



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

*Κατασκευή παραμετρικά σχεδιασμένου πιστονιού
βενζινοκινητήρα σε κέντρο κατεργασιών και κέντρο τόννευσης
CNC*



Επιβλέπων: Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Φοιτητής: Μαρτίκας Παναγιώτης

A.M:02103659

Αθήνα, 2014

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κο Βοσνιάκο Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική εργασία, καθώς και για τις καίριες υποδείξεις και παρατηρήσεις του κατά την εκπόνησή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και τις προϋποθέσεις που μου παρείχε κατά τη φοίτησή μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Σύνοψη

Τα πιστόνια αποτελούν το βασικότερο τμήμα στη λειτουργία των κινητήρων Otto, διότι τροφοδοτούν τον κινητήρα με ενέργεια. Ο ρόλος τους είναι να δέχονται και να μεταβιβάζουν στον στροφαλοφόρο άξονα τις πιέσεις που δημιουργούνται από το καύσιμο μίγμα και την εκτόνωση των καυσαερίων.

Ο σχεδιασμός τέτοιων γεωμετρικών μοντέλων γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Η τεχνολογία των συστημάτων CAD απαιτεί τρεις συνιστώσες: το υλικό μέρος (υπολογιστής), το λογισμικό και το χρήστη. Με τα συστήματα αυτά μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες πολύ χρήσιμες για την ανάλυση διαφόρων ιδιοτήτων όπως η μετάδοση θερμότητας, ανάλυση τάσεων – ταλαντώσεων, δυναμική εξομοίωση μηχανισμών και διαδικασιών.

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για την ανεύρεση εναλλακτικών σχεδιασμών είναι να μεταβάλουμε το μέγεθος ή το σχήμα των μερών του μηχανικού συστήματος. Τα επιμέρους τμήματα και το σύνολο πρέπει να παραμετροποιηθούν επαρκώς, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι του σχεδιασμού.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να σχεδιαστεί ένα πιστόνι βενζινοκινητήρα (μορφής ducati 999), στο οποίο να μπορούν να αλλάζουν οι βασικές διαστάσεις του, κρατώντας παράλληλα ίδια τη φιλοσοφία κοπής του. Συγκεκριμένα, το πιστόνι σχεδιάστηκε στο λογισμικό SolidWorks και πραγματοποιήθηκε συσχέτιση της διαμέτρου του με όλες τις κύριες διαστάσεις του (μέσω της εφαρμογής Xdrivexpress), ώστε να είναι δυνατός ο παραμετρικός σχεδιασμός πιστονιών ίδιας μορφής αλλά διαφορετικών διαστάσεων.

Επίσης έγινε προγραμματισμός σε περιβάλλον CAM (SolidCAM), ο οποίος περιλαμβάνει τη στρατηγική κοπής του μοντέλου του πιστονιού, καθώς και τα εργαλεία κοπής της εκάστοτε κατεργασίας.

Από το σχεδιασμό προέκυψε ότι, ειδικά για μια βιομηχανική μονάδα, ο προγραμματισμός σε περιβάλλον CAM είναι πιο ανταγωνιστικός σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους (π.χ. G κώδικας), καθώς δεν απαιτείται εκ νέου σχεδίαση της νέας έκδοσης του υπάρχοντος μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: Πιστόνι Βενζινοκινητήρα, Διαστασιολογική Παραμετροποίηση, Φασεολογία Κοπής, Σχεδιασμός στο Solidworks, Προγραμματισμός SolidCam

Abstract

Pistons are the main part in the operation of Otto engines, because they provide the motor with sufficient energy . Their role is to receive and dispose the pressures generated by the fuel mixture and exhaust gases, on the crankshaft .

The geometric design of such models is computer-aided (CAD). The technology of CAD systems requires three components : the material part (computer) software and the user. With these systems can be exported information very useful for analyzing various properties such as heat transfer , stress analysis - oscillations , dynamic simulation tools and processes .

A common approach to the exploration of alternative designs is to alter the size or shape of parts of the mechanical system. The components and the total should be configured sufficiently to achieve the design goals .

The purpose of this diploma thesis is to design an engine piston (from ducati 999),in which the basic dimensions can change, while keeping the same cutting process . More specifically, the piston is designed in the software SolidWorks and the correlation of the diameter to all of the principal dimensions is performed (by applying Xdrivexpress allowing the parametric design of pistons of the same shape but of different sizes.

Also designing in CAM software (SolidCAM) was performed, which included the cutting strategy the piston model, as well as the cutting tools of each process.

Designing proved that, especially for an industrial unit, the CAM programming environment is more competitive compared with traditional methods (eg G code), and it does not require re- designing of the new version of the existing model.

Keywords: Petrol Engine Piston, Parametric Design, Cutting Routings, Solidworks Designing, SolidCam Programming

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την διαστασιολογική παραμετροποίηση ενός συγκεκριμένου πιστονιού για κινητήρα Otto και τον προγραμματισμό κοπής του σε CAM περιβάλλον.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγική περιγραφή όσον αφορά τη λειτουργία, τα βασικά μέρη και γενικά την κατασκευή του πιστονιού και την χρησιμότητα του σε Μηχανές Εσωτερικές Καύσης. Επίσης γίνεται μια εισαγωγή στον παραμετρικό σχεδιασμό σε συστήματα CAD και αναλύονται τα κύρια φασεολόγια κατεργασιών κοπής.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια ανασκόπηση γύρω από τις πολυαξονικές κατεργασίες CNC αλλά και την παραμετρική σχεδίαση καθώς και τους περιορισμούς που προκύπτουν από διάφορες μελέτες επιστημόνων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται στο πρόγραμμα DriveWorks για την διαστασιολογική παραμετροποίηση ορισμένου μοντέλου καθώς και αναφορά στα προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται λεπτομερής περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται στο SolidCAM για τον προγραμματισμό της κοπής του μοντέλου σε περιβάλλον CAM, της στρατηγικής που ακολουθήθηκε και την επιλογή των εργαλείων για την κάθε κατεργασία. Επίσης γίνεται αναφορά σε τρόπους συγκράτησης του τεμαχίου για την συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς και για την επιλογή κατάλληλου συστήματος συγκράτησης εργαλείων.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση των τεχνικών που ακολουθήθηκαν για τον προγραμματισμό σε CAM, η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνικών καθώς και ένα παράδειγμα για την λειτουργία της παραμετρικότητας.

Τέλος στο κεφάλαιο 6 αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία με έμφαση στον διαστασιολογικό παραμετρικό σχεδιασμό και τα οφέλη του.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Σύνοψη	4
Abstract.....	5
Περίληψη	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη λειτουργία του εμβόλου	15
1.1 Πιστόνια σε κινητήρες Otto-λειτουργία, κρίσιμες διαστάσεις, ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας	15
1.2 Παραμετρικός σχεδιασμός σε συστήματα CAD	23
1.3 Φασεολόγια κατεργασιών κοπής	26
1.4 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παραμετροποίηση Μοντέλου	36
3.1 Βήματα παραμετροποίησης μοντέλου στο Solidworks	36
3.2 Επιλογή διαστάσεων και χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου πιστονιού με τη βοήθεια του DriveWorksExpress	38
3.3 Ορισμός τιμών των παραμέτρων του μοντέλου.....	44
3.4 Δημιουργία του πιστονιού.....	48
3.5 Προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά την παραμετροποίηση .	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Φασεολόγια Κοπής	58
4.1 Φάσεις κατεργασίας	58
4.2 Προσανατολισμοί τεμαχίου	59
4.2.1 Χαρακτηριστικά σημεία στις CNC εργαλειομηχανές	59
4.2.2 Προσανατολισμοί τεμαχίου.....	62
4.3 Επιλογή εργαλείων	66
4.4 Συγκράτηση τεμαχίου πάνω στην εργαλειομηχανή	67
4.5 Μηδενισμός αρχικού τεμαχίου πάνω στην εργαλειομηχανή	70
4.6 Επιλογή συστήματος συγκράτησης εργάλειου – εργαλειοδέτη (κόνος).....	73

4.7 Φασεολόγια κοπής.....	74
4.7.1 Κατεργασία Ποκέτας βαλβίδων	74
4.7.2 Κατεργασία της “φούστας” του πιστονιού και οπής πείρου από αριστερά	83
4.7.3 Κατεργασία της “φούστας” του πιστονιού και οπής πείρου από δεξιά 94	
4.7.4 Κατεργασία κάτω μέρους πιστονιού.....	105
4.8 Πιθανοί περιορισμοί για εξασφάλιση παραμετρικότητας	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Κώδικας CNC για κατασκευή πιστονιών.....	112
5.1 Επιλογή στρατηγικών στο Solidcam	112
5.2 Χρόνοι εκχόνδρισης και αποπεράτωσης για στρατηγική τεχνολογίας περιγράμματος	117
5.2.1 Δημιουργία ποκέτας πιστονιού.....	118
5.2.2 Κατεργασία της φούστας του πιστονιού	119
5.2.3 Δημιουργία της οπής για τον πείρο του πιστονιού	121
5.3 Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών εκχόνδρισης και αποπεράτωσης του πιστονιού	124
5.4 Παραμετρικός ορισμός και προγραμματισμός κοπής πιστονιού 90mm.....	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	130
Παράρτημα Α	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	137

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Τμήμα εμβολοφόρου κινητήρα [].....	15
Εικόνα 1.2: Κύκλος Otto σε διάγραμμα p-v [Ρακόπουλος 1988]	16
Εικόνα 1.3: Χρόνοι τετράχρονου κινητήρα [Ρακόπουλος 1988]	16
Εικόνα 1.4: Μέρη πιστονιού [Ρακόπουλος 2000]	18
Εικόνα 1.5: Ελατήρια και πείρος πιστονιού [Mitsubishi lancer Eno]	21
Εικόνα 1.6: Πιστόνι μονοκύλινδρου κινητήρα (α) διάμετρος οπής 1.2’’ και (β) διάμετρος οπής 1.6’’ [Chang 2011]	24
Εικόνα 1.7: Απεικόνιση του αλγόριθμου Αναγνώρισης Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών, (a) μοντέλο επιφάνειας με επιλεγμένη την επιφάνεια μιας τρύπας, (b) η τρύπα αναγνωρίστηκε και αφαιρέθηκε, έχει επιλεγεί η προεξέχουσα όψη του κυλίνδρου, (c) οι κυλινδρικές προεξοχές αναγνωρίστηκαν, και επιλέχθηκε η βάση του τμήματος, και (d) όλα τα χαρακτηριστικά αναγνωρίστηκαν και σχεδιάστηκαν σε ένα στερεό μοντέλο. [Chang 2011].....	26
Εικόνα 1.8: Τρεις τύπου σκαψίματος σε κατεργασία 5 αξόνων (a) τοπικό σκάψιμο, (b) οπίσθιο σκάψιμο (c) ολικό σκάψιμο (σύγκρουση) [Lasemi 2010]	28
Εικόνα 3.1: Επιλογή κύριων παραμέτρων του μοντέλου μας	36
Εικόνα 3.2: Κύρια στοιχεία του μοντέλου.....	37
Εικόνα 3.3: Γεωμετρία της ποκέτας των βαλβίδων ειαγωγής	38
Εικόνα 3.4: Διεπιφάνεια του Driveworks για τη δημιουργία βάσης δεδομένων	39
Εικόνα 3.5: Επιλογή κάποιου προϋπάρχοντος μοντέλου από τη βιβλιοθήκη ..	40
Εικόνα 3.6: Συνέχιση δημιουργίας νέου μοντέλου.....	40
Εικόνα 3.7: Επιλογή των ονομάτων των κύριων διαστάσεων του πιστονιού ..	41
Εικόνα 3.8: Επιλογή των κύριων διαστάσεων για τον πείρο του πιστονιού	42
Εικόνα 3.9: Επιβεβαίωση εφαρμογής των κύριων διαστάσεων και μεταβλητών του μοντέλου.....	43
Εικόνα 3.10: Συσχέτιση μεταξύ δισδιάστατων σχεδίων.....	44
Εικόνα 3.11: Ορισμός του εύρους τιμών των παραμέτρων του πιστονιού	45

Εικόνα 3.12: Ορισμός του εύρους τιμών των παραμέτρων του πείρου του πιστονιού.....	46
Εικόνα 3.13: Επισκόπηση των εισαχθέντων πληροφοριών στο πρόγραμμα....	47
Εικόνα 3.14: Επιλογή των κανόνων – παραμέτρων που καθορίζουν το μοντέλο	48
Εικόνα 3.15: Απεικόνιση του δημιουργηθέντος σχεδίου του πιστονιού	48
Εικόνα 3.16: Πιστόνι από Ducati 999.....	49
Εικόνα 3.17: Under Defined Sketch	51
Εικόνα 3.18: Ποκέτες που δεν μπορούσαν να κατεργαστούν με CNC	52
Εικόνα 3.19: Το δέντρο σχεδίασης	53
Εικόνα 4.1: Επιθυμητή τελική μορφή του πιστονιού	59
Εικόνα 4.2: Άξονες κέντρου κατεργασίας 3 αξόνων.....	59
Εικόνα 4.3: Σημείο MAC 1.....	62
Εικόνα 4.4: Σημείο MAC 2.....	63
Εικόνα 4.5: Σημείο MAC 3.....	64
Εικόνα 4.6: Σημείο MAC 5.....	65
Εικόνα 4.7: Σημείο MAC 6.....	65
Εικόνα 4.8: Σημείο MAC 4.....	66
Εικόνα 4.9: Τα κονδύλια και τα αντίστοιχα τρυπάνια τους.....	67
Εικόνα 4.10: Μέγγενη τύπου swivel and tilt	68
Εικόνα 4.11: Χρησιμοποίηση καβαλέτων V για υποστήριξη κυλινδρικού τεμαχίου	69
Εικόνα 4.12: NC tilting rotary table.....	70
Εικόνα 4.13: Ο ανιχνευτής OMP	70
Εικόνα 4.14: Σελίδα επιλογής εργαλείων σε εργαλειομηχανή HAAS	71
Εικόνα 4.15: Ορισμός 0 στον άξονα Z	72
Εικόνα 4.16: Ορισμός 0 σε άξονα X και Y.....	72
Εικόνα 4.17: Τυπικοί εργαλειοδέτες.....	73
Εικόνα 4.18: Ορισμός σημείου 0	74
Εικόνα 4.19: Απεικόνιση της κατεργασίας ποκέτας των βαλβίδων με κονδύλι διαμέτρου 10 mm.....	76

Εικόνα 4.20: Απεικόνιση τροχιάς κοπτικού εργαλείου στη ποκέτα βαλβίδων εισαγωγής.....	76
Εικόνα 4.21: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας για την ποκέτα βαλβίδων εισαγωγής.....	77
Εικόνα 4.22: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	78
Εικόνα 4.23: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	79
Εικόνα 4.24: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	79
Εικόνα 4.25: Απεικόνιση τροχιάς κοπτικού εργαλείου στη ποκέτα βαλβίδων εξαγωγής	80
Εικόνα 4.26: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας για την ποκέτα βαλβίδων εξαγωγής	80
Εικόνα 4.27: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	81
Εικόνα 4.28: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	82
Εικόνα 4.29: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	82
Εικόνα 4.30: Ορισμός σημείου 0	83
Εικόνα 4.31: Απεικόνιση της κατεργασίας της «φούστας» του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 12 mm	84
Εικόνα 4.32: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας της οπής του πείρου	85
Εικόνα 4.33: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	86
Εικόνα 4.34: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	87
Εικόνα 4.35: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	87
Εικόνα 4.36: Απεικόνιση της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού με κονδύλια διαμέτρου 15 mm και 12 mm.....	89
Εικόνα 4.37: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	89
Εικόνα 4.38: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	90
Εικόνα 4.39: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	90
Εικόνα 4.40: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας.....	91
Εικόνα 4.41: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	92
Εικόνα 4.42: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	93
Εικόνα 4.43: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	93
Εικόνα 4.44: Ορισμός σημείου 0	94

Εικόνα 4.45: Απεικόνιση της κατεργασίας της «φούστας» του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 12 mm	95
Εικόνα 4.46: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας.....	96
Εικόνα 4.47: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	97
Εικόνα 4.48: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	98
Εικόνα 4.49: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	98
Εικόνα 4.50: Απεικόνιση της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού με κονδύλια διαμέτρου 15 mm και 12 mm.....	100
Εικόνα 4.51: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	100
Εικόνα 4.52: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	101
Εικόνα 4.53: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	101
Εικόνα 4.54: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας.....	102
Εικόνα 4.55: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	103
Εικόνα 4.56: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	104
Εικόνα 4.57: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	104
Εικόνα 4.58: Ορισμός σημείου 0	105
Εικόνα 4.59: Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας του κάτω μέρους του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 10 mm.....	106
Εικόνα 4.60: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας.....	107
Εικόνα 4.61: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία	108
Εικόνα 4.62: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής.....	109
Εικόνα 4.63: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	109
Εικόνα 4.64: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας.....	110
Εικόνα 4.65: Αποτέλεσμα κατεργασίας.....	110
Εικόνα 5.1: Το τεμάχιο στην αρχική και την τελική μορφή του	112
Εικόνα 5.2: Το σύστημα συντεταγμένων στο Solidworks (αριστερά) και το σύστημα συντεταγμένων στο SolidCam (δεξιά).....	112
Εικόνα 5.3: Ομόρροπο (αριστερά) και αντίρροπο (δεξιά) φρεζάρισμα	113
Εικόνα 5.4: Κατεργασία με στρατηγική ανοικτής και κλειστής ποκέτας	113
Εικόνα 5.5: Η τεχνική της επέκτασης στην κατεργασία ανοικτής ποκέτας ...	114
Εικόνα 5.6: Εφαρμογή της επικάλυψης (overlap) σε κατεργασία ποκέτας....	115

Εικόνα 5.7: Επιλογή αποστάσεων για φινίρισμα της ποκέτας	115
Εικόνα 5.8: Κατεργασία διάτρησης	116
Εικόνα 5.9: Επικοινωνία μεταξύ DriveWorks και SolidCam.....	117
Εικόνα 5.10: Δημιουργία του αριστερού μέρους της ποκέτας του πιστονιού	118
Εικόνα 5.11: Ολοκλήρωση της δεξιάς ποκέτας του πιστονιού	118
Εικόνα 5.12: Φρεζάρισμα της φούστας του πιστονιού με την τεχνική περιγράμματος	119
Εικόνα 5.13: Ολοκλήρωση κατεργασίας της φούστας του πιστονιού.....	120
Εικόνα 5.14: Κατεργασία του κάτω μέρους του πιστονιού	120
Εικόνα 5.15: Συνέχιση της διαδικασίας φρεζαρίσματος του κάτω μέρους του πιστονιού	121
Εικόνα 5.16: Διαδικασία διάτρησης για τη δημιουργία της οπής του πείρου (για τη μια οπή)	121
Εικόνα 5.17: Κατεργασία φρεζαρίσματος της νεοδημιουργηθείσας οπής του πείρου για τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειάς της.....	122
Εικόνα 5.18: Δεύτερη διάτρηση για τη δημιουργία της άλλης οπής του πείρου	122
Εικόνα 5.19: Κατεργασία φρεζαρίσματος της δεύτερης οπής του πείρου για τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειάς της	123
Εικόνα 5.20: Κατεργασία με την τεχνολογία (hatch)	125
Εικόνα 5.21: Κατεργασία με την τεχνολογία ς (hatch) και φινιρίσματος της επιφάνειας	126
Εικόνα 5.22: Αλλαγή διαμέτρου κεφαλής εμβόλου	127
Εικόνα 5.23: Τελική μορφή κεφαλής εμβόλου 90mm	128
Εικόνα 5.24: Αλλαγή διαμέτρου stock model	129
Εικόνα 6.1: Βασικά βήματα των παραμέτρων μοντελοποίησης	130

Ευρετήριο Πινάκων

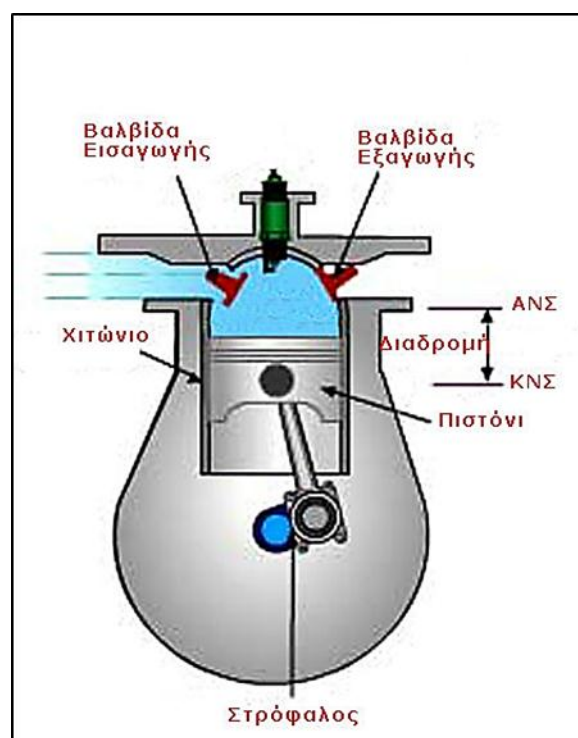
Πίνακας 4.1: Πίνακας επιλογής κονδυλίων των βαλβίδων	75
Πίνακας 4.2: Πίνακας επιλογής κονδυλίου κατεργασίας της «φούστας» του πιστονιού	84
Πίνακας 4.3: Πίνακας επιλογής κονδυλίων κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού	88
Πίνακας 4.4: Πίνακας επιλογής συνθηκών αποπεράτωσης της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού	88
Πίνακας 4.5: Πίνακας επιλογής κονδυλίου κατεργασίας της «φούστας» του πιστονιού	95
Πίνακας 4.6: Πίνακας επιλογής κονδυλίων κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού	99
Πίνακας 4.7: Πίνακας επιλογής συνθηκών αποπεράτωσης της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού	99
Πίνακας 4.8: Πίνακας επιλογής κονδυλίου κατεργασίας του κάτω μέρους του πιστονιού	106
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός-Συγκριτικός πίνακας μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη λειτουργία του εμβόλου

1.1 Πιστόνια σε κινητήρες Otto-λειτουργία, κρίσιμες διαστάσεις, ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας

Ο σκοπός του πιστονιού (εμβόλου) είναι να δέχεται και να μεταβιβάζει στον στροφαλοφόρο άξονα, μέσω του πείρου και του διωστήρα, τις πιέσεις που δημιουργούνται από την καύση του καυσίμου μίγματος και την εκτόνωση των καυσαερίων.

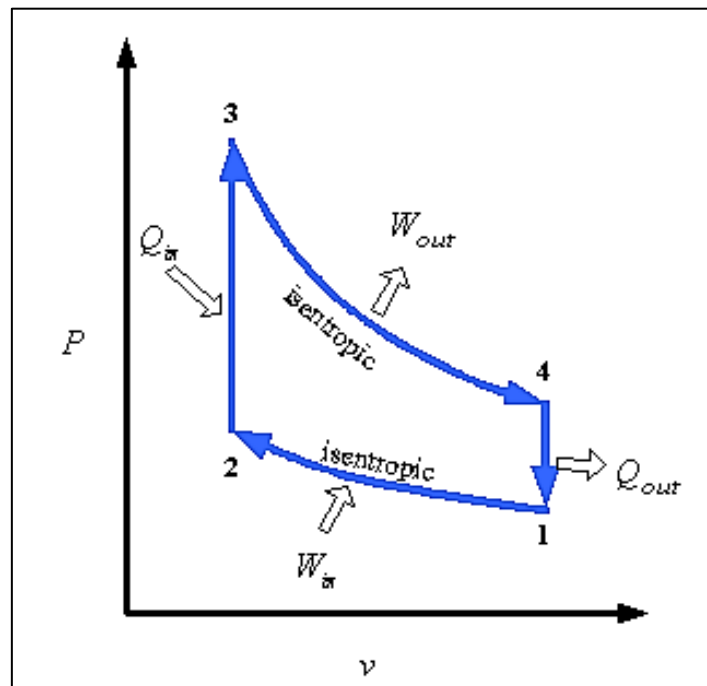
Δημιουργεί το κενό (υπό-πίεση) για την εισαγωγή του μίγματος και σπρώχνει τα καυσαέρια για τον καθαρισμό του κυλίνδρου. Εργάζεται σε δύσκολες συνθήκες επειδή κατά τη λειτουργία του κινητήρα αναπτύσσονται στο χώρο καύσης υψηλές πιέσεις (στους βενζινοκινητήρες 25-38 kg/cm²) και υψηλές θερμοκρασίες (1500 °C – 2500 °C).



