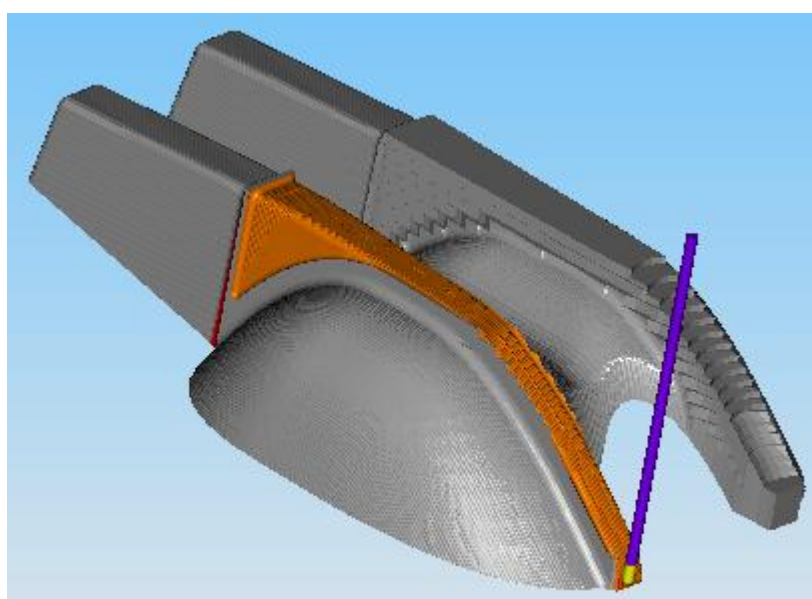
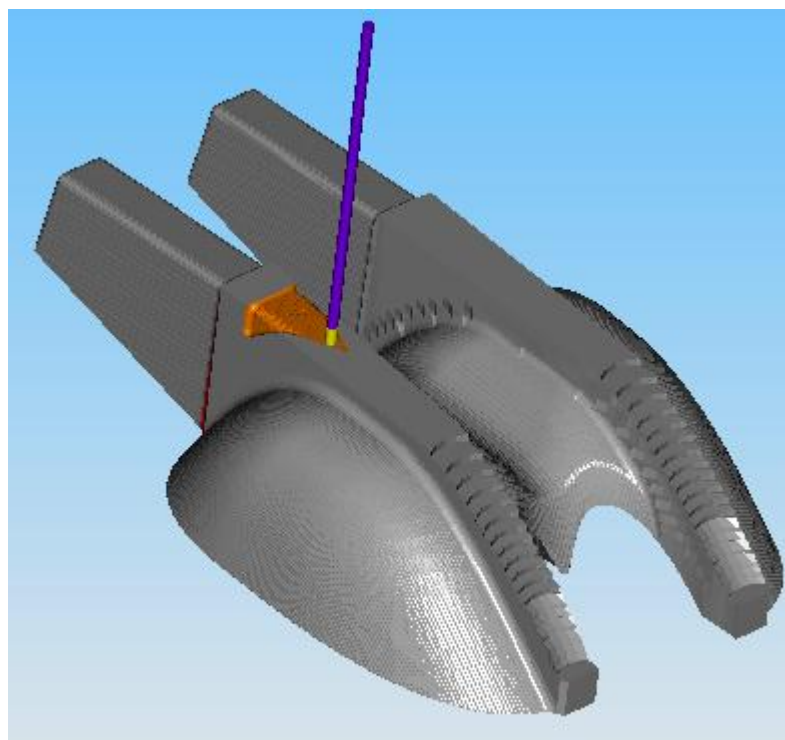
Σχήμα 10.4: Διάγραμμα συνάρτησης ποινής στρατηγικής Constant StepOver

Δεν θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας διότι η κάθε στρατηγική κοπής καθορίζεται από ένα παράγοντα. Οι εικόνες που ακολουθούν είναι από την διεξαγωγή των πειραμάτων στο SolidCAM.