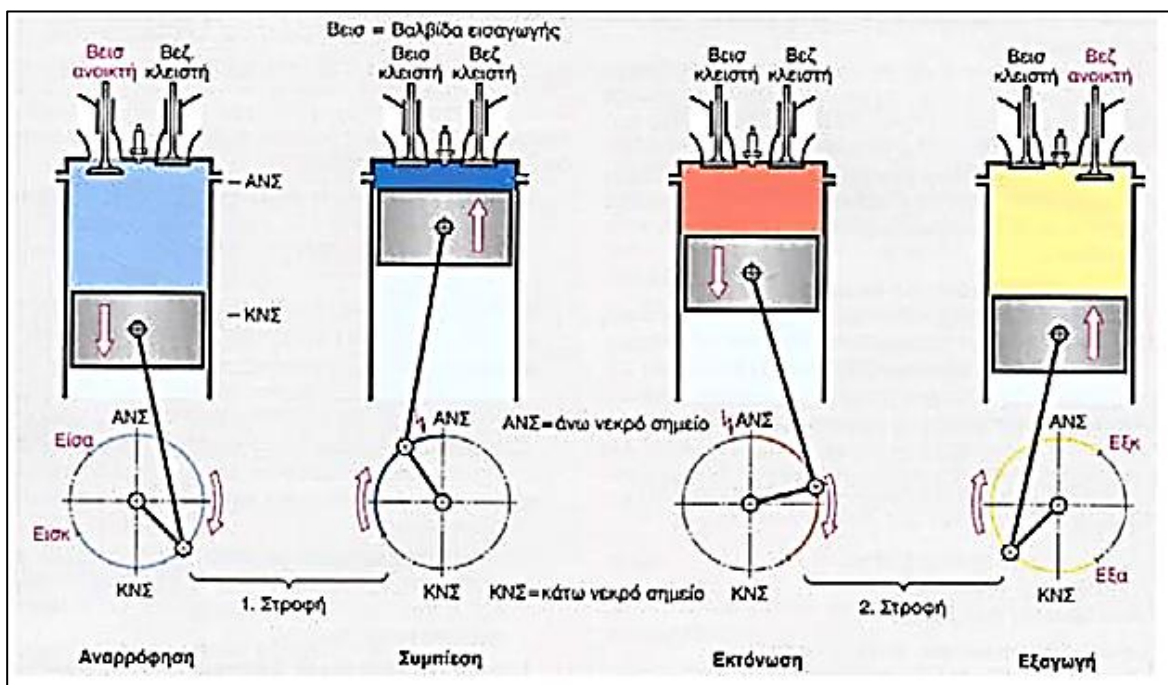
Εικόνα 1.1: Τμήμα εμβολοφόρου κινητήρα

Ο κύκλος λειτουργίας στους κινητήρες των περισσότερων αυτοκινήτων και γενικά άλλων μηχανών εσωτερικής καύσεως, είναι τετράχρονος, ή κύκλος του

Οττο, κατά τον οποίον παράγεται έργο μόνο από τη μία από τις τέσσερις διαδρομές του εμβόλου.



Εικόνα 1.2: Κύκλος Otto σε διάγραμμα p-v [Ρακόπουλος 1988]



Εικόνα 1.3: Χρόνοι τετράχρονου κινητήρα [Ρακόπουλος 1988]

Στην εκτέλεση του κύκλου Otto σημαντικός είναι ο ρόλος του πιστονιού (το οποίο ονομάζεται και έμβολο). Τα πιστόνια, ωθούμενα από τη διαστολή του μείγματος βενζίνης / αέρα που καίγεται στο θάλαμο καύσεως, τροφοδοτούν τον κινητήρα με ενέργεια. Όταν ένας κινητήρας κοινού αυτοκινήτου λειτουργεί στο μέγιστο των στροφών του, κάθε πιστόνι παλινδρομεί επάνω-κάτω μέσα σε κάθε κύλινδρο περίπου 100 φορές το δευτερόλεπτο. Εξαιτίας αυτής της γρήγορης αλληλοδιαδοχής ανόδου και καθόδου, τα πιστόνια πρέπει να είναι ανθεκτικά αλλά ταυτόχρονα και ελαφριά. Έτσι σε πάρα πολλά σύγχρονα αυτοκίνητα είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου.

Τα μέρη που αποτελούν το πιστόνι είναι τα ακόλουθα:

Ο δίσκος που είναι η επιφάνεια της κεφαλής του.

Ο κορμός που είναι το επάνω μέρος του εμβόλου και φέρει αυλάκια στα οποία τοποθετούνται τα ελατήρια του πιστονιού

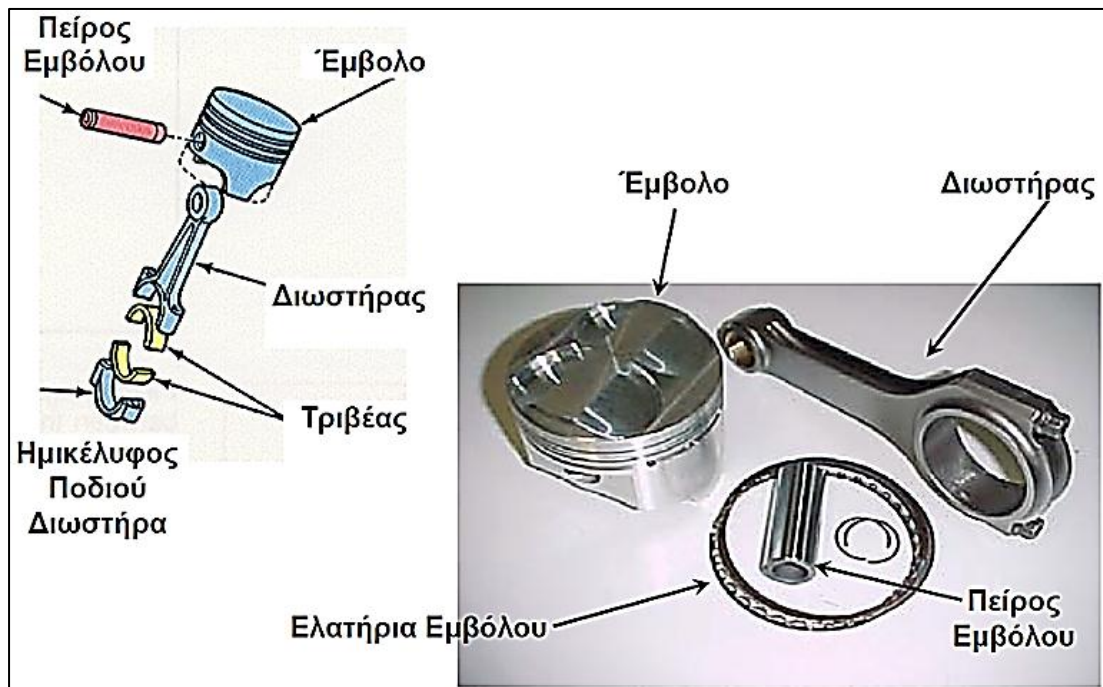
Τα κυλινδρικά ανοίγματα (ομφαλοί) όπου στερεώνεται ο πείρος που ενώνει το πιστόνι με το διωστήρα.

Η ποδιά που αποτελεί το υπόλοιπο κάτω μέρος της κυλινδρικής επιφάνειας του πιστονιού και χρησιμεύει για την οδήγηση του πιστονιού μέσα στον κύλινδρο.

Το πιστόνι έχει την μορφή κωνικού κυλίνδρου, δηλαδή στο επάνω μέρος έχει μικρότερη διάμετρο. Η κατασκευή του γίνεται κωνική ώστε κατά την καύση που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες να γίνεται τελείως κυλινδρικό.

Το κάτω μέρος (ποδιά) είναι ελλειπτικό και κατά τον άξονα που είναι κάθετος προς τον άξονα του πείρου. Αυτό επιβάλλεται λόγω των ισχυρών πιέσεων που δέχεται στο σημείο αυτό, έτσι ώστε κατά τη λειτουργία του κινητήρα να παίρνει το επιθυμητό σχήμα του κυλίνδρου.

Ανάμεσα στο πιστόνι και στον κύλινδρο υπάρχει κάποιο διάκενο που δίνεται από τους κατασκευαστές, προκειμένου κατά τις μεταβολές της θερμοκρασίας, αφ' ενός να υπάρχει στεγανότητα και αφ' ετέρου να αποκλείεται η σφήνωση. [Ρακόπουλος 1988, Heywood 1988]



Εικόνα 1.4: Μέρη πιστονιού [Ρακόπουλος 2000]

Υλικά κατασκευής

Η κατασκευή του πιστονιού παλαιότερα γινόταν από χυτοσίδηρο ώστε κατά τη λειτουργία του κινητήρα να διαστέλλεται όμοια με τους κυλίνδρους που ήταν κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό. Στους σημερινούς πολύστροφους κινητήρες, τα πιστόνια κατασκευάζονται από ελαφρά κράματα αλουμινίου. Η εξωτερική του επιφάνεια υποβάλλεται από μερικούς κατασκευαστές σε ανοδική οξείδωση προκειμένου να αυξηθεί η σκληρότητα της και δημιουργηθούν πόροι για να συγκρατείται το λάδι λίπανσης. Άλλοι κατασκευαστές καλύπτουν την εξωτερική επιφάνεια του πιστονιού με κασίτερο, ο οποίος σε περίπτωση υπερθέρμανσης λιώνει, δημιουργεί λιπαντική επικάλυψη και αποφεύγεται η σφήνωση. Το πιστόνι κατασκευάζεται σε ειδικά καλούπια και η τελική του διαμόρφωση γίνεται με ειδική επεξεργασία.

Τα πλεονεκτήματα του αλουμινίου είναι η επαρκής αντοχή παράλληλα με το χαμηλό βάρος. Ταυτόχρονα, αποβάλλει πολύ γρήγορα τη θερμότητα, οπότε καταπονείται ελάχιστα θερμικά. Αυτός είναι και ο λόγος που τα πιστόνια των σύγχρονων κινητήρων αντέχουν για εκατοντάδες χιλιόμετρα, παρά το γεγονός ότι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στις οποίες λειτουργούν, βρίσκονται κοντά στο σημείο τήξης τους. Το αλουμίνιο όμως έχει κι ένα βασικό μειονέκτημα: μεγάλο συντελεστή διαστολής. Για αυτό και η ανοχή ανάμεσα σε αυτό και τον

κύλινδρο είναι αρκετά μεγάλη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε με την αύξηση της θερμοκρασίας, όταν ο κινητήρας αρχίσει να λειτουργεί, αυτό το κενό να μικραίνει. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον οι κινητήρες χρειάζονται προθέρμανση, δηλαδή λειτουργία με χαμηλό φορτίο και στροφές, μέχρι να φτάσουν σε κανονική θερμοκρασία λειτουργίας. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν ο κινητήρας δεχθεί μεγάλο φορτίο ή πολλές στροφές όσο είναι κρύος, τα πιστόνια κινούνται έκκεντρα μέσα στον κύλινδρο, αυξάνοντας τη φθορά στα τοιχώματα.

Η μεγάλη διαστολή του αλουμινίου υποχρεώνει τους κατασκευαστές να σχεδιάζουν τα πιστόνια κωνικά και με ελλειψοειδή διατομή. Παρά το φαινομενικά κυλινδρικό σχήμα τους, λοιπόν, τα έμβολα έχουν στην πραγματικότητα τέτοια μορφή. Η διάμετρος στην κεφαλή του πιστονιού είναι μικρότερη από αυτήν στην ποδιά, δημιουργώντας έτσι ένα κωνικό σχήμα. Λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε αυτά τα δύο σημεία (η κεφαλή έρχεται σε άμεση επαφή με τη φλόγα, ενώ η ποδιά όχι), η κεφαλή διαστέλλεται περισσότερο από την ποδιά, οπότε σε θερμοκρασία λειτουργίας, το κωνικό γίνεται κυλινδρικό. Κατά ανάλογο τρόπο, η διατομή είναι ελλειψοειδής και όχι στρογγυλή. Η μάζα του πιστονιού στη διάμετρο που βρίσκεται ο πείρος, είναι μεγαλύτερη από την κάθετη της, οπότε σε αυτή τη διάμετρο το πιστόνι διαστέλλεται περισσότερο. Κάνοντας αυτή τη διάμετρο μικρότερη από την κάθετη της (έλλειψη), σε θερμοκρασία λειτουργίας το πιστόνι αποκτά κυκλική διατομή.

Ελατήρια πιστονιού

Τα ελατήρια τοποθετούνται στις εγκοπές (αυλάκια), που βρίσκονται στο πάνω μέρος του κυλινδρικού κορμού του πιστονιού. Ο σκοπός των ελατηρίων είναι η στεγανοποίηση της συναρμογής πιστονιού -κυλίνδρου, μεταξύ των οποίων είναι απαραίτητο να υπάρχει διάκενο. Έτσι εξασφαλίζεται η στεγανότητα του θαλάμου καύσης και δεν διαφεύγουν αέρια προς τον στροφαλοθάλαμο. Ακόμη εμποδίζεται το λάδι που λιπαίνει τις τριβόμενες επιφάνειες, να εισχωρήσει στον χώρο καύσης όπου καθώς καίγεται σχηματίζει ανθρακώματα τα οποία δημιουργούν ανωμαλία στη λειτουργία του κινητήρα.

Ακόμη τα ελατήρια διευκολύνουν την ψύξη του πιστονιού, διοχετεύοντας ποσοστό της θερμότητας που συγκεντρώνεται σ' αυτό από την καύση, προς τον κύλινδρο ο οποίος ψύχεται με το σύστημα ψύξης.

Τα ελατήρια των πιστονιών φράζουν το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του πιστονιού και της εσωτερικής επιφάνειας (διαμέτρου) του κυλίνδρου. Τα ελατήρια της συμπίεσεως, που συνήθως είναι δύο, εμποδίζουν τα αέρια να διαφύγουν από το πιστόνι και να εισχωρήσουν στον κορμό.

Τέλος, ένα ελατήριο αποξέσεως (λαδιού) αφαιρεί το πλεόνασμα του λαδιού από το τοίχωμα του κυλίνδρου και το ξαναρίχνει στο κάρτερ.

Περιγραφή των ελατηρίων

Τα ελατήρια έχουν σχήμα δακτυλιδιού με εξωτερική διάμετρο λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κυλίνδρου, ενώ σε ένα σημείο της περιφέρειας τους είναι κομμένα (ανοικτά). Το άνοιγμα (διάκενο) διευκολύνει την τοποθέτησή τους στο πιστόνι, την συνεχή επαφή τους λόγω της ελαστικότητας με τον κύλινδρο και επιτρέπει τη διαστολή ή τη συστολή τους με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Η τομή για το διάκενο γίνεται κάθετα, διαγώνια ή τεθλασμένα (ραμποτέ). Το διάκενο αυτό ονομάζεται περιφερειακό διάκενο.

Κατά την εφαρμογή των ελατηρίων στο πιστόνι διακρίνεται το αξονικό και το ακτινικό διάκενο. Το αξονικό είναι το άνω και κάτω διάκενο που επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του ελατηρίου μέσα στο αυλάκι. Το ακτινικό είναι το διάκενο πίσω από το ελατήριο που επιτρέπει στο πιστόνι να πιέζεται πάνω στον κύλινδρο.

Το υλικό κατασκευής των ελατηρίων είναι ειδικός χυτοσίδηρος υψηλής ποιότητας με μεγάλη ελαστικότητα. Ο αριθμός των ελατηρίων που τοποθετούνται σε ένα πιστόνι εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό συμπίεσης του κινητήρα. Συνήθως τοποθετούνται κατά σειρά από το επάνω μέρος του πιστονιού προς τα κάτω, δύο ελατήρια συμπίεσης και ένα λαδιού.



Εικόνα 1.5: Ελατήρια και πείρος πιστονιού [Mitsubishi lancer Evo]

Πείρος πιστονιού

Ο πείρος συνδέει το πιστόνι με το διωστήρα. Η δύναμη που ασκείται από τα αέρια πάνω στο πιστόνι, μεταφέρεται στα άκρα του πείρου και στη συνέχεια στο διωστήρα που συνδέεται στη μέση του πείρου. Επίσης αντίστροφα μεταφέρεται και η δύναμη από το διωστήρα στο πιστόνι κατά τους τρεις παθητικούς χρόνους λειτουργίας.

Ο πείρος είναι ένας κυλινδρικός άξονας, εσωτερικά κοίλος, ώστε να έχει μικρό βάρος. Η εξωτερική του επιφάνεια υποβάλλεται σε σκλήρυνση και λείανση. Κατασκευάζεται από νικελιοχρωμιούχο χάλυβα.

Τρόποι στερέωσης του πείρου με το πιστόνι και το διωστήρα

Ο πείρος στερεώνεται με το πιστόνι και το διωστήρα με τρεις τρόπους:

- Ελεύθερη σύνδεση του πείρου με το πιστόνι και με το διωστήρα (πλευστός πείρος). Ο πείρος στηρίζεται ελεύθερα στους ομφαλούς του πιστονιού και στο μικρό άκρο (πόδι) του διωστήρα μέσω ορειχάλκινων (μπρούτζινων) τριβέων σχήματος δακτυλιδιού (κουζινέτα, μέταλλα). Η στήριξη του πείρου

στο πιστόνι γίνεται με ασφαλιστικά δακτυλίδια. Στους περισσότερους κινητήρες χρησιμοποιείται αυτός ο τρόπος σύνδεσης.

- -Σταθερή σύνδεση του πείρου με το διωστήρα και ελεύθερη με το πιστόνι (ημίπλευστος πείρος). Ο πείρος στερεώνεται στο πόδι του διωστήρα με βίδα ή με σφήνωση ενώ στους ομφαλούς του πιστονιού στηρίζεται ελεύθερα πάνω σε κουζινέτα.
- Σταθερή σύνδεση του πείρου στο πιστόνι και ελεύθερη στο διωστήρα (σταθερός πείρος). Ο πείρος στερεώνεται σταθερά στο πιστόνι και συγκεκριμένα στον ένα από τους δύο ομφαλούς ώστε να μπορεί να διασταλεί, ενώ στο διωστήρα ελεύθερα μέσω κουζινέτων.

Η έννοια της ανοχής χρησιμοποιείται για να μετρήσει της ποιότητα της κατεργασίας της επιφάνειας ελεύθερης μορφής. Για μια σχεδιασμένη επιφάνεια ελεύθερης μορφής πρέπει να θεωρηθεί ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο. Το πρώτο ελέγχει το μέγιστο ύψος προεξοχής (scallop height) και το δεύτερο αντιστοιχεί στις κοιλότητες (gouging) της επιφάνειας. Για μια επιφάνεια που πρέπει να κατασκευαστεί εντός ανοχών σχεδιασμού, το ύψος προεξοχής δεν πρέπει να υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη ανοχή και η επιφάνεια πρέπει να είναι χωρίς σκαψίματα.

Τα σκαψίματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τοπικά, οπίσθια και ολικά σκαψίματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα Ένα τοπικό σκάψιμο προκύπτει όταν η ενεργή ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου στο σημείο επαφής κοπής (CC) είναι μεγαλύτερη από αυτή της επιφάνειας. Ένα οπίσθιο σκάψιμο προκύπτει όταν η βάση του εργαλείου παρεμβάλλεται με την επιφάνεια σε σημεία διαφορετικά από τα σημεία επαφής κοπής. Τα τοπικά και οπίσθια σκαψίματα εμφανίζονται σε κοίλες επιφάνειες. Τα συνολικά σκαψίματα (ή συγκρούσεις) προκύπτουν από την παρεμβολή μεταξύ των τμημάτων της επιφάνειας και των μη-κοπτικών περιοχών του εργαλείου όπως τον άξονα του εργαλείου. Υπό την παρουσία σκαψίματος, η ακρίβεια της επιφάνειας και οι προδιαγραφές υψής δεν ικανοποιούνται και μπορεί να προκύψει σοβαρή ζημιά στο τμήμα της επιφάνειας ή στο εργαλείο κατεργασίας.

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για την αποφυγή των σκαψιμάτων. Για τοπικό σκάψιμο, έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές που βασίζονται στο ταίριασμα της καμπυλότητας της επιφάνειας στο σημείο επαφής κοπής και της ενεργούς καμπυλότητας του εργαλείου. Για την αποφυγή των οπίσθιων σκαψιμάτων χρησιμοποιούνται μέθοδοι κατάλληλου προσανατολισμού του εργαλείου. [Ρακόπουλος 2000, Heywood 1988]

1.2 Παραμετρικός σχεδιασμός σε συστήματα CAD

Ο σχεδιασμός γεωμετρικών μοντέλων με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) ορίζεται ως η δημιουργία και ο χειρισμός σχεδιαστικών πρωτοτύπων στη διαδικασία του σχεδιασμού ενός προϊόντος. Η τεχνολογία των συστημάτων CAD αποτελείται από τρεις συνιστώσες: το υλικό μέρος (υπολογιστές κλπ), το λογισμικό και τον χρήστη. Στον τομέα της Μηχανολογίας τα συστήματα αυτά μπορούν να εξάγουν πληροφορίες πολύ χρήσιμες για την ανάλυση διαφόρων ιδιοτήτων όπως η μετάδοση θερμότητας, ανάλυση τάσεων – ταλαντώσεων, δυναμική εξομοίωση μηχανισμών και διαδικασιών. [Chang 2011]

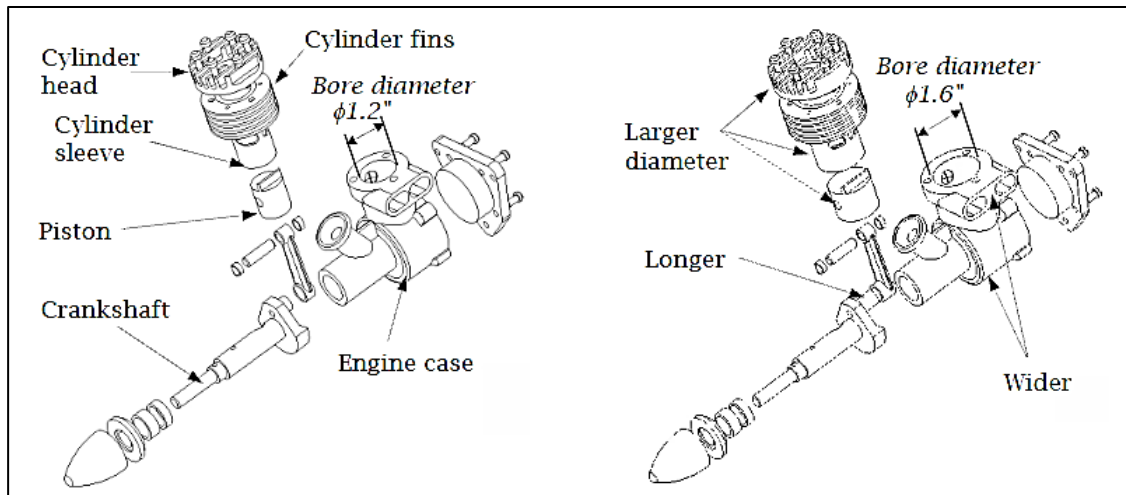
Τα πρώτα συστήματα ήταν δύο διαστάσεων-2D τα οποία ήταν κατάλληλα μόνο για τη δημιουργία σχεδίων. Στο σύστημα των δύο διαστάσεων ο χρήστης σχεδιάζει τις όψεις του αντικειμένου, όπως θα τις σχεδίαζε και σε ένα φύλλο χαρτί. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τρεις μεθοδολογίες τρισδιάστατης απεικόνισης.

Τα συστήματα CAD παρέχουν ένα περιβάλλον εργασίας στο οποίο υπάρχουν εντολές, κουμπιά και menu για τον χειρισμό του χώρου σχεδίασης και τη δημιουργία των μοντέλων. Δύο από τα δημοφιλέστερα προγράμματα CAD: είναι το Solidworks (το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία) και το Pro Engineer. Για την εκτέλεση αυτών των λειτουργιών, το λογισμικό χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από μήτρες μετασχηματισμών.

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για την ανεύρεση εναλλακτικών σχεδιασμών είναι να μεταβάλουμε το μέγεθος ή το σχήμα των μερών του μηχανικού συστήματος. Τα τμήματα και το σύνολο πρέπει να παραμετροποιηθούν επαρκώς, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι του σχεδιασμού.

Στο επίπεδο του κάθε τμήματος, ο παραμετρικός σχεδιασμός υποδηλώνει τη δημιουργία στερεών χαρακτηριστικών και σχετικών διαστάσεων, ώστε όταν η τιμή μιας διάστασης μεταβάλλεται, το μέρος να μπορεί να ανακατασκευαστεί κατάλληλα και το ανακατασκευασμένο μέρος να πληρεί τους στόχους σχεδιασμού. Στο επίπεδο του συνόλου, η παραμετροποίηση σχεδιασμού περιλαμβάνει τον ορισμό των μερών της συστοιχίας και τη συσχέτιση των διαστάσεων των τμημάτων. Όταν ένα σύνολο είναι πλήρως παραμετροποιημένο, η μεταβολή στην τιμή μιας διάστασης, μπορεί να διαδοθεί αυτόματα σε όλα τα τμήματα που επηρεάζονται. Τα επηρεαζόμενα τμήματα πρέπει να ανακατασκευαστούν επιτυχώς, και ταυτόχρονα πρέπει να διατηρήσουν κατάλληλες θέσεις και προσανατολισμούς χωρίς να διαταράξουν κάποιο άλλο τμήμα του συνόλου, να προκληθεί διείσδυση των μερών ή

υπερβολικά κενά. Για παράδειγμα, σε μια μονοκύλινδρη μηχανή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.7, μια μεταβολή στην διάμετρο της οπής του κιβωτίου του κινητήρα, δε θα μεταβάλει μόνο τη γεωμετρία του ίδιου του κιβωτίου, αλλά επηρεάζονται και όλα τα υπόλοιπα τμήματα, όπως το πιστόνι, το χιτώνιο του πιστονιού, ακόμα και ο στροφαλοφόρος άξονας. Επιπλέον, πρέπει όλα να ανακατασκευαστούν κατάλληλα και ολόκληρο το σύνολο να παραμείνει ανέπαφο και να ικανοποιεί τις ανάγκες του σχεδιασμού.



Εικόνα 1.6: Πιστόνι μονοκύλινδρου κινητήρα (α) διάμετρος οπής 1.2” και (β) διάμετρος οπής 1.6” [Chang 2011]

Μοντελοποίηση Στερεών

Η μοντελοποίηση στερεών είναι η λιγότερο ανεπτυγμένη στη συνολική διαδικασία μηχανικής των σχημάτων. Η αναπαράσταση των συνόρων (B-rep) και η αναπαράσταση των χαρακτηριστικών είναι οι δυο βασικές αναπαραστάσεις για στερεά μοντέλα. Υπάρχουν κάποιες μέθοδοι που έχουν προταθεί για την αυτόματη κατασκευή μοντέλων αναπαράστασης συνόρων, όπως τα τριγωνικά πλέγματα. Άλλοι έχουν επικεντρωθεί στη μηχανοποίηση της αναγνώρισης χαρακτηριστικών για λόγους σχεδιασμού της διαδικασίας. Η πιο πολλά υποσχόμενη εξέλιξη ήταν η αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η οποία αυτόματα αναγνωρίζει τα στερεά συμπαγή χαρακτηριστικά που ενυπάρχουν στα μοντέλα B-rep. Παρόλα αυτά, καμία μέθοδος δεν είναι ικανή να αυτοματοποιήσει πλήρως τη διαδικασία κατασκευής και να παράξει πλήρως παραμετρικά στερεά μοντέλα, καθώς είναι αναμενόμενη ως ένα βαθμό κάποια χειρωνακτική εργασία.

Συνοριακή Αναπαράσταση

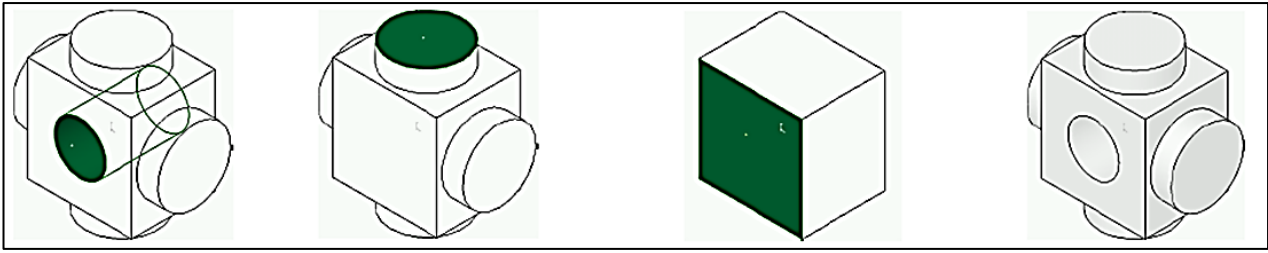
Με βάση τις κατατμημένες περιοχές, κατασκευάζεται μια περιοχή γειτονικού γραφήματος, η οποία αντιπροσωπεύει τη συνολικά τοπολογία και βοηθά στην κατασκευή του τελικού μοντέλου B-rep, τα οποία καλούνται και συρραμμένα μοντέλα, όπου οι μεμονωμένες οριοθετημένες περιοχές τοποθετούνται μαζί κατά μήκος των κοινών ακμών τους.

Γενικά, υπάρχουν τρία βήματα για την κατασκευή μοντέλων B-rep, επιπεδοποίηση, υπολογισμοί ακμών και κορυφών, και συρραφή. Κατά το βήμα επιπεδοποίησης, οι περιοχές επεκτείνονται προς τα έξω μέχρι όλα τα τρίγωνα να κατηγοριοποιηθούν, ενώ επίσης είναι σημαντικό γιατί αφαιρεί τα κενά μεταξύ των περιοχών. Οι αιχμηρές άκρες μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ρουτίνες διασταύρωσης επιφάνειας – επιφάνειας, και κορυφές όπου και οι τρεις κορυφές όταν συναντηθούν, μπορούν να προσδιοριστούν. Κατά τη διαδικασία, κατασκευάζεται ένα δέντρο της τοπολογίας του B-rep μοντέλου.

Αναγνώριση Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών

Για τη μετατροπή ενός μοντέλου B-rep σε στερεό μοντέλο με βάση τα χαρακτηριστικά του, πρέπει να αναγνωρισθούν τα ενσωματωμένα συμπαγή στερεά χαρακτηριστικά του, καθώς και ένα δέντρο χαρακτηριστικών που περιγράφει την αλληλουχία δημιουργίας αυτών των χαρακτηριστικών.

Ένας από τους πιο πετυχημένους αλγόριθμους αναγνώρισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών προτάθηκε από τον Venkataraman (2001). Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια διαδικασία τεσσάρων απλών βημάτων, (1) απλοποίηση των εισαγμένων όψεων, (2) ανάλυση όψεων για γεωμετρία ειδικών χαρακτηριστικών, (3) αφαίρεση των αναγνωρισθέντων χαρακτηριστικών και ανανέωση του μοντέλου, και (4) επιστροφή στο Βήμα 2 έως ότου όλα τα χαρακτηριστικά αναγνωριστούν. Η διαδικασία επισημαίνεται στην Εικόνα 1.10. Όταν όλα τα πιθανά χαρακτηριστικά αναγνωριστούν, χαρτογραφούνται σε ένα νέο στερεό μοντέλο όπως στην Εικόνα 1.10 d, το οποίο είναι παραμετρικό με χαρακτηριστικό δέντρο που προσδιορίζει την αλληλουχία παραγωγής αυτών των χαρακτηριστικών.



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση του αλγόριθμου Αναγνώρισης Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών, (a) μοντέλο επιφάνειας με επιλεγμένη την επιφάνεια μιας τρύπας, (b) η τρύπα αναγνωρίστηκε και αφαιρέθηκε, έχει επιλεγεί η προεξέχουσα όψη του κυλίνδρου, (c) οι κυλινδρικές προεξοχές αναγνωρίστηκαν, και επιλέχθηκε η βάση του τμήματος, και (d) όλα τα χαρακτηριστικά αναγνωρίστηκαν και σχεδιάστηκαν σε ένα στερεό μοντέλο. [Chang 2011]

Παραμετρική Σχεδίαση

Ένα παραμετρικό στερεό μοντέλο χαρακτηριστικών αποτελείται από δυο στοιχεία κλειδιά: ένα δέντρο χαρακτηριστικών και πλήρως παραμετροποιημένα σχέδια για τα προεξέχοντα στερεά χαρακτηριστικά. Ένα πλήρως παραμετρικό σχέδιο συνεπάγεται ότι το συνολικό προφίλ του σχεδίου είναι πλήρως ορισμένο όσον αφορά τους περιορισμούς και τις διαστάσεις του, και συνεπώς η μεταβολή μιας διάστασης οδηγεί σε αναδόμηση όπως προβλέπεται από τις προϋποθέσεις του σχεδιασμού. [Chang 2011]

1.3 Φασεολόγια κατεργασιών κοπής

- ❖ Επιλογή των μηχανουργικών κατεργασιών
- ❖ Επιλογή των εργαλείων
- ❖ Επιλογή των μηχανικών εργαλείων
- ❖ Ομαδοποίηση των κατεργασιών
- ❖ Επιλογή των σταθερών συστημάτων και δεδομένων
- ❖ Προσδιορισμός των δεδομένων κατεργασίας
- ❖ Περιγραφή της πορείας του εργαλείου και των προγραμμάτων Αριθμητικού Ελέγχου
- ❖ Δημιουργία εγγράφων για το πλάνο της διαδικασίας

Απαιτούμενες Αρχικές Πληροφορίες

Διαστάσεις

Ανοχές ανά διάσταση

Ανοχές σχήματος

Δεδομένα ποιότητας επιφάνειας

Τύπος και ιδιότητες του υλικού

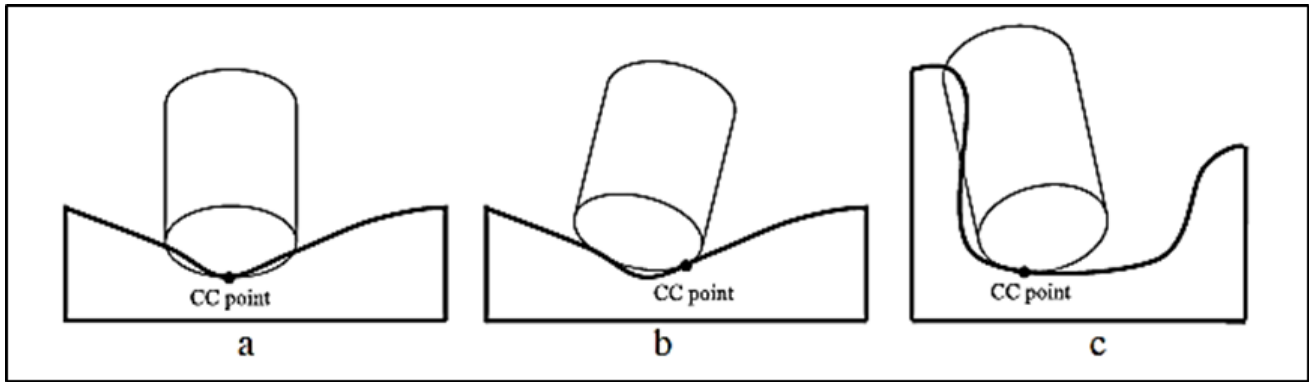
Αριθμός παραχθέντων τεμαχίων (μέγεθος παρτίδας) [Kiritsis 1995]

Επιλογή μηχανουργικών κατεργασιών

Η επιλογή των μηχανουργικών κατεργασιών έχει άμεση σχέση με ειδική τεχνολογική γνώση και βασίζεται σε κανόνες που υπακούουν προϋποθέσεις σε σχέση με τη γεωμετρία και τις ανοχές. [Kiritsis 1995]

Η έννοια της ανοχής χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ποιότητα της κατεργασίας της επιφάνειας ελεύθερης μορφής. Για μια σχεδιασμένη επιφάνεια ελεύθερης μορφής πρέπει να θεωρηθεί ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο. Το πρώτο ελέγχει το μέγιστο ύψος προεξοχής (scallopheight) και το δεύτερο αντιστοιχεί στα σκαψίματα (gouging) της επιφάνειας. Για μια επιφάνεια που πρέπει να κατασκευαστεί εντός ανοχών σχεδιασμού, το ύψος προεξοχής δεν πρέπει να υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη ανοχή και η επιφάνεια πρέπει να είναι χωρίς σκαψίματα.

Τα σκαψίματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τοπικά, οπίσθια και ολικά σκαψίματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα Ένα τοπικό σκάψιμο προκύπτει όταν η ενεργή ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου στο σημείο επαφής κοπής (CC) είναι μεγαλύτερη από αυτή της επιφάνειας. Ένα οπίσθιο σκάψιμο προκύπτει όταν η βάση του εργαλείου παρεμβάλλεται με την επιφάνεια σε σημεία διαφορετικά από τα σημεία επαφής κοπής. Τα τοπικά και οπίσθια σκαψίματα εμφανίζονται σε κοίλες επιφάνειες. Τα συνολικά σκαψίματα (ή συγκρούσεις) προκύπτουν από την παρεμβολή μεταξύ των τμημάτων της επιφάνειας και των μη-κοπτικών περιοχών του εργαλείου όπως τον άξονα του εργαλείου. Υπό την παρουσία σκαψίματος, η ακρίβεια της επιφάνειας και οι προδιαγραφές υφής δεν ικανοποιούνται και μπορεί να προκύψει σοβαρή ζημιά στο τμήμα της επιφάνειας ή στο εργαλείο κατεργασίας. [Lasemi 2010]



Εικόνα 1.8: Τρεις τύπου σκαψίματος σε κατεργασία 5 αξόνων (a) τοπικό σκάψιμο, (b) οπίσθιο σκάψιμο (c) ολικό σκάψιμο (σύγκρουση) [Lasemi 2010]

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για την αποφυγή των σκαψιμάτων. Για τοπικό σκάψιμο, έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές που βασίζονται στο ταίριασμα της καμπυλότητας της επιφάνειας στο σημείο επαφής κοπής και της ενεργούς καμπυλότητας του εργαλείου. Για την αποφυγή των οπίσθιων σκαψιμάτων χρησιμοποιούνται μέθοδοι κατάλληλου προσανατολισμού του εργαλείου.

Επιλογή εργαλείων

Η ίδια λογική εφαρμόζεται σε κάθε διαδικασία και χαρακτηριστικό κατά την επιλογή εργαλείων.

Τα κοπτικά εργαλεία επιλέγονται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Είδος και αριθμός εργαλείων
- Μέγεθος παρτίδας
- Απαιτούμενη ποιότητα

Ομαδοποίηση κατεργασιών

Τα χαρακτηριστικά μπορούν να ομαδοποιηθούν κατά τμήματα, και, αντίστοιχα, οι κατεργασίες να ομαδοποιηθούν με βάση τεχνολογικά (ανοχή και ποιότητα επιφάνειας) κριτήρια και σταθερές δυνατότητες, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη μείωση των χρόνων κατεργασίας, όταν επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια.

Αλληλουχία κατεργασιών

Οι επιλεχθείσες μηχανουργικές κατεργασίες πρέπει να τοποθετούνται σε ορισμένη σειρά, ώστε να διασφαλίζονται οι προηγούμενες σχέσεις τους, οι οποίες προσδιορίζονται σύμφωνα με τεχνολογικές και γεωμετρικές εκτιμήσεις.

Προσδιορισμός δεδομένων κατεργασίας

Τα δεδομένα κατεργασίας προσδιορίζονται, λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα τεχνολογικά και οικονομικά κριτήρια.

Περιγραφή πορείας εργαλείου και προγραμμάτων αριθμητικού ελέγχου

Η πορεία του εργαλείου υπολογίζεται, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές, γεωμετρικές και κινηματικές σχέσεις του εργαλείου. Το πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου και ο σχετικός κώδικας ISO δημιουργούνται αυτόματα από μετα - επεξεργαστές.

Υπολογισμός χρόνου κατεργασίας και κόστους

Το σύστημα πρέπει να κάνει εκτίμηση των χρόνων κατεργασίας και κόστους ανά μηχανουργική κατεργασία. Καθώς αυτό μπορεί να είναι κρίσιμο για την τελική επιλογή μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών πλάνων ή για να μπορεί να δίνει μια γρήγορη εναλλακτική λύση σε περιπτώσεις αναπάντεχης βλάβης του μηχανήματος. [Lasemi 2010]

1.4 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός πιστονιού τετράχρονου βενζινοκινητήρα Otto σε κέντρο κατεργασιών CNC, με βάση παραμετρικά ορισμένο στερεό μοντέλο. Συγκεκριμένα το πιστόνι σχεδιάζεται ώστε να μπορούν να αλλάζουν οι βασικές διαστάσεις του, όπως το ύψος ή η διάμετρος.

Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι το SolidCAM για να δημιουργηθεί κώδικας CNC για την κατασκευή του πιστονιού. Θα περιγραφεί αναλυτικά το βασικό φασεολόγιο κοπής, το οποίο περιλαμβάνει τις φάσεις κατεργασίας, την επιλογή των κατάλληλων εργαλείων, καθώς και τους πιθανούς περιορισμούς για την εξασφάλιση της παραμετρικότητας.

Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

1. Ρακόπουλος, Κ., «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή-Λειτουργία-Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα, 1988, σελ. 12 - 29.
2. Ρακόπουλος, Κ., «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα, 2000, σελ. 13-25.
4. Heywood, J., 'Internal Combustion Engine Fundamentals', McGraw-Hill, 1988, p. 9-14, 42-44.
5. www.importtuner.com/tech/impp_1002_mitsubishi_lancer_evolution/photo_11.html
6. Chang, K., Chen, C., 3D Shape Engineering and Design Parameterization, University of Oklahoma, Computer-Aided Design & Applications, 8(5), 2011, 681-692.
7. Venkataraman, S.; Sohoni, M.; Kulkarni, V.: A Graph-Based Framework for Feature Recognition, Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 2001, 194-205.
8. Lasemi, A., Xue ,D., Gu, P., Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Canada, Computer-Aided Design 42 (2010) 641-654.
9. Kiritsis, D., A Review of Knowledge-Based Expert Systems for Process Planning. Methods and Problems, Swiss Federal Institute of Technology - Lausanne, Mechanical Engineering Department, CAD/CAM Laboratory, Switzerland, Int J Adv Manuf Technol (1995) 10:240-262.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η πολυαξονική κατεργασία CNC αναφέρεται σε φρεζάρισμα τεσσάρων ή πέντε αξόνων, που διεξάγεται σε κέντρα κατεργασίας. Όλο και περισσότερο, τα κατεργαζόμενα τμήματα αποτελούνται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής, και η παραγωγή τους συνεπάγεται παραγωγή πορείας εργαλείου ελεύθερης μορφής, προσδιορισμό του προσανατολισμού του εργαλείου και τέλος επιλογή της γεωμετρίας του εργαλείου (Lasemi et al, 2010). Ο Makhanon (2010) μελέτησε τα κύρια θέματα για τη βελτιστοποίηση της πορείας του εργαλείου και αποφυγής παρεμβολών. Τα κριτήρια ποιότητας της πορείας του εργαλείου περιλαμβάνουν κινηματικό σφάλμα, σκαψίματα, πιθανή μηχανική εντομή ή υπερκοπή και συνέχεια της πορείας. Οι τεχνικές περιλαμβάνουν: συστήματα κωνικής ορατότητας, μεθόδους αντιστάθμισης, πορείες δυναμικών μεθόδων κ.α.

Οι στρατηγικές κατεργασίας μηχανολογικών τεμαχίων πολύπλοκης μορφής, τυπικό παράδειγμα των οποίων αποτελούν οι πτερωτές, δεν μπορούν εύκολα να τυποποιηθούν λόγω των σύνθετων, επικαλυπτόμενων και συνεστραμμένων σχημάτων που σχηματίζουν τα πτερύγια των πτερωτών. Ο προγραμματισμός της πορείας κατεργασίας μπορεί να οδηγήσει σε στρατηγικές κατεργασίας με βάση την εμπειρία και τα προηγούμενα δεδομένα κατεργασίας. Στην πράξη όμως, τα περισσότερα δεδομένα για την κατεργασία τέτοιων τεμαχίων δεν είναι κατάλληλα δομημένα και δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία από τους προγραμματιστές πορείας, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές στρατηγικές κατεργασίας και τα σχέδια πορείας. Οι Cho et al (2008), παρουσίασαν ένα σύστημα υποστήριξης κατεργασίας πτερωτών βάσει περιπτώσεων (case-based impeller machining strategy support system (CBIMS)), ώστε να προκύψει μια αποδοτική στρατηγική κατεργασίας βάσει των υπάρχουσών στρατηγικών κατεργασίας σε συγκεκριμένο περιβάλλον παραγωγής. Το σύστημα CBIMS δημιουργεί στρατηγικές κατεργασίας πτερωτών μέσω μιας βηματικής λογικής διαδικασίας, λαμβάνοντας υπόψη τις ομοιότητες των σχημάτων των πτερυγίων και των περιοχών κατεργασίας μεταξύ των υπάρχουσών πτερωτών και της νέας. Το σύστημα παρέχει μια διαδικασία προγραμματισμού με στρατηγικές κατεργασίας όπως προδιαγραφές εργαλείου, διαχωρισμός των περιοχών κατεργασίας και παράμετροι κατεργασίας, οι οποίες περιλαμβάνουν την πρόωση, το βάθος κοπής και την ανοχή της κατεργασίας.

Η παραμετρική μοντελοποίηση και οι διαμορφωτικές μέθοδοι σχεδιασμού (configuration design methods) είναι σημαντικές τεχνολογίες για τη γραμμή

επαναληπτικής παραγωγής. Η παραμετρική μοντελοποίηση επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση υπαρχόντων προϊόντων και ταχεία τροποποίηση του σχεδιασμού τους με βάση τα αποτελέσματα ανάλυσης μηχανικής (Shin & Kwak, 1999). Στα μοντέλα συστημάτων με βάση μορφολογικά χαρακτηριστικά (feature-based) (Regli, 1995; Salomons, 1994; Shah & Mantyla, 1995; Shah, Mantyla & Nau, 1994), το επίπεδο λεπτομέρειας είναι σημαντικό και κρίσιμο για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος. Τα διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας περιλαμβάνουν μορφολογικά, λειτουργικά και μηχανικά χαρακτηριστικά.

Τα προηγούμενα χρόνια η ερευνητική εργασία είχε επικεντρωθεί στις διαμορφωτικές μεθόδους σχεδιασμού (Brown, 1999; Franke, 1998; Kang & Han, 1997; Koo et al, 1998; Sabin & Weigel, 1998; Yu, 1996), παρόλα αυτά είναι δύσκολο να διαχειριστούν τρισδιάστατες γεωμετρίες σε συστήματα CAD. Τα περισσότερα συστήματα διαμόρφωσης εξειδικεύουν τα χαρακτηριστικά των εκάστοτε προϊόντων. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σχεδιασμού, καθώς και τη διαδραστική τροποποίηση του σχεδίου, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του συστήματος διαμόρφωσης σε ένα σύστημα CAD.