Στρατηγική Linear



Στρατηγική Constant StepOver



Κεφάλαιο 11 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε ο βέλτιστος τρόπος κοπής ενός σκαφιδίου συναρτήσει του χρόνου κοπής του όγκου του υλικού που απομένει. Το σκαφίδιο χωρίστηκε σε επιμέρους περιοχές έτσι ώστε να αναλυθεί η κάθε μία περιοχή χωριστά. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Εξετάστηκαν λεπτομερώς όλες οι παράμετροι που αφορούν τις διαδικασίες της εκχόνδρισης και της αποπεράτωσης και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές σε κάθε περίπτωση.

Επιπλέον αναλύθηκαν οι παράμετροι κάθε στρατηγικής ξεχωριστά καθώς καθορίστηκε και η 'ευαισθησία', δηλαδή η επιρροή τους, στα μετρούμενα μεγέθη. Με την ανάλυση της ευαισθησίας δίνεται η δυνατότητα να γνωρίζουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή και τον βαθμό επιρροής τους.

Στην διαδικασία της εκχόνδρισης μελετήθηκαν οι στρατηγικές κοπής Hatch και Contour. Διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις περιοχές του σκαφιδίου η βέλτιστη στρατηγική είναι η Contour. Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε ότι ο παράγοντας που είναι πιο σημαντικός σε όλες τις στρατηγικές είναι ο Step Down, ο οποίος καθορίζει το βήμα του κοπτικού εργαλείου. Παρακάτω παρουσιάζονται ο βέλτιστος σχεδιασμός κοπής της κάθε περιοχής για την διαδικασία της εκχόνδρισης.

Περιοχή	Επανάληψη	Παράγοντες			Χρόνος (min)	Όγκος υλικού (mm ³)
		Overlap	Step Down	Model		
Κάτω τμήμα δοντιού	5	-	1,5	Profiles	00':31"	907856,864
Κυρτό μέρος κουταλιού	4	0,5	1	Profiles	01':56"	629534,47
Κοίλο μέρος κουταλιού	6	0,5	3	Pockets	01':45"	436019,256
Περιοχή ανάμεσα στα δόντια	6	0,5	3	Pockets	01':34"	278775,84
Καρίνα	2	0,3	2	Profiles	00':11"	259254,588

Πίνακας 11.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σχεδιασμού κοπής κατά την εκχόνδριση

Στην διαδικασία της αποπεράτωσης μελετήθηκαν οι στρατηγικές Linear, Constant-Z και Constant StepOver. Διαπιστώθηκε ότι όλες οι περιοχές του σκαφιδίου δεν έχουν την ίδια βέλτιστη στρατηγική. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική γεωμετρία της κάθε περιοχής καθώς και στον τρόπο λειτουργίας της κάθε στρατηγικής. Συνολικά η ο βέλτιστος σχεδιασμός κοπής για κάθε περιοχή του σκαφιδίου καθώς και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Περιοχή	Στρατηγική	Παράγοντες			Χρόνος (min)	Όγκος υλικού (mm ³)
		Scallop	Step Over	Angle		
Κάτω τμήμα δοντιού	Linear	0,03	-	-	06':29"	897641,906
Κυρτό μέρος κουταλιού	Linear	0,03	-	0	05':29"	512495,628
Κοίλο μέρος κουταλιού	Constant StepOver	-	1	-	05':27"	353470,284
Περιοχή ανάμεσα στα δόντια	Linear	1	-	-	02':28"	267739,779
Καρίνα	Constant StepOver	-	1	-	06':56"	244226,939

Πίνακας 11.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σχεδιασμού κοπής κατά την αποπεράτωση

Εφαρμόζοντας τις βέλτιστες στρατηγικές κοπής σε κάθε περιοχή προκύπτει ο συνολικός **χρόνος κοπής** του τεμαχίου ο οποίος είναι **01:03':18"** και ο **όγκος του υλικού που απομένει** είναι **238108,435 mm³**.

Ολοκληρώνοντας τη σειρά των πειραμάτων και αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι καθορίζοντας και βελτιώνοντας τις συνθήκες κοπής μπορεί να επιτευχθεί τόσο μείωση του συνολικού χρόνου της κατεργασίας όσο και του συνολικού κόστους παραγωγής των τεμαχίων.