Οι Sehyun et al περιέγραψαν τη διαδικασία παραμετρικής μοντελοποίησης ενός εργαλείου κατεργασίας, και πρότειναν ένα πλαίσιο το οποίο μοντελοποιεί παραμετρικά τη διάταξη εργαλείων κατεργασίας με βάση εξειδικευμένο σχεδιασμό. Ένα εξειδικευμένο σύστημα σχεδιασμού διατάξεων εργαλείων κατεργασίας είναι απαραίτητο για τον επανασχεδιασμό των εργαλείων, καθώς τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα CAD δε μπορούν να αποδώσουν σωστά τον παραμετρικό σχεδιασμό τέτοιων διατάξεων. Το σύστημα αποτελείται από ένα εξειδικευμένο σύστημα, μια εμπειρική βάση σχεδιασμού και ένα εμπορικά διαθέσιμο σύστημα CAD με προγραμματισμό εφαρμογών.

Διάφορες μελέτες διεξήχθησαν για την εξεύρεση της σχέσης του παραμετρικού σχεδιασμού με την αναπαράσταση των διαστατικών περιορισμών σε γεωμετρίες δύο ή τριών διαστάσεων. Οι Roller et al (1989) κατηγοριοποίησαν τις διάφορες προσεγγίσεις ως: πρωταρχικές, αλγεβρικές και τεχνητής νοημοσύνης. Οι πρωταρχικές μέθοδοι ασχολούνται με μειωμένο αριθμό περιορισμών με βάση καλά διαρθρωμένους αλγόριθμους, αλλά έχουν δυνατότητα εντοπισμού σχεδίων με υπερβολικό αριθμό περιορισμών. Ο Fitzgerald et al (1981) ασχολήθηκαν με κατακόρυφους και οριζόντιους περιορισμούς μεταξύ δυο σημείων, και πρότειναν μια μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος των σχεδίων με μεγάλο αριθμό περιορισμών. Οι Gossard et al (1988) αναπαρέστησαν διαστατικούς περιορισμούς σε CSG (Constructive Solid Geometry). Οι Hillyard and Braid (1978) μελέτησαν την αλγεβρική

προσέγγιση της παραμετρικής γεωμετρίας. Σε αυτή την προσέγγιση, οι διαστατικοί περιορισμοί μετατρέπονται σε εξισώσεις και, οι περιπτώσεις μιας γεωμετρίας εξάγονται λύνοντας ένα σύστημα εξισώσεων, χρησιμοποιώντας επαναληπτική αριθμητική μέθοδο. Η τελευταία οικογένεια αποτελεσμάτων βασίζεται σε τεχνητή νοημοσύνη. Ο Aldefeld (1988) χρησιμοποίησε ένα εμπειρικό σύστημα για την εξαγωγή της γεωμετρίας, η οποία ικανοποιεί τους δοθέντες περιορισμούς, αλλά αφορά μόνο διδιάστατα προβλήματα. Οι Kimura et al (1986) αναπαρέστησαν τους γεωμετρικούς περιορισμούς χρησιμοποιώντας κατηγορικό λογισμό πρώτου βαθμού και οι εξαχθείσες περιπτώσεις της γεωμετρίας βασίζονται σε τεχνικές γεωμετρικού λογισμού.

Οι Roller et al (1989) παρουσίασαν μία προηγμένη μέθοδο για τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων σε συστήματα σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή. Η μέθοδος χρησιμοποιεί αυτόματη αποθήκευση των γεωμετρικών περιορισμών κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού εισόδου και της υποστήριξης τοπολογικών παραμέτρων. Μαζί με την καταγραφή της ακολουθίας κατασκευής, λαμβάνεται σημαντική πληροφορία σχετικά με το σκοπό του σχεδιαστή και επιτυγχάνεται έτσι μια πιο κατανοητή περιγραφή του σχεδιασμού. Ένας επεξεργαστής παραλλαγών χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της αξιολόγησης των σχημάτων των μοντέλων σύμφωνα με τις πραγματικές διαστατικές και δομικές παραμέτρους.

Στη μελέτη των Verroust et al (1992), παρουσιάζεται μια εφαρμογή σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή με διαστασιακές παραμέτρους. Η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση ενός εξειδικευμένου συστήματος, το οποίο προκαλεί απόξευση των εξισώσεων περιορισμού και βρίσκει μια πιθανή ακολουθία για τον υπολογισμό των γεωμετρικών στοιχείων για δεδομένες τιμές διαστάσεων. Περιγράφεται ένα σύνολο κανόνων για το ειδικό σύστημα το οποίο επιλύει το πρόβλημα για διδιάστατα σχέδια.

Οι Kondo et al (1990) παρουσίασαν την εφαρμογή ενός συστήματος γεωμετρικής μοντελοποίησης που ονομάζεται PIGMOD με δυνατότητα παραμετρικού σχεδιασμού βάσει non-manifold γεωμετρικής μοντελοποίησης. Η βασική ιδέα είναι ότι ένα πλήθος λειτουργιών μοντελοποίησης μπορεί να ορισθεί ώστε να υπάρχουν αντιστοιχίσεις μεταξύ των γεωμετρικών περιορισμών και των λειτουργιών μοντελοποίησης. Οι γεωμετρικές σχέσεις αναπαρίστανται εσωτερικά μέσω της ακολουθίας μοντελοποίησης λειτουργιών. Οι λειτουργίες μοντελοποίησης εκτελούνται ως χειρισμοί ενός non-manifold γεωμετρικού μοντέλου. Οι μέθοδοι αυτόματης τροποποίησης του γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο βρίσκεται σε συνεχή ταύτιση με τις διαστάσεις που έχουν μεταβληθεί ή προστεθεί, εκτελούνται με απλό και ενοποιημένο τρόπο.

Βιβλιογραφία 2^ο Κεφαλαίου

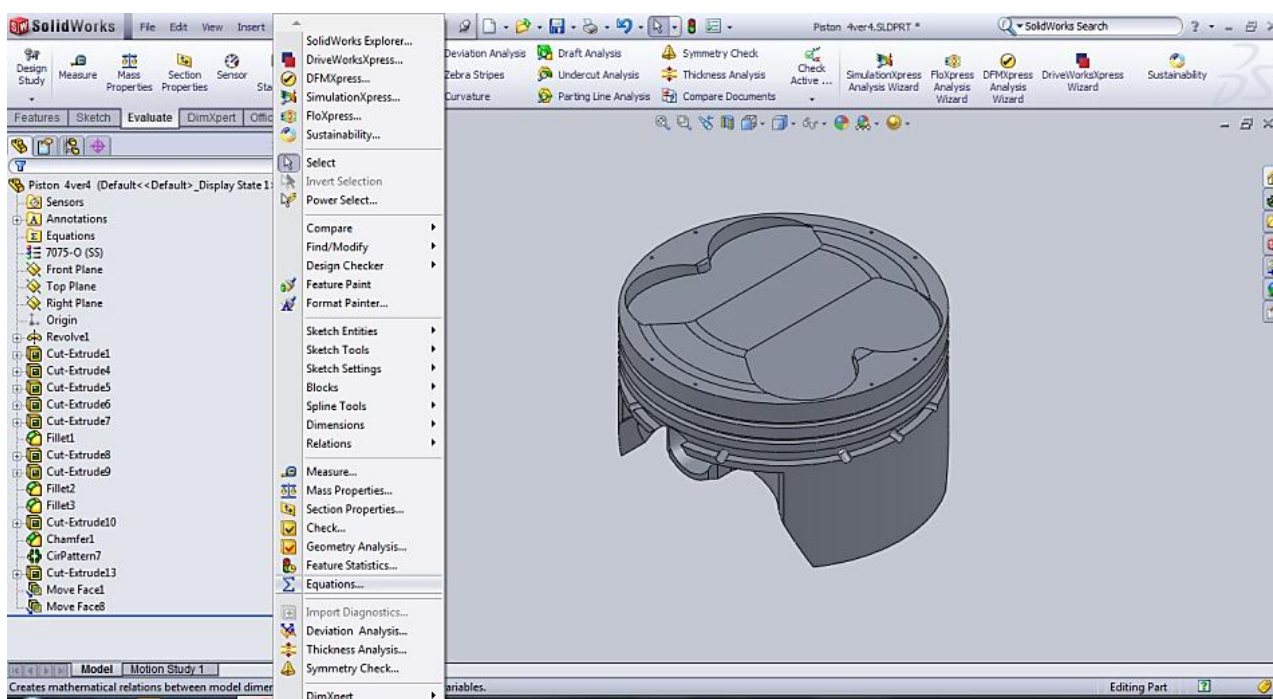
1. Vosniakos, G.C., Giannakis, A., Parametric multi-axis toolpath planning for CNC machining, *Int. J. of Manufacturing Research*, 2012 Vol.7, No.4, pp.354 – 375.
2. Cho, M., CBIMS: Case-based impeller machining strategy support system, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25, (2009), 980–988.
3. Kwak, B. M., Han S.-H., Suh, H. W., Chae, S. W., Cho, S. W., & Kim, S. I. Technical evaluation and design for advanced machine tools (in Korean). Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea National G7 Project Report, (1998).
4. Salomons, O. W. Computer support in the design of mechanical product: Constraint specification and satisfaction in feature based design for manufacturing. PhD thesis, University of Twente, Netherlands, (1994)..
5. Shah, J. J., & Mantyla, M. (Eds.). Parametric and feature-based CAD/CAM: Concepts, techniques, and applications. John Wiley & Sons, (1995).
6. Shah, J. J., Mantyla, M., & Nau, D. S. (Eds.) Advances in feature based manufacturing. Elsevier Science(1994).
7. Brown, D. C. Requirements for configurer tests: A position statement. Papers from the AAAI '99 Workshop on Configuration, Orlando, Florida, USA, (1999)..
8. Franke, D. W. (1998). Configuration research and commercial solutions. Special Issue: Configuration Design, *AIEDAM*, 12 (4), 295-300.
9. Lasemi, A., Xue, D., Gu, P., Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, 42/7,(2010), 641-654.
10. Makhanov, S.S., Adaptable geometric patterns for five-axis machining: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47/9-12, (2010), 1167–1208.
11. Roller, D, Schonek, F and Verroust, A 'Dimension driven geometry in CAD: a survey' *Theory and Practice of Geometric Modeling Springer-Verlag* (1989).
12. Fitzgerald, W 'Using axial dimensions to determine the proportions of line drawings in computer graphics' *Comput.-Aided Des.* Vol 13 No 6 (1981), pp 377-382.
13. Gossard, D, Zuffante, R and Sakurai, H 'Representing dimensions, tolerances and features in MCAE systems' *IEEE Comput. Graphics and Applications* Vol 8 No 3 (1988) pp 51-59.

14. Hillyard, R C and Braid, I C 'Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design' *Comput.-Aided Des.* Vol 10 No 3 (1978) pp 161-166.
15. Aldefeld, B 'Variation of geometries based on a geometric-reasoning method' *Comput.-Aided Des.* Vol 20 No 3 (1988) pp 117-126
16. Kimura, F, Suzuki, H and Wingard, L 'A uniform approach to dimensioning and tolerancing in product modelling' *Prep. CAPE'86* (1986) pp 165-178.
17. Verroust, F Schonek, Roller, D., *Rule-oriented method for parameterized computer-aided design A*, Butterworth-Heinemann Ltd, 24, (1992), 531-540.
18. Kondo, K., *PIGMOD: parametric and interactive geometric modeller for mechanical design*, Butterworth-Heinemann Ltd, 22, (1990), 633-644.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παραμετροποίηση Μοντέλου

3.1 Βήματα παραμετροποίησης μοντέλου στο Solidworks

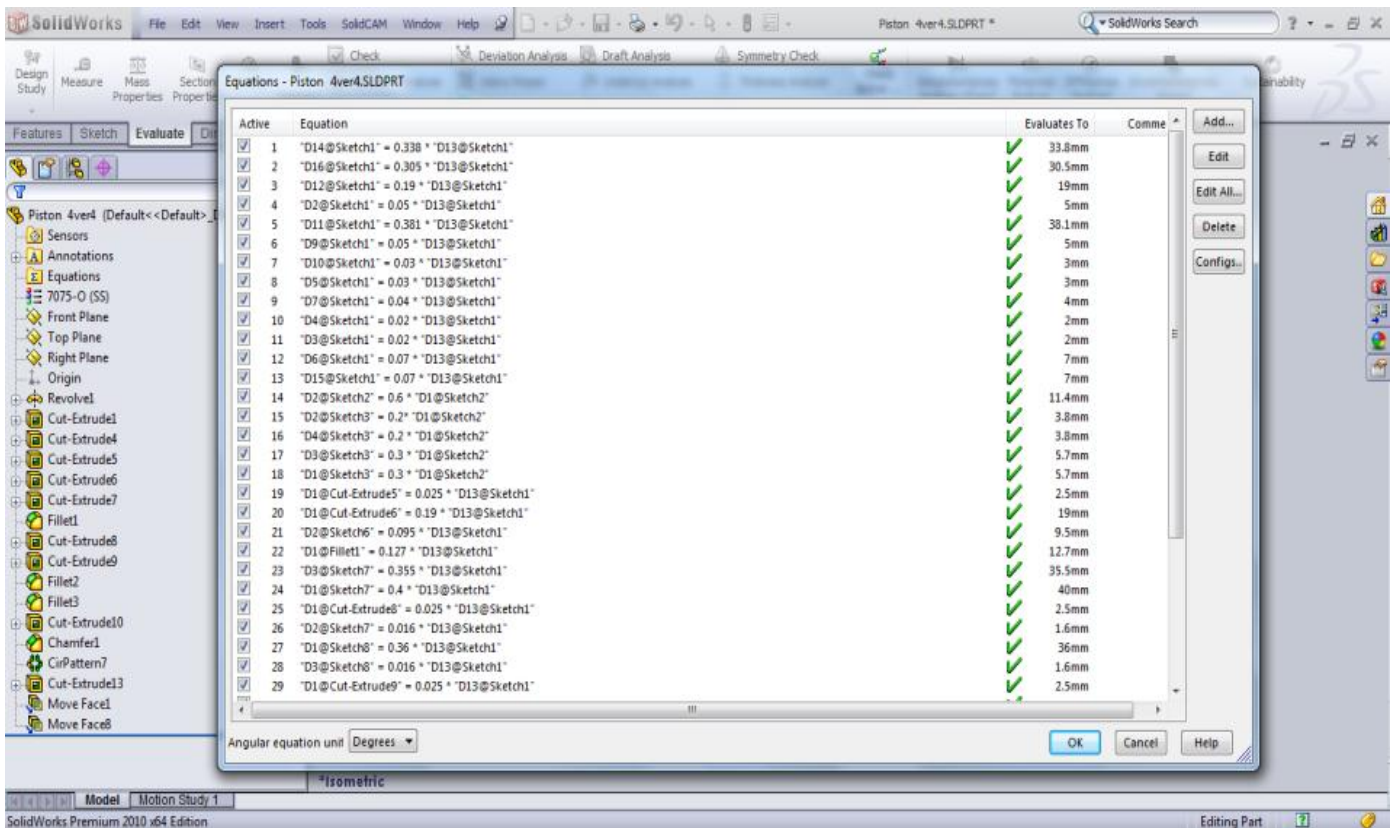
1. Αρχικά επιλέγουμε ότι η κύρια παράμετρος του μοντέλου (driving dimension) είναι η διάμετρος του πιστονιού. “*D13@Sketch1*”
2. Από το μενού του προγράμματος επιλέγω τα ακόλουθα: Tools > Equations > Add, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 3.1.
3. Στη συνέχεια συνδέουμε τη διάσταση που θέλουμε να οδηγείται από την κύρια παράμετρο (διάμετρος του πιστονιού).



Εικόνα 3.1: Επιλογή κύριων παραμέτρων του μοντέλου μας

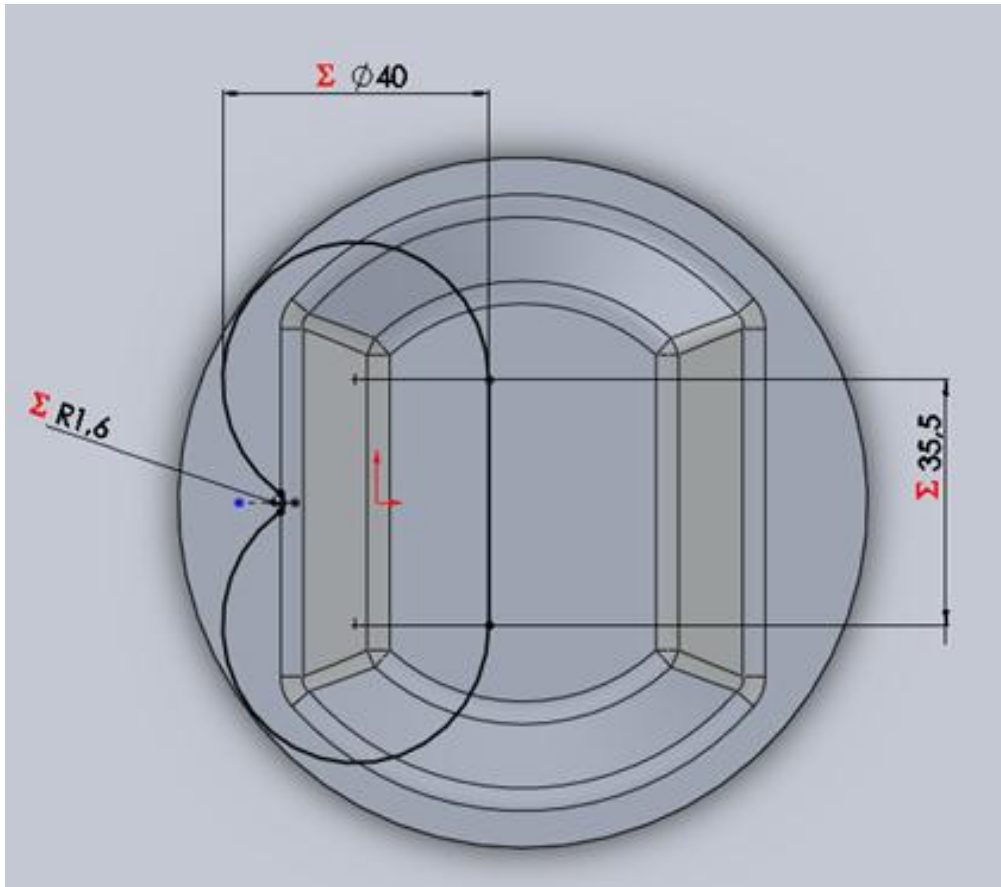
4. Έχει υπολογιστεί ο λόγος της κάθε διάστασης προς την διάμετρο. Αυτός ο λόγος έχει γίνει συναρτήσε της διαμέτρου του πιστονιού. Έτσι όταν μεταβάλλεται η διάμετρος του πιστονιού μεταβάλλονται αναλογικά και όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις που έχουμε συσχετίσει. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2 που ακολουθεί.

Σημείωση: Εκτός από τη διάμετρο του πείρου.



Εικόνα 3.2: Κύρια στοιχεία του μοντέλου

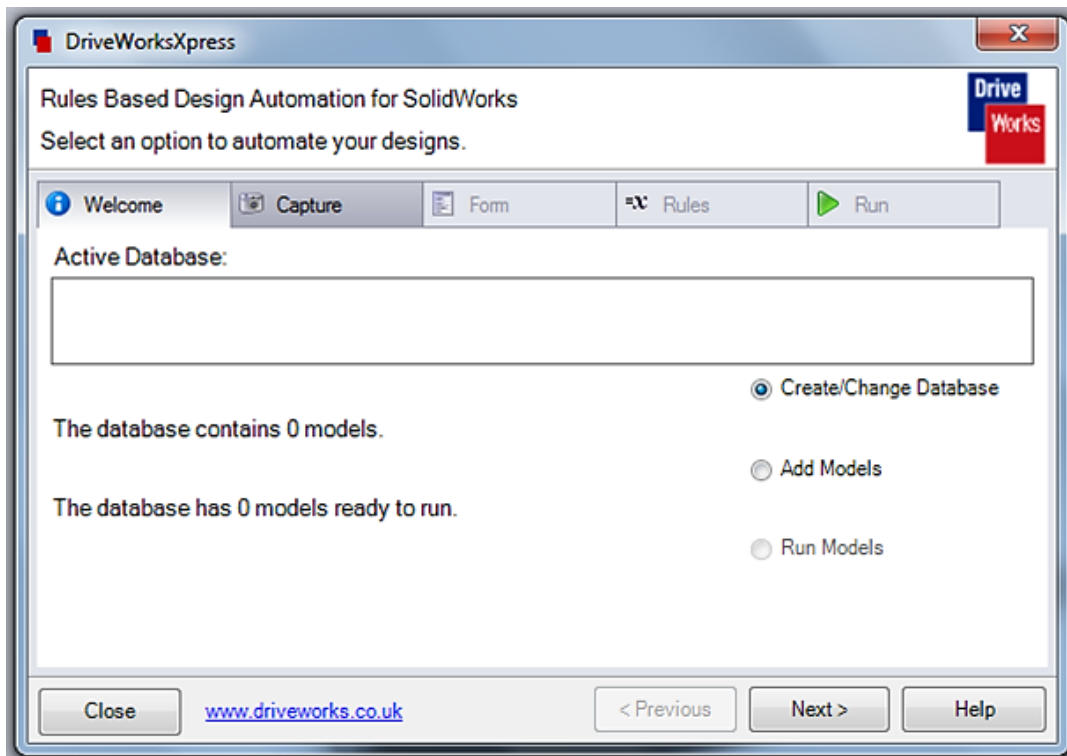
Στο σχήμα της Εικόνα 3.3 φαίνεται η γεωμετρία της ποκέτας των βαλβίδων εισαγωγής. Όλες οι διαστάσεις έχουν συσχετιστεί με την διάσταση της διαμέτρου του πιστονιού, και αυτό φαίνεται με το Σ δίπλα από τη διάσταση. Έτσι όταν μεταβάλλεται η διάμετρος του πιστονιού, θα αλλάξουν αναλογικά όλες οι κύριες διαστάσεις.



Εικόνα 3.3: Γεωμετρία της ποκέτας των βαλβίδων εισαγωγής

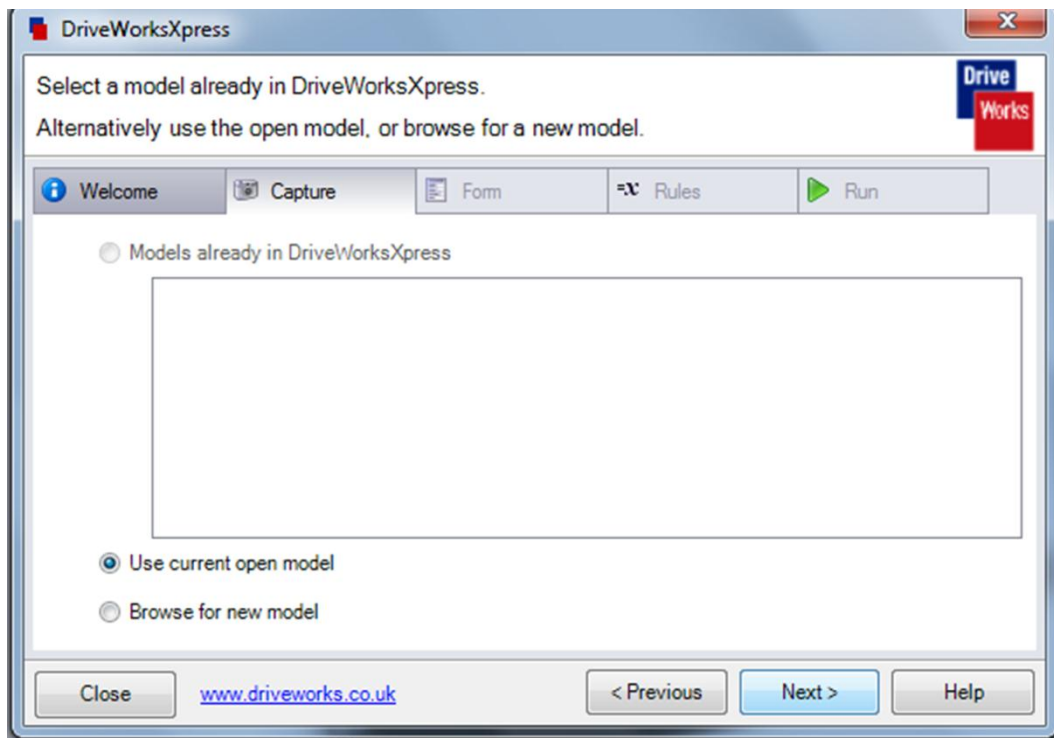
3.2 Επιλογή διαστάσεων και χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου πιστονιού με τη βοήθεια του DriveWorksExpress

Το πρόγραμμα DriveWorksExpress βοηθά στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού, δημιουργώντας πάρα πολλές παραλλαγές του μοντέλου. Έτσι αρχικά το πρόγραμμα αποθηκεύει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες του σχεδίου που θέλουμε σε μια βάση δεδομένων. Το βήμα δημιουργίας της βάσης δεδομένων που θα έχει ως αναφορά το μοντέλο μας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.

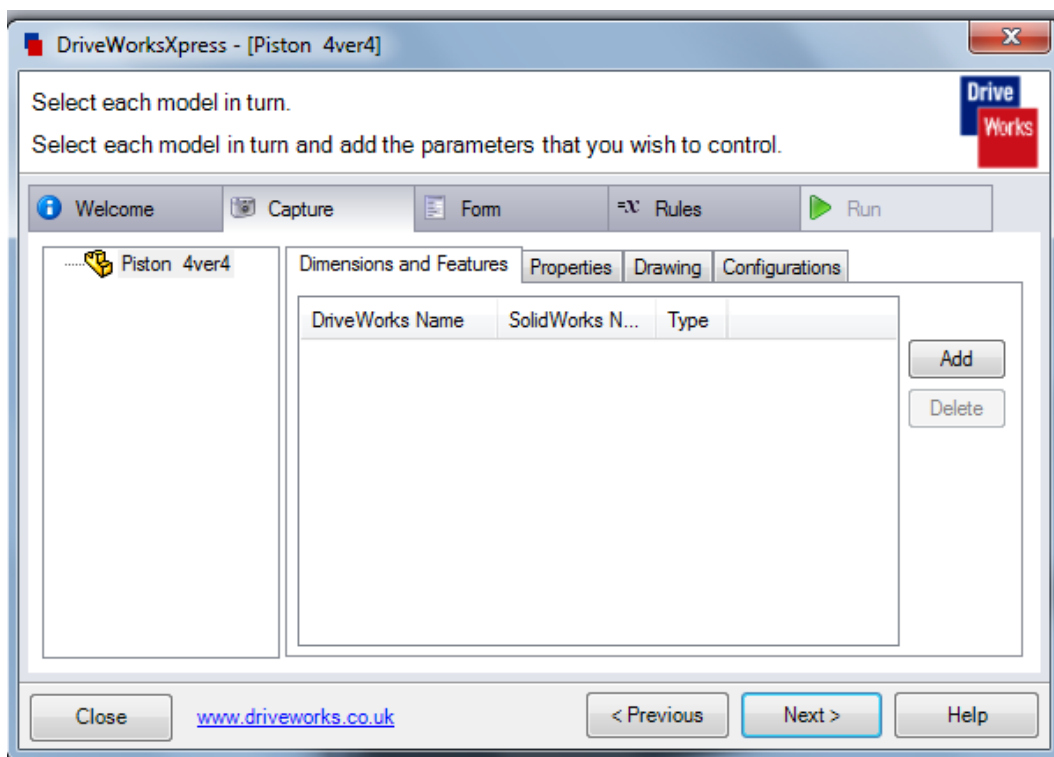


Εικόνα 3.4: Διεπιφάνεια του Driveworks για τη δημιουργία βάσης δεδομένων

Επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί από τυχόν λίστα του προγράμματος, ή συνέχιση δημιουργίας νέου μοντέλου με σκοπό τον ορισμό των επιθυμητών διαστάσεων και χαρακτηριστικών. Τα προηγούμενα φαίνονται στις Εικόνες 3.5 και 3.6 που ακολουθούν, παρουσιάζοντας τη διεπιφάνεια του προγράμματος.



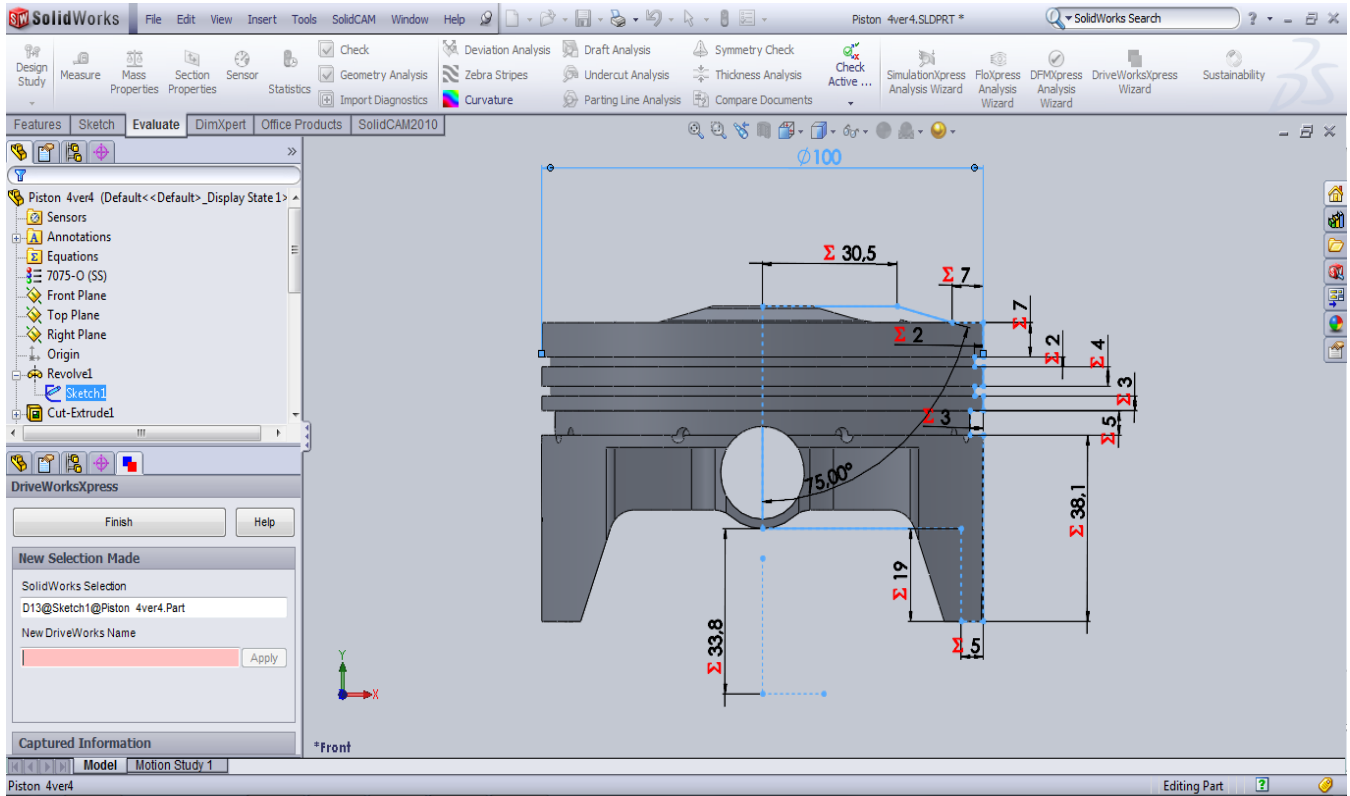
Εικόνα 3.5: Επιλογή κάποιου προϋπάρχοντος μοντέλου από τη βιβλιοθήκη



Εικόνα 3.6: Συνέχιση δημιουργίας νέου μοντέλου

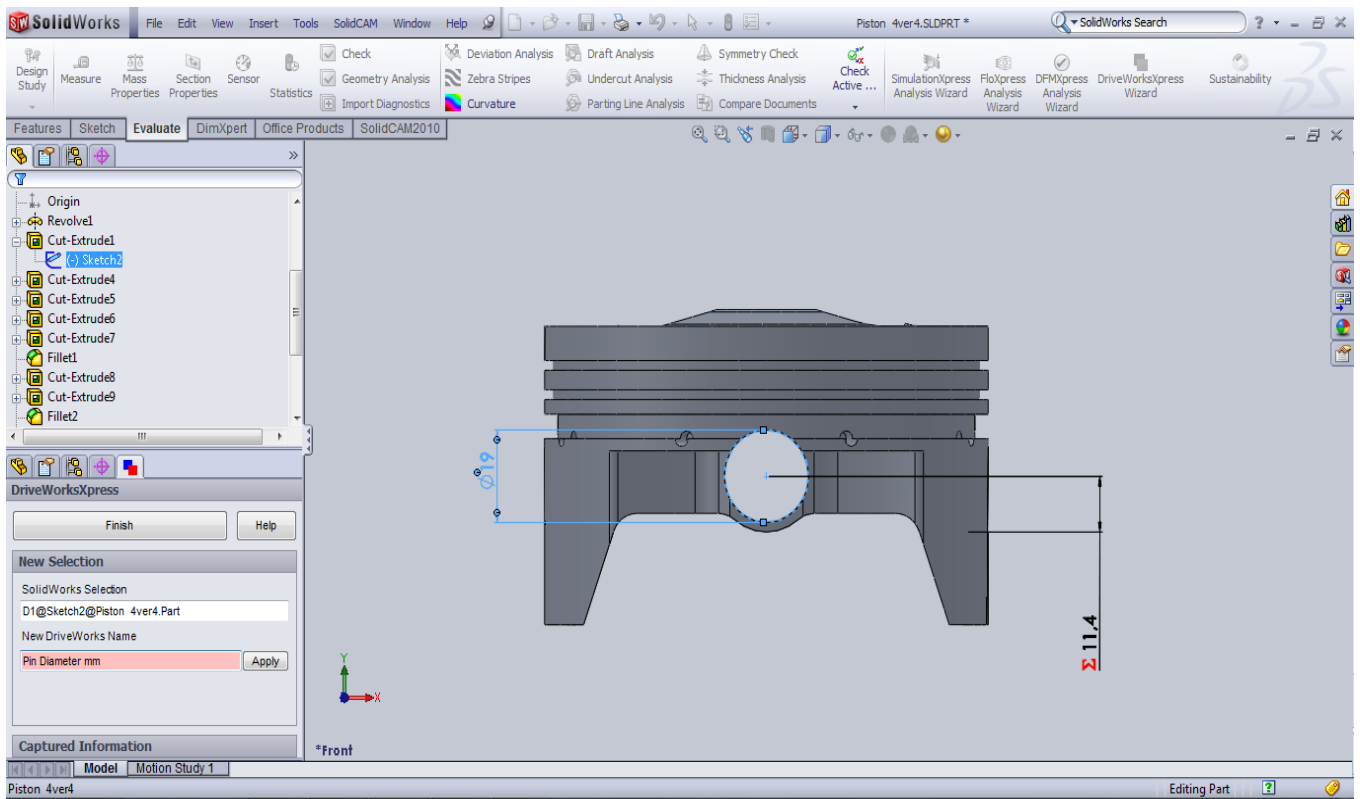
Από την παραπάνω Εικόνα 3.6, επιλέγουμε add, και στη συνέχεια μπορούμε να ορίσουμε τις νέες διαστάσεις του πιστονιού και των ιδιαίτερων

χαρακτηριστικών του. Για παράδειγμα μπορούμε να επιλέξουμε το όνομα της διάστασης που θα φαίνεται στο πρόγραμμα, «Piston Diameter mm», όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7



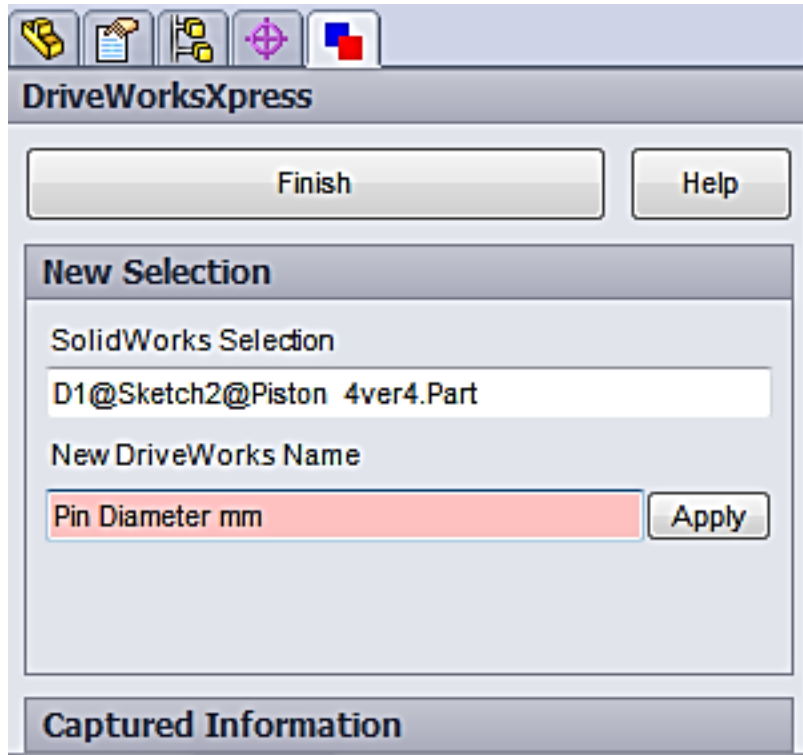
Εικόνα 3.7: Επιλογή των ονομάτων των κύριων διαστάσεων του πιστονιού

Όμοια κάνουμε και για τη διάμετρο του πείρου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7.



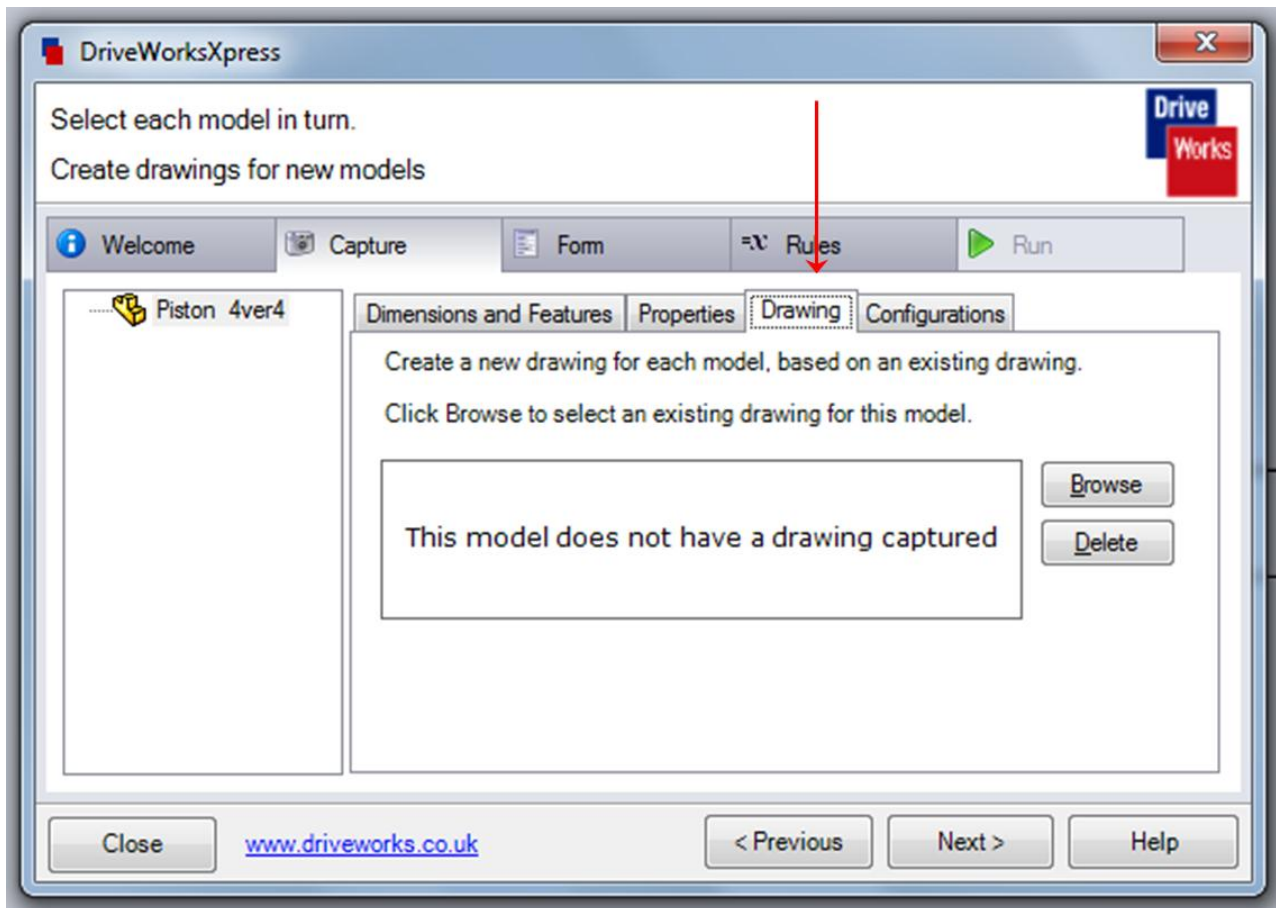
Εικόνα 3.8: Επιλογή των κύριων διαστάσεων για τον πείρο του πιστονιού

Για την εφαρμογή των επιθυμητών διαστάσεων και των μεταβλητών του πιστονιού και του πείρου του, πατάμε **Apply** και στη συνέχεια για την ολοκλήρωση του βήματος **Finish**.



Εικόνα 3.9: Επιβεβαίωση εφαρμογής των κύριων διαστάσεων και μεταβλητών του μοντέλου

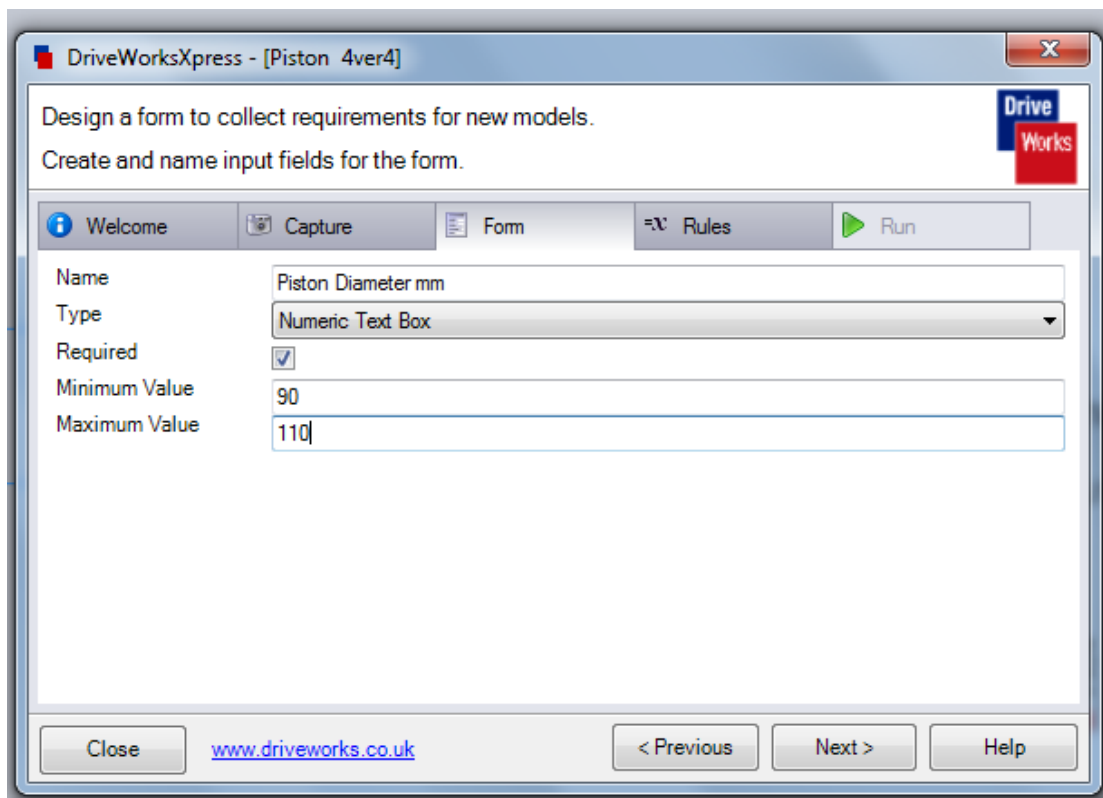
Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία μορφής του σχεδίου. Όπου η επόμενη καρτέλα που φαίνεται στην Εικόνα 3.10 δείχνει τη συσχέτιση που μπορεί να γίνει με τυχόν δισδιάστατα σχέδια.



Εικόνα 3.10: Συσχέτιση μεταξύ δισδιάστατων σχεδίων

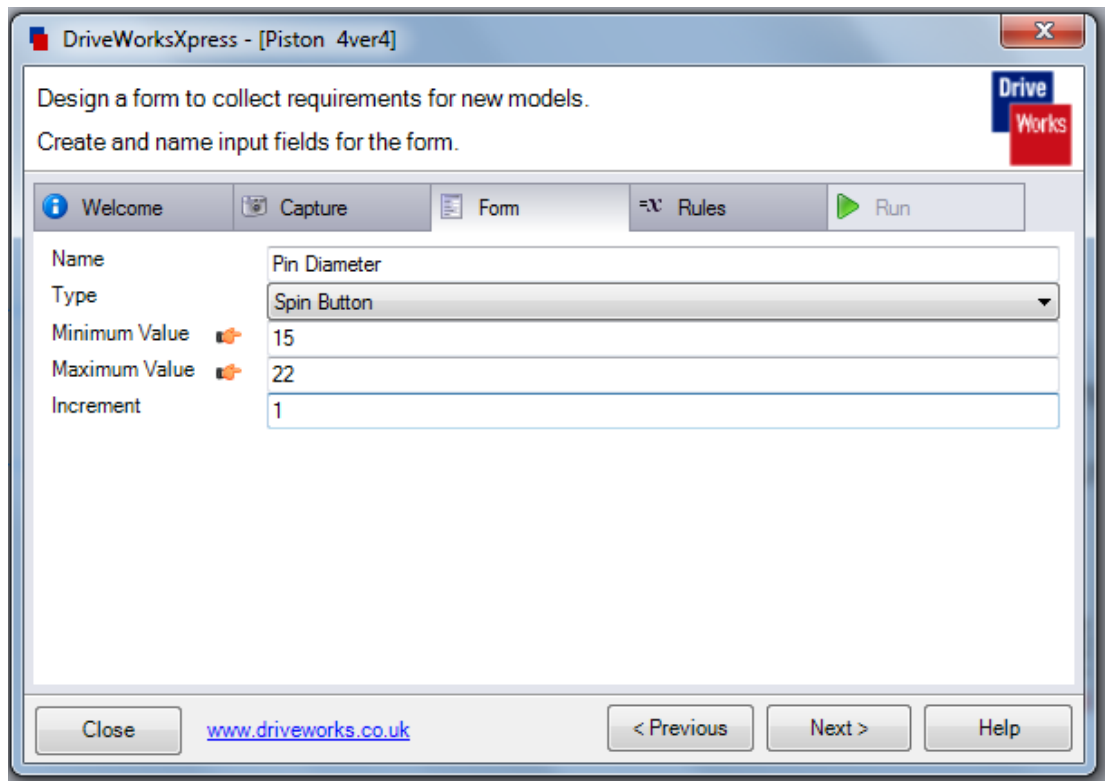
3.3 Ορισμός τιμών των παραμέτρων του μοντέλου

Στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος και η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της παραμέτρου που μας ενδιαφέρει, εν προκειμένω η διάμετρος του πιστονιού. Ο τύπος της παραμέτρου είναι “Numeric Text Box” ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της διαμέτρου είναι 90 και 110 mm, αντίστοιχα.