Οι χρόνοι που εμφανίζονται στην παρούσα εργασία προκύπτουν από αυστηρές μαθηματικές σχέσεις χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τυχούσες φθορές σε μια πραγματική εργαλειομηχανή. Έτσι, οι χρόνοι αυτοί δίνουν μια πολύ καλή εικόνα του χρόνου κατεργασίας, χωρίς να είναι απόλυτοι. Ακόμη να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην διπλωματική εργασία (πίνακες, διαγράμματα, κλπ.) αφορούν την κατεργασία του συγκεκριμένου τεμαχίου. Συνεπώς εάν αυτό αλλάξει τα αποτελέσματα θα είναι πολύ διαφορετικά.

Βιβλιογραφία

1. Lloyd W. Condra : “Reliability improvement with design of experiments”, Marcel Dekker Inc. (1993).
2. Ross J. Phillip : “Taguchi techniques for quality engineering”, McGraw-Hill (1996).
3. A. Krimpenis, A. Fousekis and G.-C. Vosniakos: ‘Assessment of sculptured surface milling strategies using design of experiments’ International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25/5-6, pp. 444-453, 2005.
4. J.Z. Zhang, J.C. Chen and E. D. Kirby: ‘Surface roughness optimization in an end-milling operation using the taguchi design method’, Journal of Materials Processing Technology, 184, 233–239, 2007.
5. T.R Lin: ‘Optimization technique for face milling stainless steel with multiple performance characteristics’, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19, pp. 330-335, 2002.
6. J.C. Lin and C.C. Tai: ‘Accuracy optimization for mould surface profile milling’, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, pp. 15–25, 1999.
7. Y.N. Hu and W.C. Tse: ‘Tool path planning for rough machining of a cavity by layer-shape analysis’, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 14/5, pp. 321–329, 1998.
8. R. Baptista and JF Antune Simoes: ‘Three and five axes milling of sculptured surfaces’, Journal of Materials Processing Technology, 103, 398–403, 2000.
9. Z. Dong, H. Li and G.W. Vickers: ‘Optimal rough machining of sculptured parts on a CNC milling machine’, Journal of Engineering for Industry, 115, pp. 424-431, 1993.

Πηγές στο διαδίκτυο:

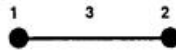
- a. <http://www.solidworks.com>
- b. <http://www.solidcam.com>
- c. <http://www.okuma.co.jp/english>
- d. <http://www.secotools.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ορθογώνιοι Πίνακες Taguchi

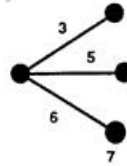
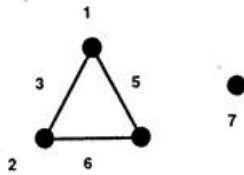
$L_4 (2^3)$

Run no.	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1



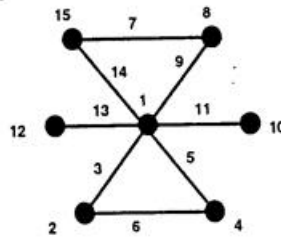
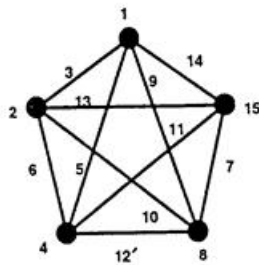
$L_8 (2^7)$

Run no.	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

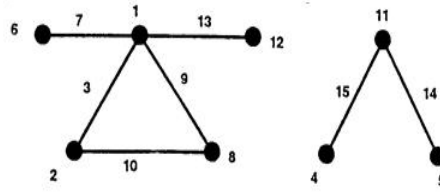


$L_{16} (2^{15})$

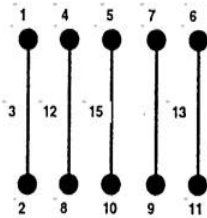
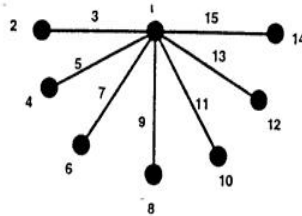
Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1



iii



iv



Run	$L_{32}(2^{31})$														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
5	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
6	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
7	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
8	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
9	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
10	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
11	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
12	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
13	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
14	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
15	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
16	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
17	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
18	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
19	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
20	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
21	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
22	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
23	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
24	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
25	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
26	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
27	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
28	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
29	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
30	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
31	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
32	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