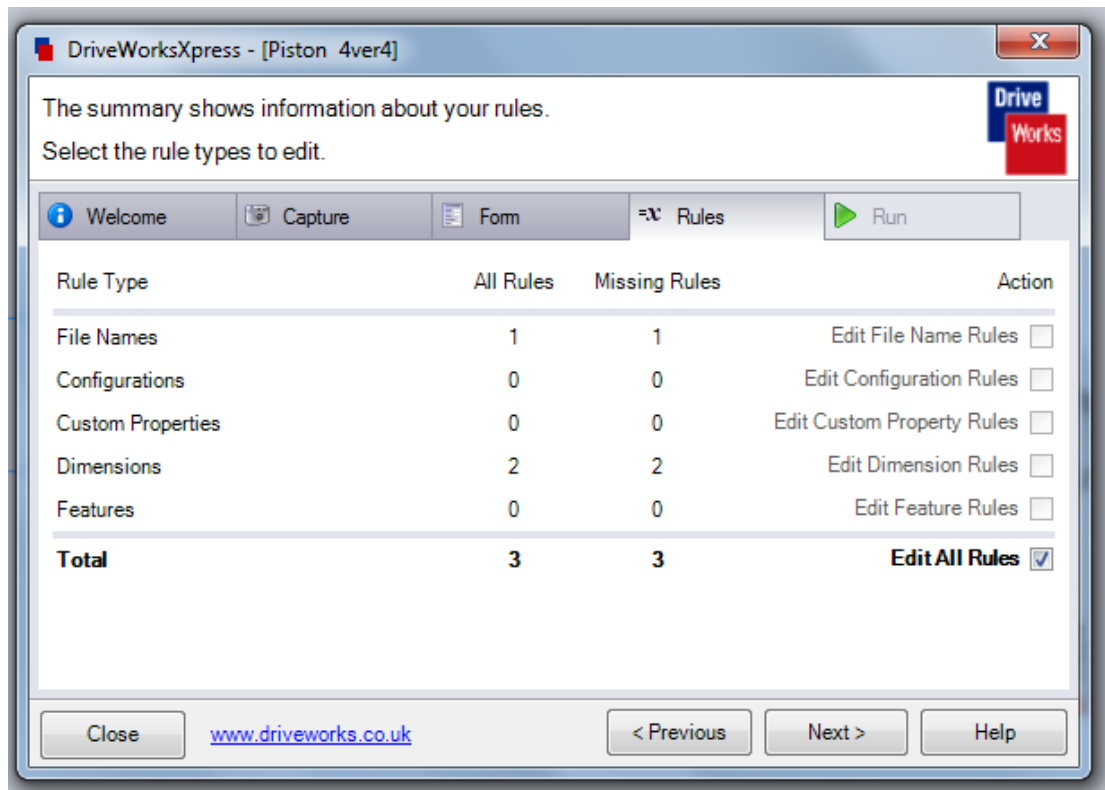
Εικόνα 3.11: Ορισμός του εύρους τιμών των παραμέτρων του πιστονιού

Ακολουθώντας την ίδια λογική ρυθμίζουμε τον τύπο της παραμέτρου και το επιθυμητό εύρος της διαμέτρου του πείρου, καθώς και το βήμα προσαύξησης. Όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.12 που ακολουθεί, ο τύπος της παραμέτρου ορίζεται “Spin Button”, η ελάχιστη διάμετρος του πείρου 15 mm και η μέγιστη 22 mm, ενώ το βήμα προσαύξησης είναι 1 mm.



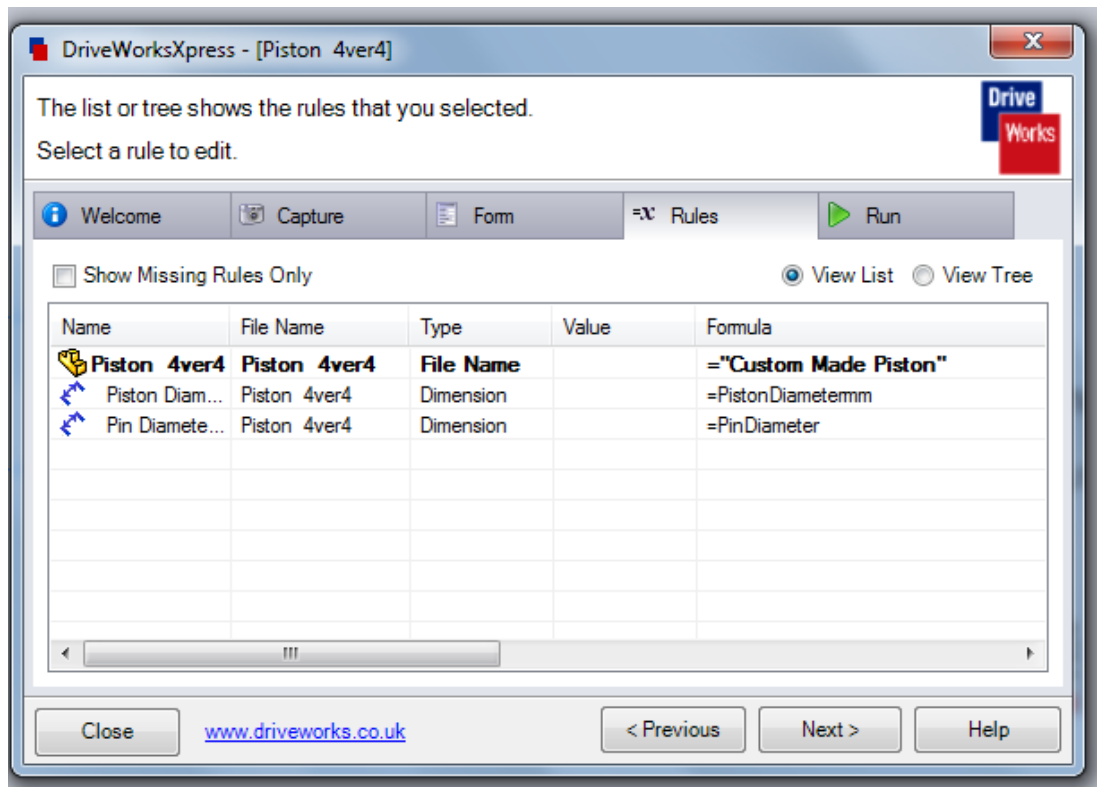
Εικόνα 3.12: Ορισμός του εύρους τιμών των παραμέτρων του πείρου του πιστονιού

Όλες οι πληροφορίες που έχουμε ορίσει μέχρι τώρα φαίνονται στην επισκόπηση που παρέχει το πρόγραμμα, Εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.13: Επισκόπηση των εισαχθέντων πληροφοριών στο πρόγραμμα

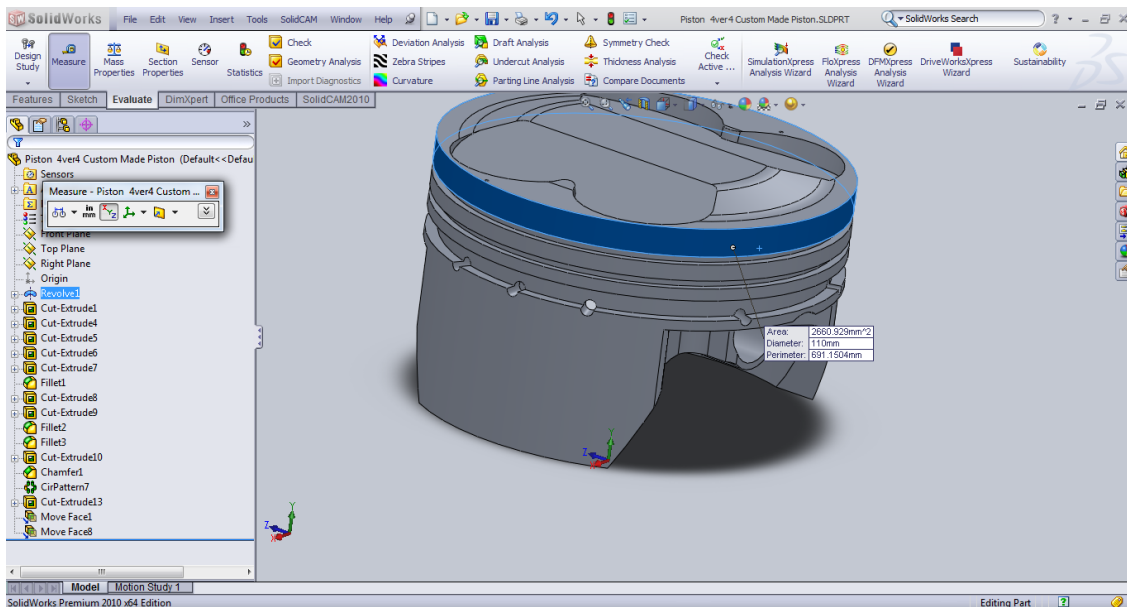
Έτσι στη συνέχεια επιλέγουμε τους κανόνες – παραμέτρους που θα καθορίζουν το μοντέλο μας, που είναι η διάμετρος του πιστονιού και του πείρου του.



Εικόνα 3.14: Επιλογή των κανόνων – παραμέτρων που καθορίζουν το μοντέλο

3.4 Δημιουργία του πιστονιού

Τέλος, πατάμε εκκίνηση της διαδικασίας παραμετροποίησης και δημιουργείται το επιθυμητό μοντέλο για το πιστόνι, Εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15: Απεικόνιση του δημιουργηθέντος σχεδίου του πιστονιού

Το πρόγραμμα μας δημιούργησε επιτυχώς ένα νέο πιστόνι με την ονομασία “*Piston 4ver4Custom made Piston*”, με διάμετρο κεφαλής 110mm και διάμετρο πείρου 18mm.

3.5 Προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά την παραμετροποίηση

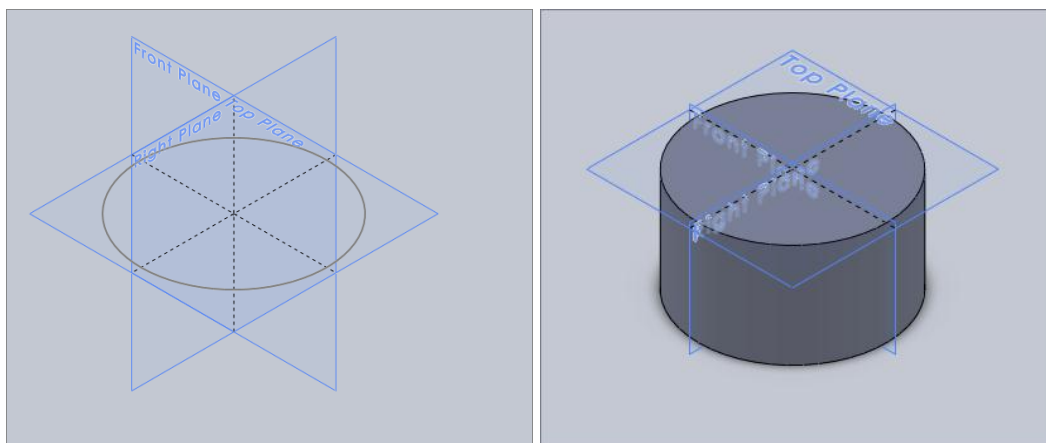
Για την παραμετροποίηση του μοντέλου που αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε πιστόνι από την μοτοσυκλέτα DUCATI 999.

Το σχέδιο του πιστονιού επιλέχτηκε από τον ιστότοπο www.grabcad.com . Η πρόσβαση είναι ελεύθερη και υπάρχει η δυνατότητα ελεύθερης διακίνησης των σχεδίων. Το συγκεκριμένο σχέδιο επιλέχτηκε με βάση την απεικονιστική ακρίβεια ως προς το αληθινό πιστόνι της συγκεκριμένης μηχανής.



Εικόνα 3.16: Πιστόνι από Ducati 999

Στην πράξη, δημιουργήθηκαν προβλήματα όπου δεν καθιστούσαν δυνατή τη σωστή εκτέλεση της παραμετροποίησης. Τα προβλήματα αυτά είχαν αναφορά στον πρωτογενή σχεδιασμό του αντικείμενου με βάση τον τρόπο λειτουργίας του SOLIDWORKS. Η βασική αρχή του Solidworks είναι η σχεδίαση σε 2 διαστάσεις (SKETCH) του συνολικού σχεδίου με την χρησιμοποίηση βασικών σχεδίων (κύκλοι, τρίγωνα, ελλείψεις, γραμμές, καμπύλες) και την μετατροπή του δισδιάστατου σχεδίου σε αντικείμενο 3 διαστάσεων μέσω εντολών (FEATURES).



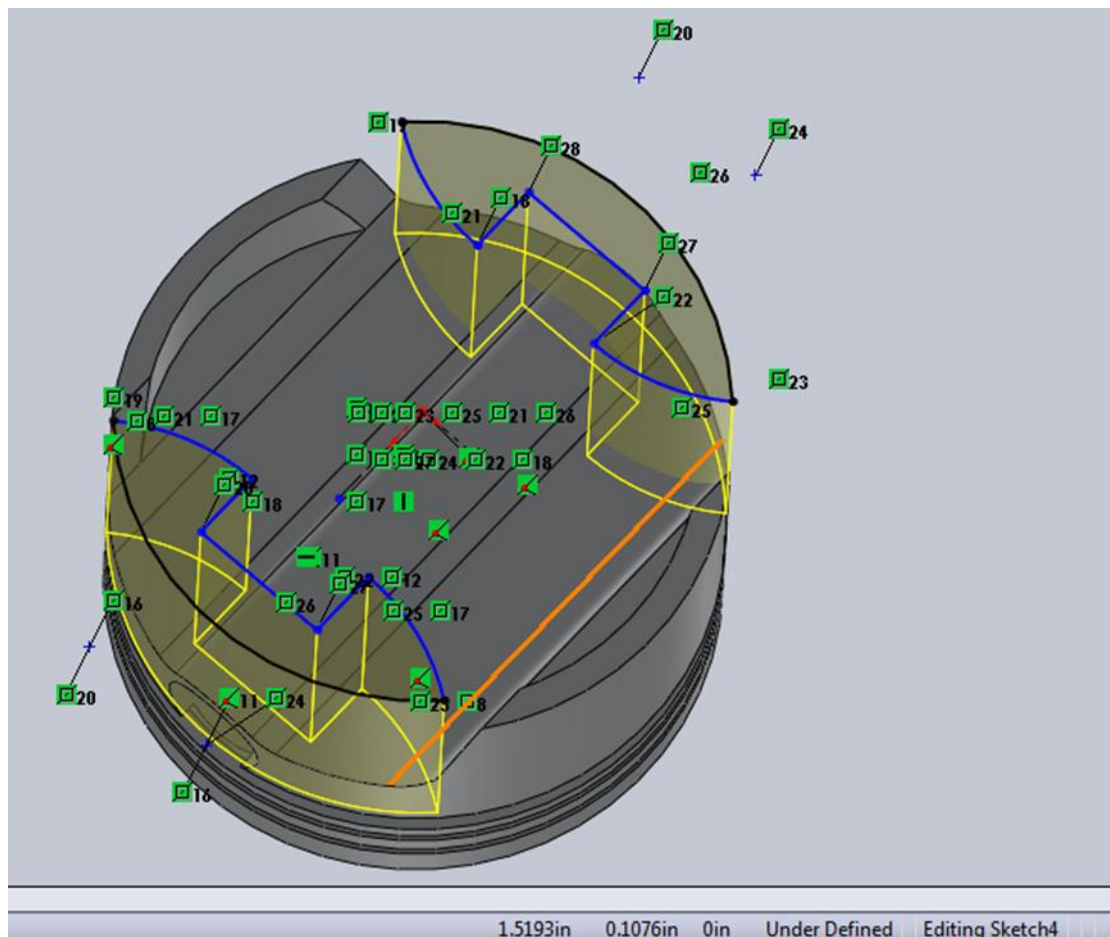
Το πρόβλημα ξεκινά όχι από την τελική μορφή (απεικόνιση πιστονιού) του σχεδίου, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι σωστή με μια πρώτη ματιά, όσο στη μέθοδο που ακολουθήθηκε στην δόμηση του σχεδίου από τις εντολές του SKETCH και των FEATURES

Ο σχεδιαστής είχε αμελήσει να ορίσει πλήρως κάποια SKETCH είτε αυτόνομα είτε συνολικά επί του σχεδίου.

Δηλαδή, το SOLIDWORKS για τον ορισμό των σχεδίων σε διάφορα επίπεδα παράλληλα, κάθετα, υπό γωνία δουλεύει με RELATIONS. Αυτά είναι οι σχέσεις που έχει κάθε υποτυπώδες σχέδιο με την αρχή των αξόνων του συστήματος ή οι σχέσεις μεταξύ των σχεδίων μεταξύ τους ή και με παράγωγα επίπεδα που δημιουργεί ο χρήστης κι όπου το καθένα έχει ένα δικό του σύστημα συντεταγμένων και που τον βοηθά στη σχεδίαση υπό γωνίες, κάθετα ή και στο να σχεδιάσει ένα σχέδιο σε ήδη υπάρχον αντικείμενο, για παράδειγμα έχω ήδη ένα κύβο και θέλω να σχεδιάσω μια σφαίρα, η οποία ακουμπά σε μια πλευρά του.

Τα RELATIONS αυτά εμφανίζονται στο σχέδιο με τις ιδιότητες της παραλληλίας, της καθετότητας, της τομής στο κέντρο μιας πλευράς κάποιου ευθύγραμμου τμήματος κ.λ.π.

Το σημαντικότερο όμως είναι ότι τα προβλήματα που υπάρχουν από λάθος ορισμό του σχήματος τα κάνει γνωστά στο χρήστη σε κάθε βήμα της σχεδίασης το SOLIDWORKS. Αυτό γίνεται με την ειδοποίηση κάτω δεξιά στην οθόνη, δηλαδή ότι το σχήμα δεν έχει οριστεί πλήρως *UNDER DEFINED* καθώς και με προβολή του μη οριοθετημένου σήματος με μπλε γραμμή όπως στο σχήμα από κάτω.

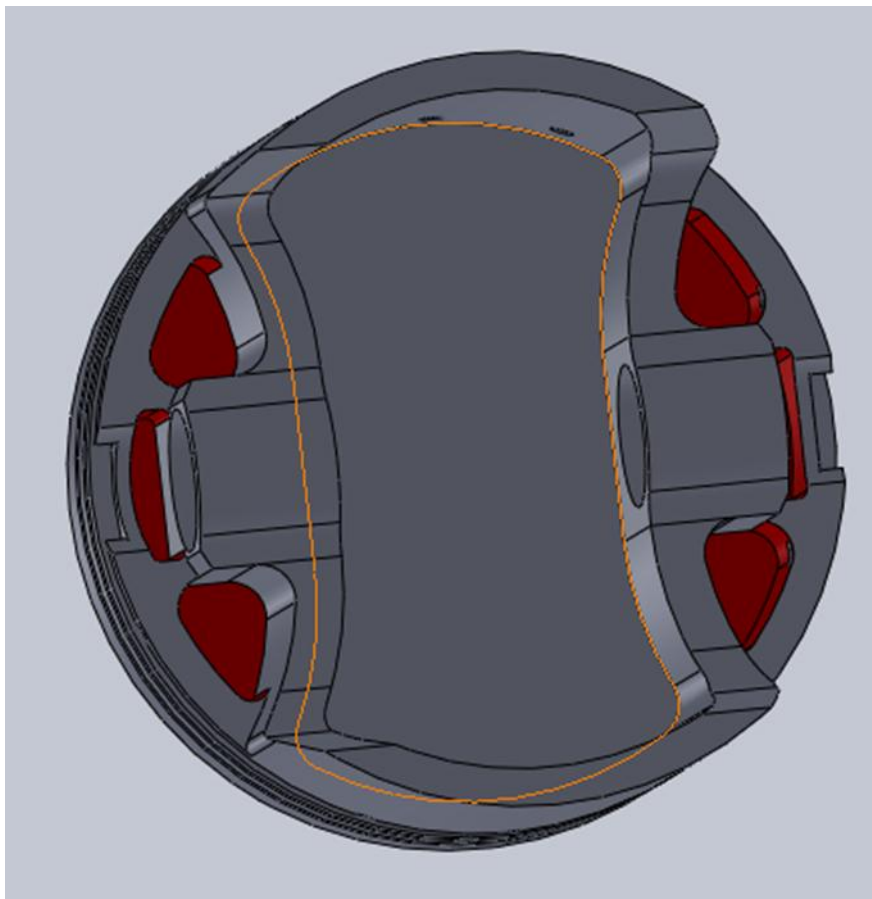


Εικόνα 3.17: Under Defined Sketch

Το SOLIDWORKS δεν σταματά την σχεδίαση του κομματιού λόγω τέτοιων λαθών. Εξαρτάται από τον χρήστη αν θέλει να τα διορθώσει. Το συγκεκριμένο είχε πολλά τέτοια λάθη, τα οποία όπως είπαμε από αισθητικής πλευράς του κομματιού δεν δημιουργεί πρόβλημα, το οποίο υπάρχει όταν γίνεται η παραμετροποίηση που μας αφορά για τον απλό λόγο ότι η παραμετροποίηση οφείλεται σε αυτές τις συσχετίσεις.

Η πρώτη σκέψη με την ανακάλυψη των προβλημάτων αυτών ήταν η διόρθωσή τους. Εκεί όμως παρουσιάστηκε το εξής νέο πρόβλημα. Στο κάτω μέρος του

πιστονιού και εξωτερικά των οπών του πείρου υπάρχουν σκαψίματα αφαίρεσης υλικού, όπου δεν έχουν κάποιο λειτουργικό ρόλο και αφαιρούνται για εξοικονόμηση βάρους. Φαίνεται με κόκκινο στο παρακάτω σχήμα

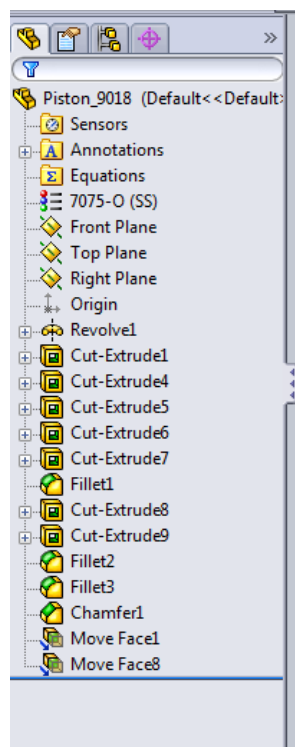


Εικόνα 3.18: Ποκέτες που δεν μπορούσαν να κατεργαστούν με CNC

Αυτά σχεδιάζονται με τον συνδυασμό κύκλου (εξωτερικό μέρος) και έλλειψης με ευθείες (εσωτερικό μέρος). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το εξωτερικό μέρος απεικονίζεται με μαύρο χρώμα, σωστή σχεδίαση, και το εσωτερικό μέρος με μπλε χρώμα, λάθος σχεδίαση (UNDERDEFINED).

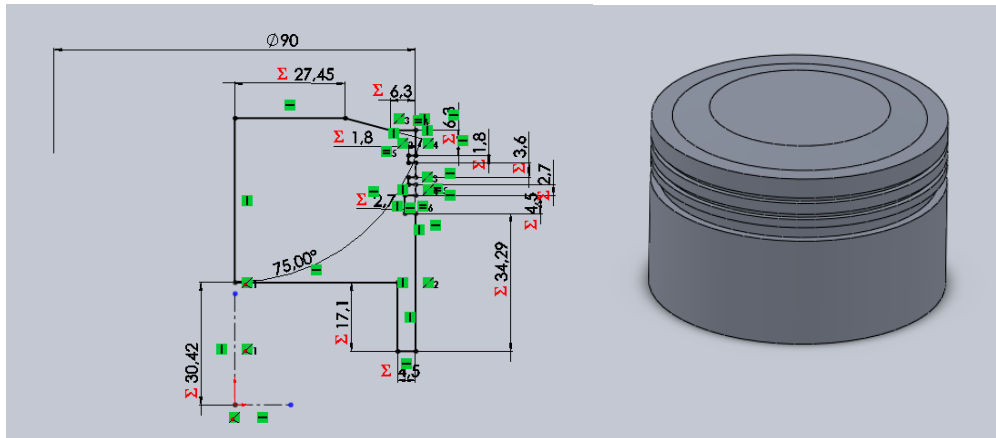
Το συνολικό σχέδιο (PISTON) αποτελείται από μικρότερα σχέδια, τα οποία και αυτά αποτελούνται από μικρότερα φτάνοντας στις υποτυπώδεις εντολές σχεδιασμού που αποτελούν το SOLIDWORKS. Χρειάζεται να ανατρέχει κάποιος συνέχεια στο “ΔΕΝΤΡΟ” της διαδικασίας χτισίματος του συνολικού σχεδίου (ΠΙΣΤΟΝΙ) που βρίσκεται αριστερά και ψηλά στην οθόνη ,να ξεχωρίζει κάθε σχέδιο όπως προαναφέρθηκε για τις κοιλότητες στο κάτω μέρος του πιστονιού ,να ελέγχει μεμονωμένα κάθε υποτυπώδες σχέδιο χωριστά από το οποίο αποτελείται τόσο προς την σχεδιαστική του πλευρά SKETCH

όσο ως προς τα FEATURES και ως προς τα RELATIONS που έχει με υπόλοιπα υποτυπώδη σχέδια. και μετά το ίδιο να γίνεται για κάθε μεγαλύτερο από τα υποτυπώδη σχέδια βλέποντας κάθε φορά πως οι αλλαγές που γίνονται μεταβάλλουν τον ορισμό του όλου σχεδίου



Εικόνα 3.19: Το δέντρο σχεδίασης

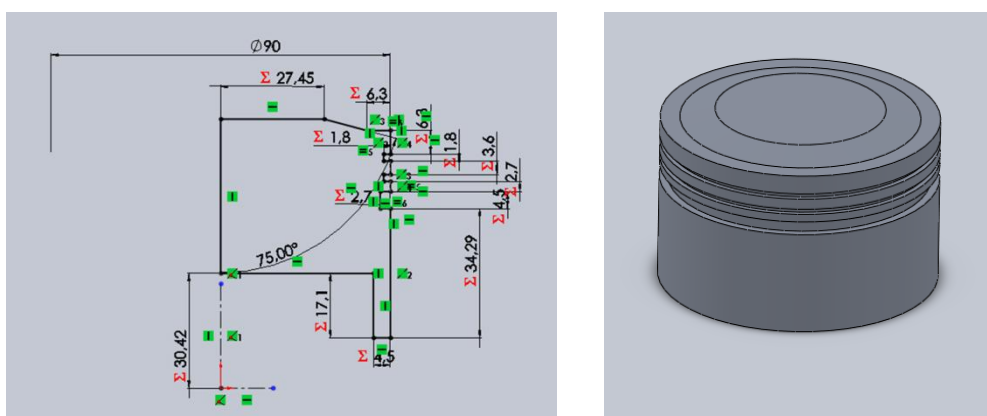
Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα και δεν αποτελεί εγγύηση επίλυσης του προβλήματος διότι υφίσταται και ο παράγοντας της στρατηγικής της σχεδίασης, δηλαδή ο δρόμος με τον οποίο επιλέγονται συγκεκριμένες εντολές για την σχεδίαση. Για παράδειγμα το πιστόνι ξεκινά ως κύκλος που γεμίζει, για να γίνει κύλινδρος και μετά σκάβεται για να διαμορφωθεί ως πιστόνι ή εναλλακτικά το πιστόνι δημιουργείται σε τομή ως απλό σχέδιο σε δύο διαστάσεις, το οποίο περιστρέφεται ως προς τον άξονα συμμετρίας και τελικά δημιουργείται κύλινδρος



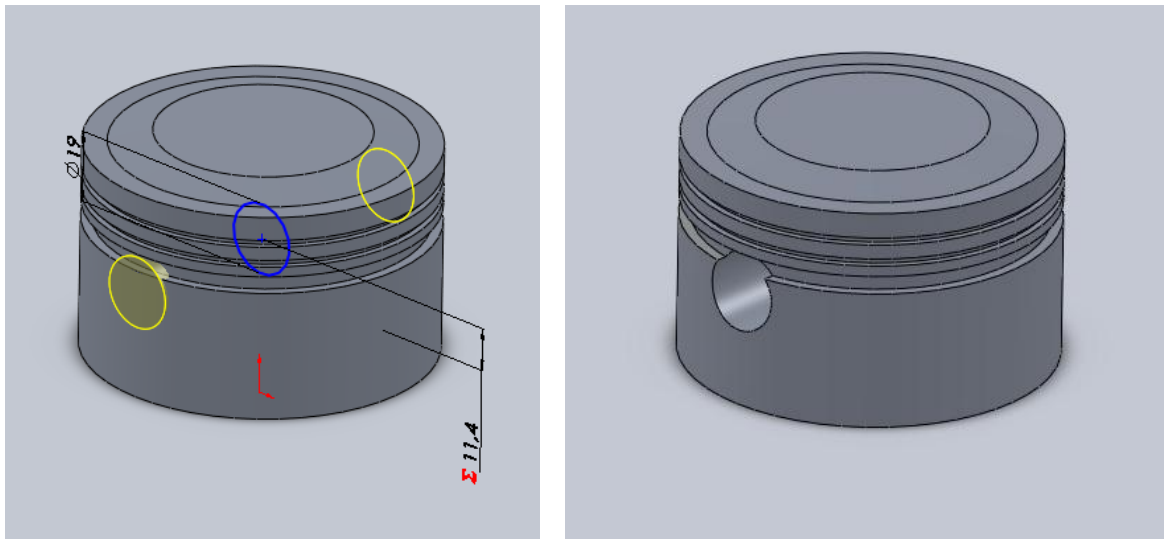
Κατά συνέπεια αποφασίστηκε η εξ ολοκλήρου σχεδίαση του πιστονιού από την αρχή με προσεκτική εφαρμογή των εντολών του SOLIDWORKS ώστε το σχέδιο να είναι σε κάθε βήμα σωστά ορισμένο με την μέθοδο ενός υποτυπώδους σχήματος το οποίο περιστρεφόμενο για 360° δημιουργεί το βασικό κύλινδρο. Μετά δημιουργούνται οι αναγκαίες κοιλότητες με FEATURES αφαίρεσης υλικού.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί λιγότερα σχέδια SKETCH με αποτέλεσμα και λιγότερα προβλήματα από τις συσχετίσεις RELATIONS που απαιτούνται.

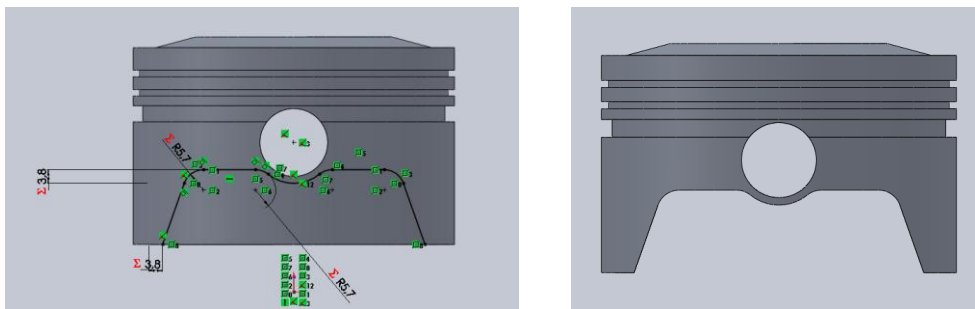
Αρχικά δημιουργείται το βασικό σχήμα του πιστονιού με εντολή Revolve.



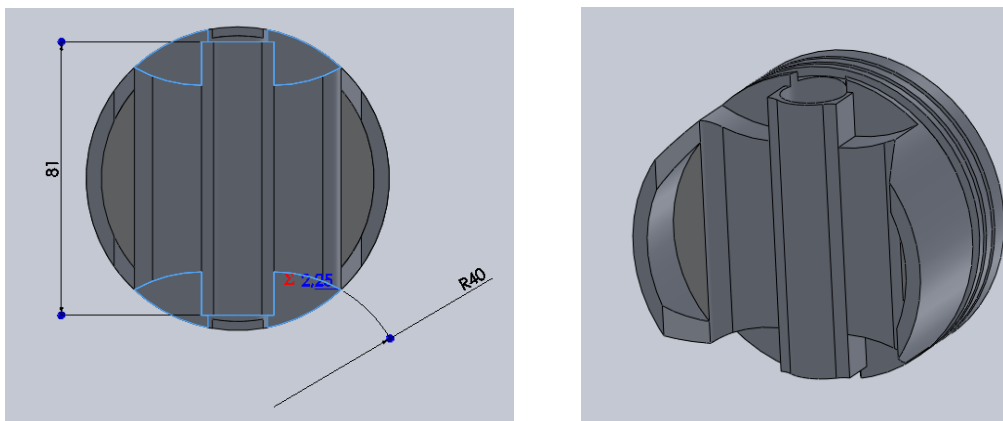
Στη συνέχεια δημιουργείται ο πείρος του πιστονιού με την εντολή Cut-extrude.



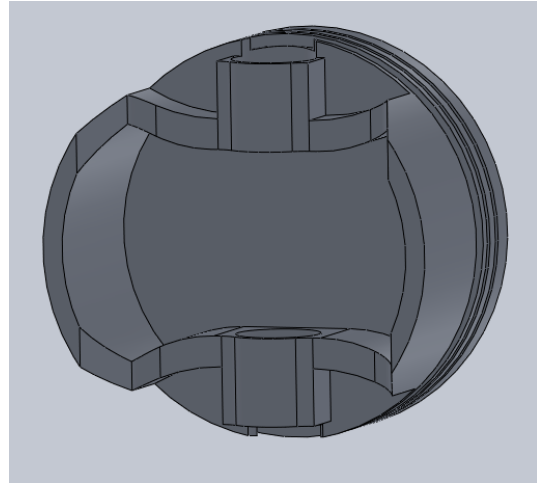
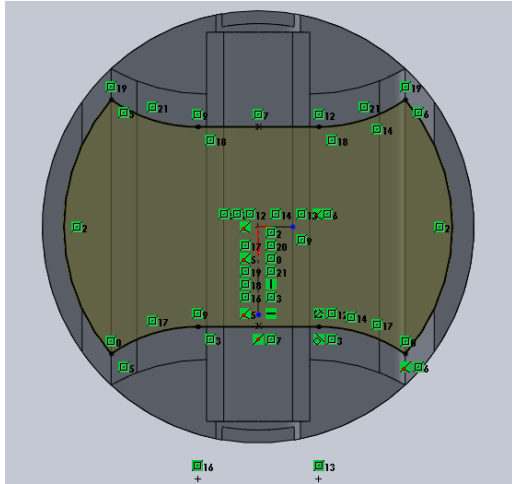
Στη συνέχεια δημιουργείται η φούστα του πιστονιού με εντολή Cut-extrude



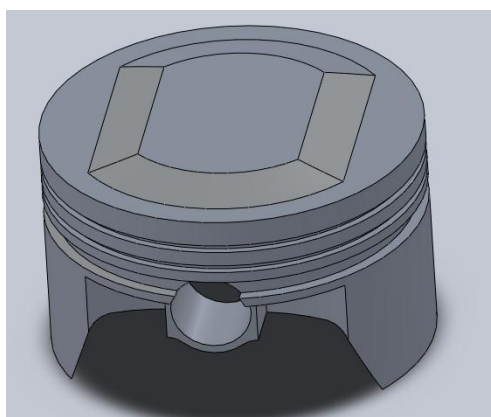
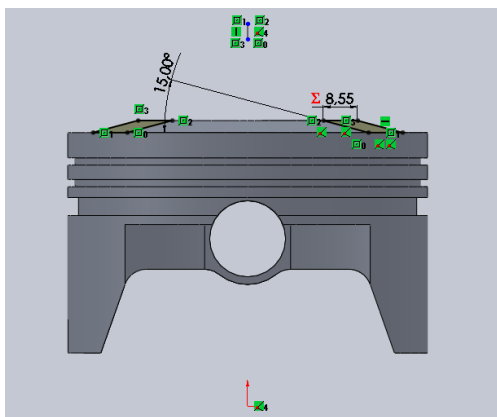
Στη συνέχεια γίνεται αφαίρεση υλικού στο κάτω μέρος για εξοικονόμηση βάρους στο πιστόνι με εντολή Cut extrude.



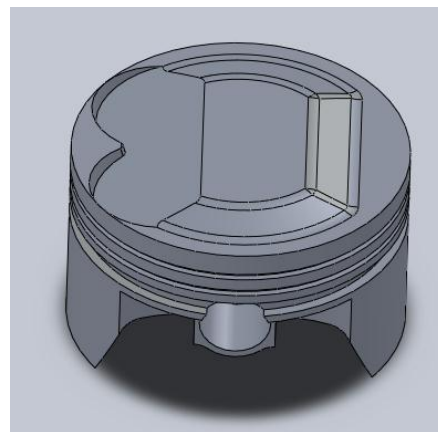
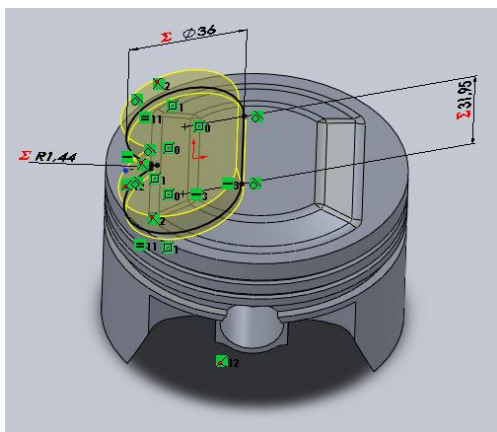
Δημιουργείται το κάτω μέρος του πιστονιού, σημείο συναρμογής διωστήρα, με εντολή cut extrude.



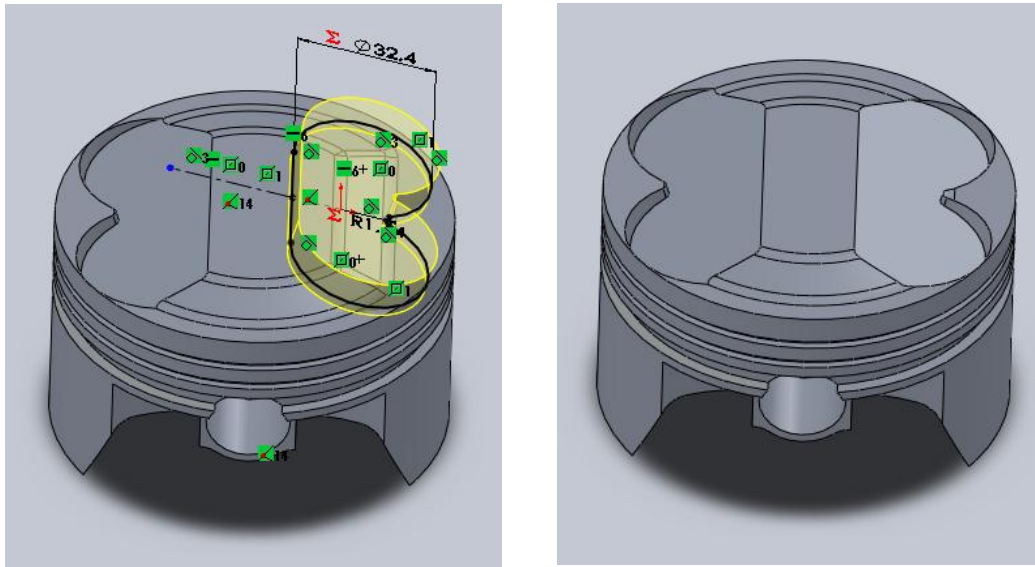
Στη συνέχεια μορφοποιείται η γεωμετρία της κεφαλής του εμβόλου με εντολή cut extrude.



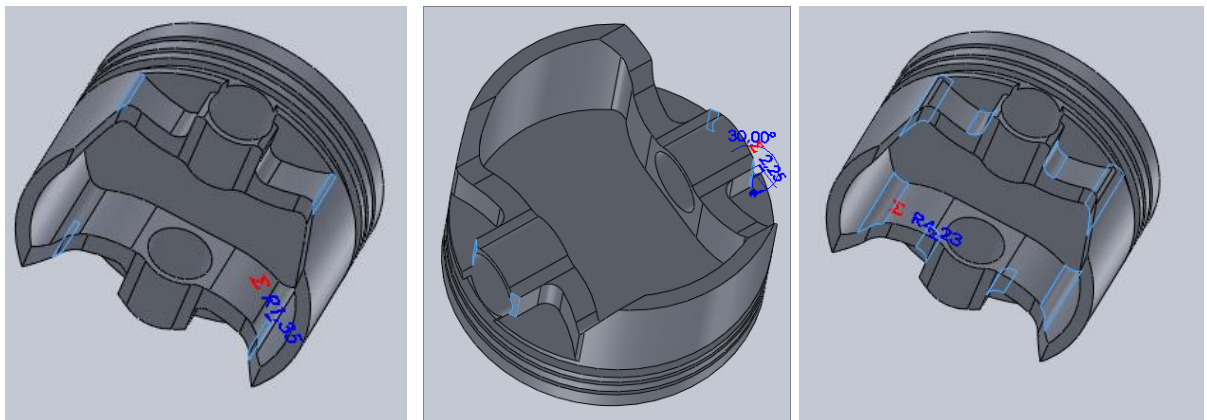
Στη συνέχεια μορφοποιείται η ποκέτα της βαλβίδας εισαγωγής με εντολή cut extrude.



Αντίστοιχα και για την ποκέτα της βαλβίδας εξαγωγής.



Τέλος ολοκληρώνονται οι εντολές με κάποια ράδια και σπασίματα ακμών.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Φασεολόγια Κοπής

Κατά την πρώτη προσέγγιση του κομματιού με το λογισμικό CAM είχε επιλεχθεί η μέθοδος 3D milling. Η μέθοδος 3D milling αφορά κατεργασίες σε 3 άξονες. Η λειτουργία αυτή, στο πρόγραμμα SolidCam, προσφέρει στον χρήστη την επιλογή ανάμεσα σε κατεργασίες εκχόνδρισης (roughing), ημι-αποπεράτωσης (semi-finishing) και αποπεράτωσης (finishing). Λόγω της φύσης της λειτουργίας και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, απαιτούνταν διαφορετικός αριθμός εργαλείων, άλλο εργαλείο για εκχόνδρισμα, άλλο για ημι-αποπεράτωση και άλλο για αποπεράτωση. Επίσης για να πετύχουμε πολύ καλές επιφάνειες στην κατεργασία με ίσια κονδύλια θα έπρεπε να επιλέξουμε πολύ μικρό scallop height, κάτι που οδήγησε σε πολύ μεγάλη διάρκεια για τις κατεργασίες των ποκέτων των βαλβίδων. Και για τις 2 ποκέτες ο χρόνος αποπεράτωσης ήταν περί τις 23 ώρες, πράγμα που θα οδηγούσε σε υψηλό κόστος κατεργασίας.

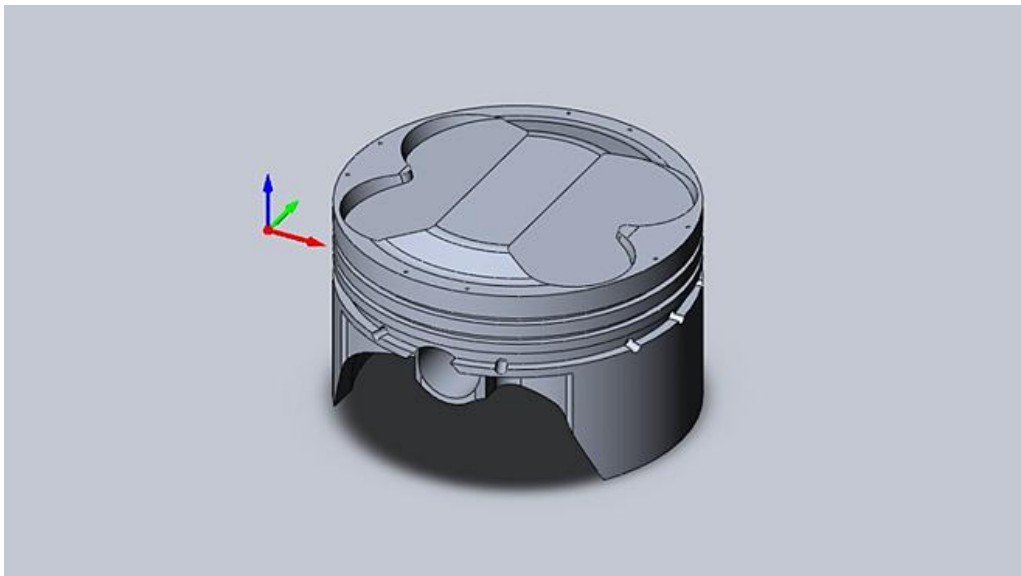
Τελικά επιλέχθηκε η στρατηγική κατεργασίας ποκέτας, με προγραμματισμό ανοικτών και κλειστών ποκέτων κατά περίπτωση. Αυτή η στρατηγική περιγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

4.1 Φάσεις κατεργασίας

Η στρατηγική κοπής που ακολουθήθηκε για την παραγωγή του επιθυμητού πιστονιού βενζινοκινητήρα είναι η εξής:

- Το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα πραγματοποιήθηκαν με ίδιο εργαλείο στην ίδια κατεργασία, αλλά η πρόωση ανά δόντι f_z (mm/tooth) για το φινίρισμα είναι η μισή.
- Το ξεχόνδρισμα αφήνει 0.7 mm για φινίρισμα, το οποίο θα γίνει με μικρότερη ταχύτητα.
- Τα επίπεδα (levels) κάθε φορά είναι το 40% της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου. Είναι μια εμπειρική τιμή που χρησιμοποιείται στα αλουμίνια για αποφυγή τάσεων και παραμορφώσεων, αλλά και για την προστασία του ίδιου του εργαλείου. Η κατεργασία γίνεται χωρίς υγρό κοπής.
- Οι ποκέτες έχουν κοπεί με στρατηγική open και closed κατά περίπτωση, ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθεί το εργαλείο στην ποκέτα. Όπου

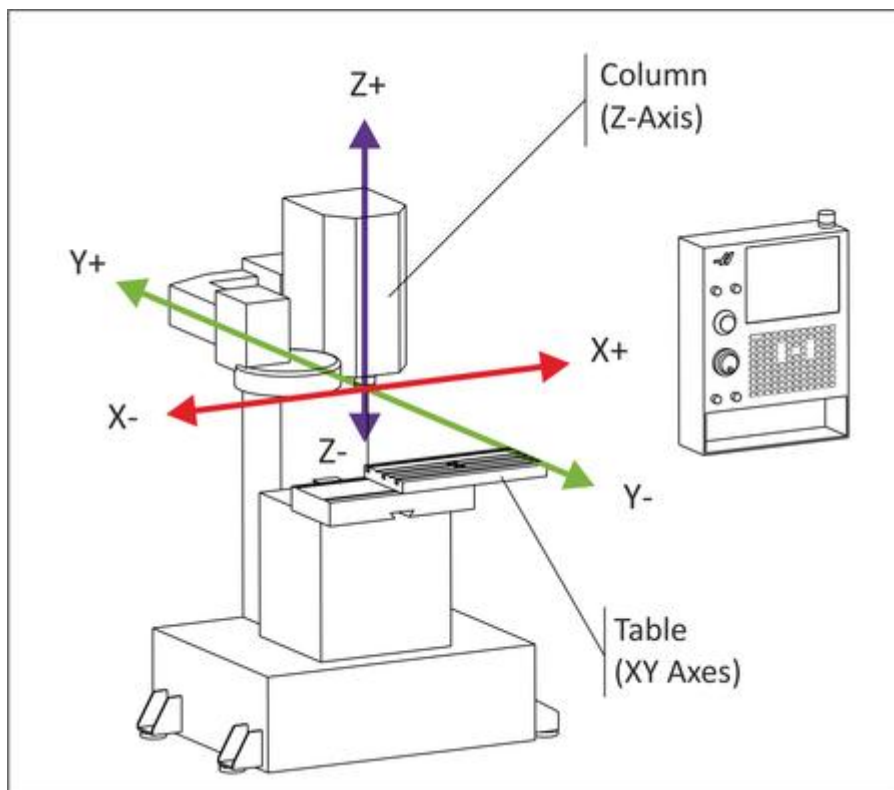
το επιτρέπει η γεωμετρία της ποκέτας, χρησιμοποιείται στρατηγική open.