A.2

$L_{32} (2^{31}), \text{cont'd.}$

Run	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
6	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
7	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
8	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
9	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
10	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
11	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
12	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2
13	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
14	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
15	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
16	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
17	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
18	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
19	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
20	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2
21	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
22	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1
23	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
24	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1
25	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
26	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2
27	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
28	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1
29	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
30	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1
31	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
32	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2

$L_{12} (2^{11})$

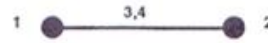
Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

$L_{18} (2^{13^7})$

Run	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

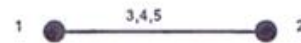
$L_9(3^4)$

Run no.	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



$L_{16}(4^9)$

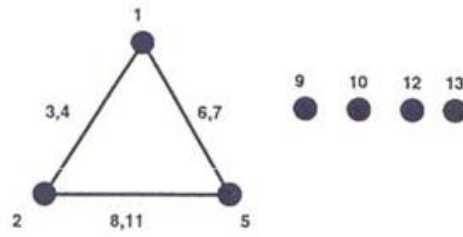
Run no.	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2



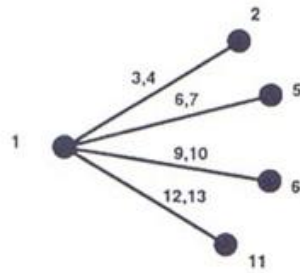
$L_{27}(3^{13})$

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

i



ii



iii

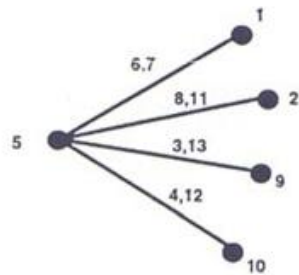


TABLE D-1 Two-Level Orthogonal Array Selection

OA	Number of two-level factors*																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
L4	4**	1	Not possible															
L8	4		2	1			Not possible											
L16	4		3	2		1												
L32	4		3	2								1						
L64	4 with repetitions		4	3	2													
L128	4 with repetitions		4	3	2													
L256	4 with repetitions		4	3	2													

TABLE D-2 Three-Level Orthogonal Array Selection

OA	Number of three-level factors							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L9	4*	1	Not possible					
L18	1							
L27	4		2	1				

TABLE D-3 Two-Level Orthogonal Array Factor Assignment

OA	Number of factors	Use column nos.	Resolution number*
L4	1-2	1,2	4 high
	3	1-3	1 low
L8	1-3	1,2,4	4 high
	4	1,2,4,7	2
	5-7	1,2,4,7,(3,5,6)†	1 low
L12	1-11	1-11	1 low
L16	1-4	1,2,4,8	4 high
	5	1,2,4,8,15	3
	6-8	1,2,4,7,8,(11,13,14)	2
	9-15	1,2,4,7,8,11,13,14,(3,5,6,9,10,12,15)	1 low
L32	1-5	1,2,4,8,16	4 high
	6	1,2,4,8,16,31	3
	7-16	1,2,4,8,16,31,(7,11,13,14,19,21,22,25,26,28)	2
	17-31	1,2,4,7,8,11,13,14,16,19,21,22,25,26,28,31,(3,5,6,9,10,12,15,17,18,20,23,24,27,29,30)	1 low

TABLE D-4 Three-Level Orthogonal Array Factor Assignment

OA	Number of factors	Use column nos.	Resolution number*
L9	1-2	1,2	4 high
	3-4	(1,2,3,4)†	1 low
L18	1-8	1-8	1 low
	1-3	1,2,5	4 high
L27	4	1,2,5,(9,10,12,13)	2
	5-13	1,2,3,4,5,(6-13)	1 low