Εικόνα 4.1: Επιθυμητή τελική μορφή του πιστονιού

4.2 Προσανατολισμοί τεμαχίου

4.2.1 Χαρακτηριστικά σημεία στις CNC εργαλειομηχανές



Εικόνα 4.2: Άξονες κέντρου καταργασίας 3 αξόνων

Σε κάθε εργαλειομηχανή και κατεργασία ψηφιακής καθοδήγησης, ορίζονται χαρακτηριστικά σημεία, ενώ όλες οι διαστάσεις των τεμαχίων που πρόκειται να κατεργαστούν, προγραμματίζονται σε σχέση με αυτά. Τα μηδενικά σημεία είναι, λοιπόν, αρχές συστημάτων συντεταγμένων. Η χρήση αυτών των σημείων επιτρέπει τη μονοσήμαντη επικοινωνία του προγραμματιστή με την εργαλειομηχανή. Για το λόγο αυτό, η γνώση, η κατανόηση και η χρήση των σημείων αυτών είναι από τις πιο βασικές παραμέτρους στον αριθμητικό έλεγχο των εργαλειομηχανών.

Το **μηδενικό σημείο M** μιας εργαλειομηχανής είναι ένα και μοναδικό, καθορίζεται από τον κατασκευαστή της και η θέση του βρίσκεται καταχωρημένη στη μονάδα κεντρικού ελέγχου. Το σημείο αυτό καθορίζει την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής, το οποίο είναι ένα και μοναδικό και δεν μπορεί να μεταφερθεί αλλού. Συνήθως, όταν η μηχανή τίθεται σε λειτουργία, όλοι οι άξονες κατεργασίας μετακινούνται αυτόματα προς αυτό. Μάλιστα, στις σύγχρονες εργαλειομηχανές, η κίνηση αυτή πραγματοποιείται με τέτοια σειρά, ώστε να αποφευχθούν τυχόν συγκρούσεις (λογική τοποθέτησης - positioning logic). Για παράδειγμα, σε ένα κέντρο κατεργασίας σε κατακόρυφη θέση, η οριζόντια μετακίνηση της τράπεζας θα γίνει, αφού πρώτα αυτή κατεβεί στην πιο χαμηλή θέση της, ώστε να αποφευχθεί η πιθανή σύγκρουση μιας μέγγερης δεμένης στο τραπέζι με ένα αφημένο στο τσοκ κοπτικό εργαλείο. Ανάλογα συμπεριφέρεται το κέντρο κατεργασίας και στην οριζόντια θέση.

Πολλές φορές, η χρήση των μηδενικών σημείων της μηχανής δεν είναι βολική για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης κατεργασίας. Τυπικές περιπτώσεις τέτοιων δυσκολιών είναι :

- σε εργαλειομηχανές μεγάλου ή πολύ μεγάλου μεγέθους, η μεταφορά του κοπτικού εργαλείου στο μηδενικό σημείο της μηχανής απαιτεί πάρα πολύ μεγάλο χρόνο.
- όταν το κατεργαζόμενο τεμάχιο ή η ιδιοσυσκευή συγκράτησής του έχει τέτοια διαμόρφωση που να μην επιτρέπει τη μετάβαση στο μηδενικό σημείο της εργαλειομηχανής.

Στην περίπτωση αυτή πρέπει να επιλεγεί ένα πιο κατάλληλο σημείο, το οποίο θα παίζει το ρόλο του μηδενικού σημείου της μηχανής, για τη συγκεκριμένη περίπτωση κατεργασίας. Το σημείο αυτό ονομάζεται **σημείο αναφοράς** της εργαλειομηχανής και συμβολίζεται με R. Σε αυτήν την περίπτωση, η επαναφορά, από το χειριστή, της μηχανής στο μηδενικό σημείο της εργαλειομηχανής θα οδηγήσει το κοπτικό εργαλείο στο σημείο αναφοράς της.

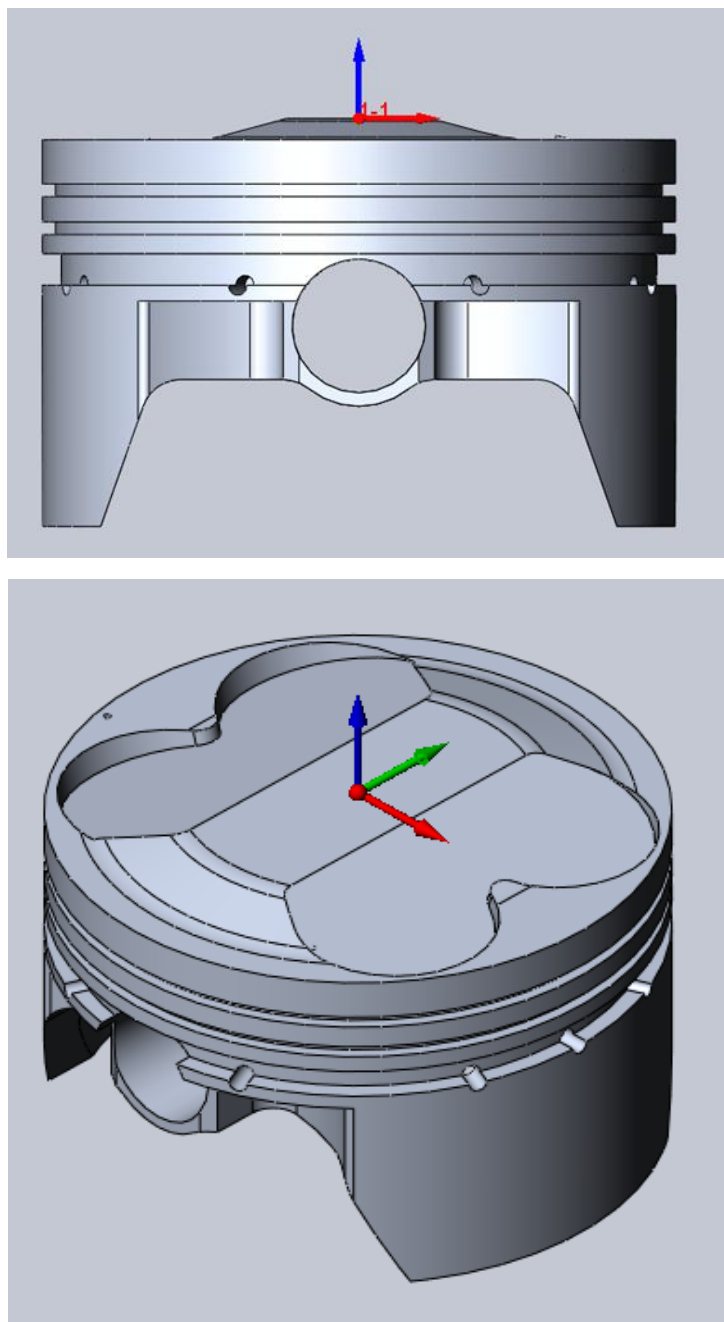
Αυτό θα γίνεται, μέχρι ο χειριστής να ακυρώσει την ύπαρξη αυτού του σημείου.

Άλλο τυπικό σημείο, το οποίο συναντάται στην περίπτωση εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση είναι το **σημείο αλλαγής του κοπτικού εργαλείου**, που συμβολίζεται με Ww. Στην περίπτωση αυτόματης αλλαγής του εργαλείου, η θέση αυτή είναι προκαθορισμένη από τον κατασκευαστή και βρίσκεται κοντά στο σύστημα ή τα συστήματα αλλαγής που έχει η εργαλειομηχανή. Στην περίπτωση που η αλλαγή του εργαλείου γίνεται από το χειριστή της εργαλειομηχανής χειροκίνητα, η θέση αλλαγής ορίζεται σε κάποια απόσταση από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, ώστε να του αφήσει διαθέσιμο χώρο. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι αρκετή, ώστε ο τεχνίτης να έχει χώρο αλλαγής, αλλά όχι πολύ μεγάλη, ώστε να απαιτεί πολύ χρόνο μετακίνησης από το τεμάχιο στο σημείο αλλαγής. Επίσης, πρέπει να ορισθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη μετάβαση σε αυτή να μην υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Το **μηδενικό σημείο του προγράμματος**, που συμβολίζεται με P, ορίζει τη θέση, που πρέπει να έχει το εργαλείο κατά την εκκίνηση του προγράμματος, δηλαδή την αρχή της κατεργασίας. Χρησιμοποιείται κυρίως, για να ορίσει τη θέση, που πρέπει να έχει το κοπτικό εργαλείο, όταν δένεται ένα νέο τεμάχιο.

Τέλος, το **μηδενικό σημείο W του κατεργαζόμενου τεμαχίου** είναι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του τεμαχίου και ίσως το σημαντικότερο από όλα τα προαναφερόμενα σημεία, μιας και ο σωστός καθορισμός του έχει άμεση επίδραση στη διαστατική ακρίβεια και ακρίβεια μορφής του προϊόντος. Η θέση αυτού του σημείου καθορίζεται από το χειριστή της μηχανής, ανάλογα με τη μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η επιλογή του μηδενικού σημείου του τεμαχίου έχει πολύ μεγάλη σημασία, όπως αναφέρθηκε, αφού η εκλογή κατάλληλης θέσης μπορεί να απλοποιήσει πάρα πολύ τον προγραμματισμό των κινήσεων, δηλαδή την καθοδήγηση του εργαλείου.

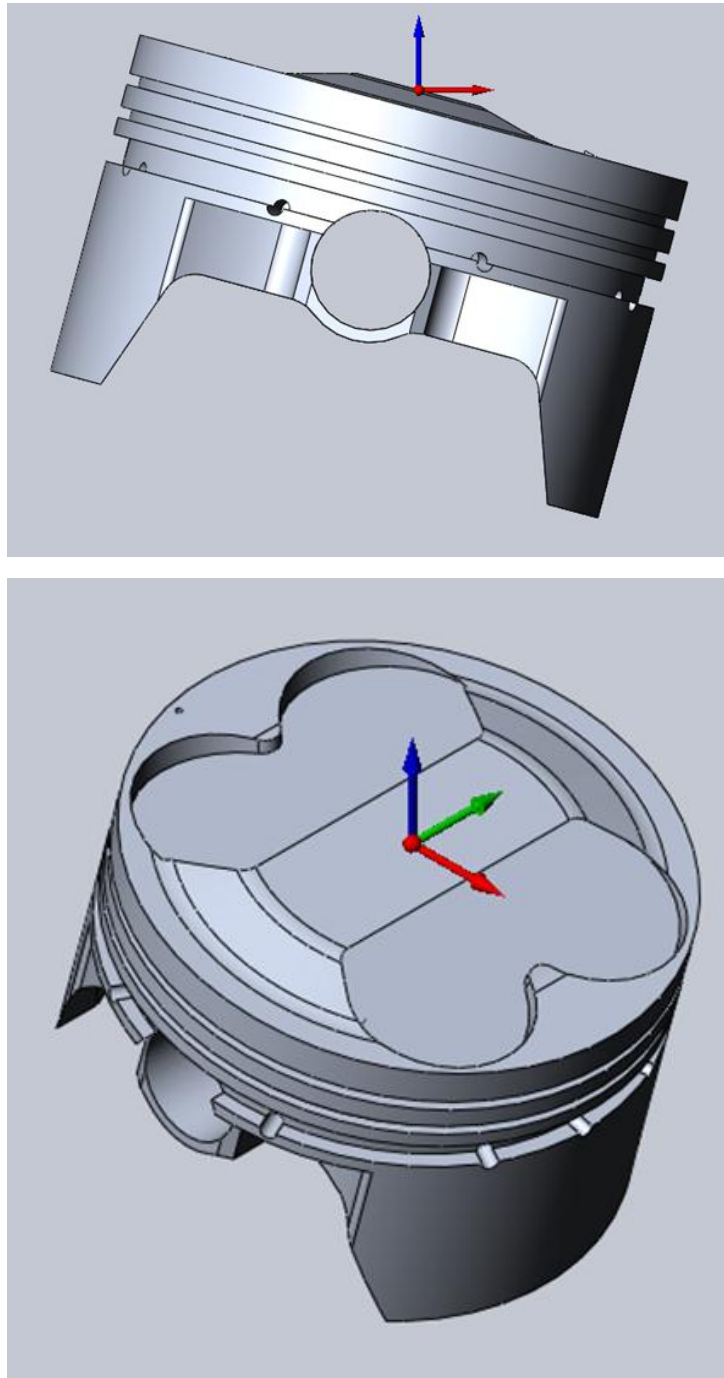
4.2.2 Προσανατολισμοί τεμαχίου



Εικόνα 4.3: Σημείο MAC 1

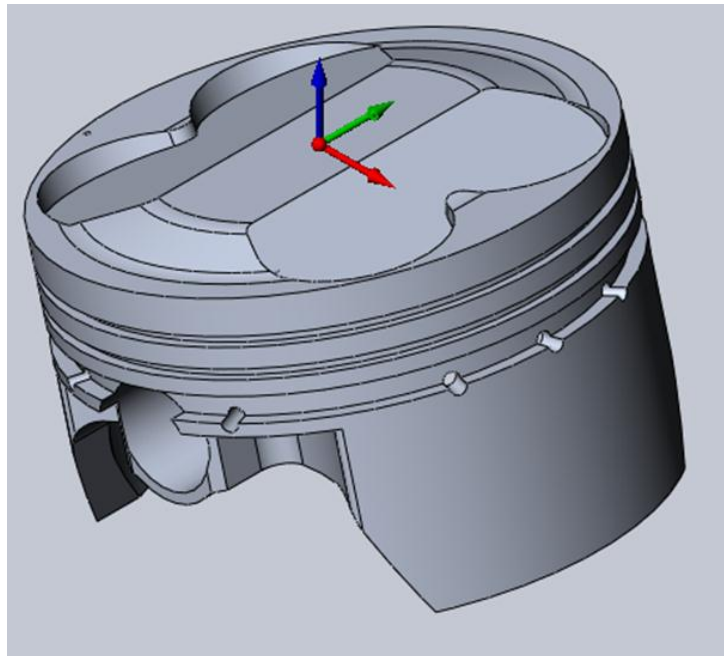
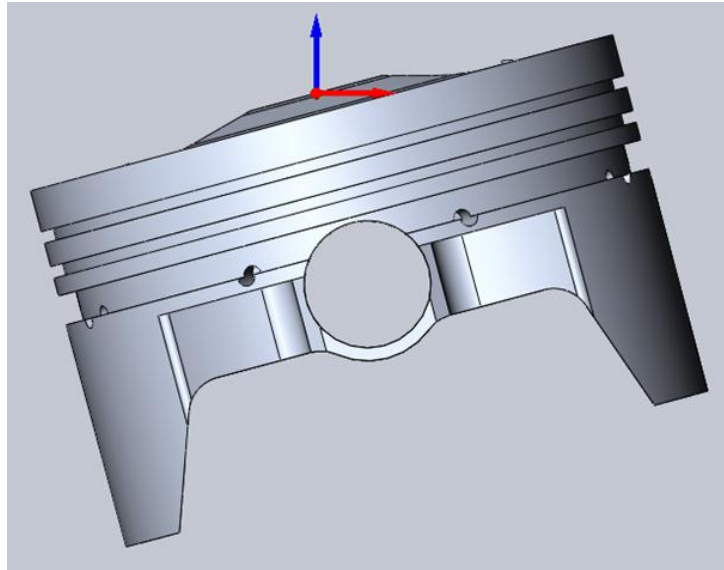
Η επιλογή του σημείου 1-1, που φαίνεται στην Εικόνα 4.3, έγινε με κριτήριο την αρχική μορφή του προς κατεργασία αντικειμένου. Επιλέχθηκε να βρίσκεται στην άνω επίπεδη πλευρά της κεφαλής του εμβόλου, και συνευθειακά με τον άξονα συμμετρίας του μοντέλου, δηλαδή στο κέντρο. Η συγκράτηση του τεμαχίου με την μέγγενη θα είναι κατά τον άξονα X (κόκκινος άξονας), δηλαδή οι σιαγώνες της μέγγενης θα είναι κάθετες στον άξονα X. Με

αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να προγραμματίζεται ξανά το σημείο W. Έτσι λοιπόν κατά την περιστροφή του τεμαχίου για να κατεργαστούμε τις ποκέτες των βαλβίδων δεν χρειάζεται να παραγγραμμάρουμε εκ νέου το σημείο W.



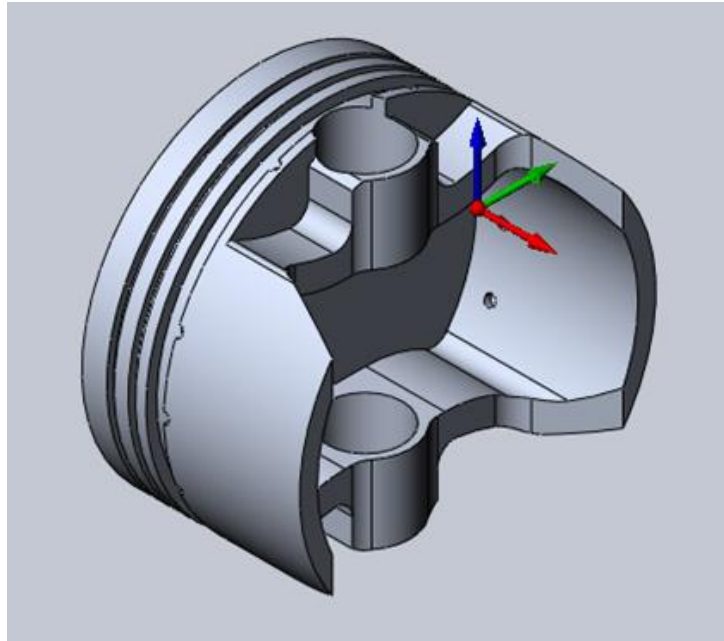
Εικόνα 4.4: Σημείο MAC 2

Αντίστοιχα και κατά την περιστροφή του τεμαχίου από την άλλη πλευρά για την κατεργασία της απέναντι ποκέτας, έχουμε:



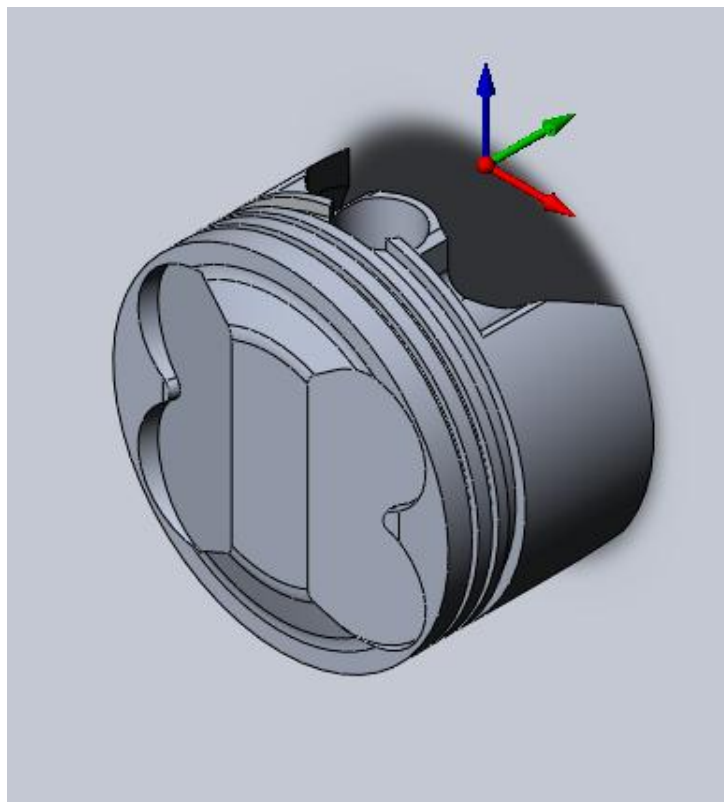
Εικόνα 4.5: Σημείο MAC 3

Για την κατεργασία της φούστας και του πείρου απαιτείται διαφορετική συγκράτηση του τεμαχίου, και ως εκ τούτου νέα σημεία W, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 4.6.



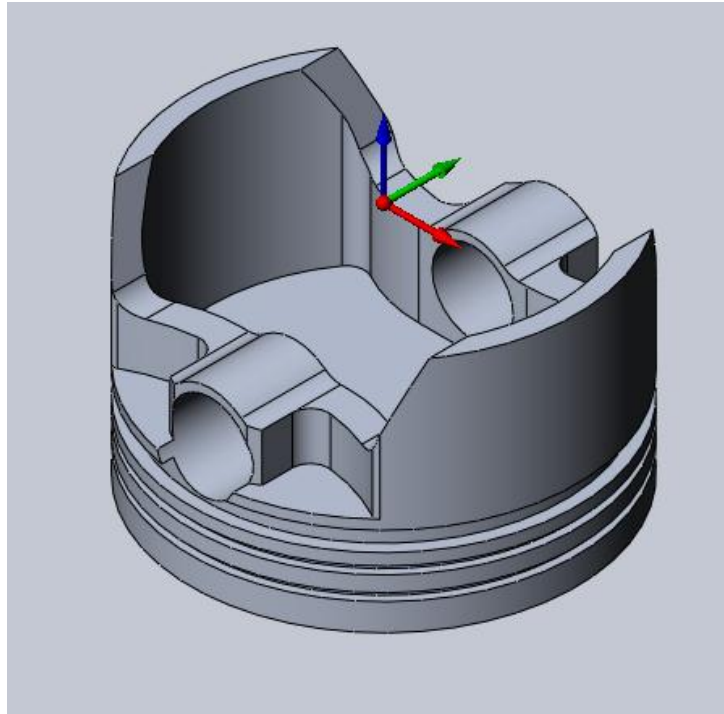
Εικόνα 4.6: Σημείο MAC 5

Αντίστοιχα και για την άλλη μεριά της φούστας και του πείρου του πιστονιού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Σημείο MAC 6

Τέλος, θα πρέπει να γίνει άλλο ένα πιάσιμο και άλλος ένας μηδενισμός του τεμαχίου για την κατεργασία του κάτω μέρους του πιστονιού, Εικόνα 4.8.

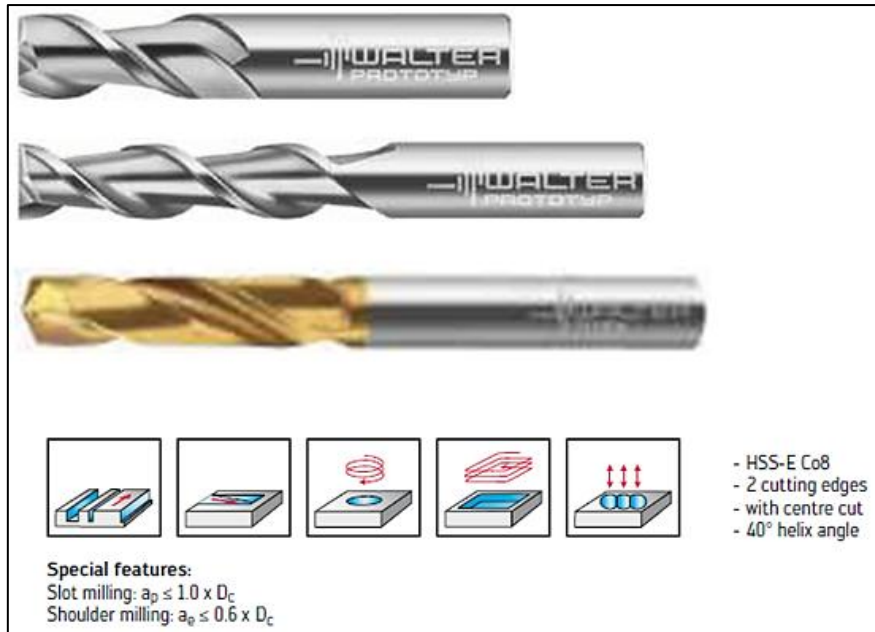


Εικόνα 4.8: Σημείο MAC 4

4.3 Επιλογή εργαλείων

Τα κοπτικά εργαλεία και οι ταχύτητες κοπής επιλέχθηκαν για αλουμίνιο σειράς 7, από τον κατάλογο της Walter (<http://www.walter-tools.com>)

Τα κονδύλια είναι της σειράς Protostar A140 ενώ το τρυπάνι είναι της σειράς Alpha 2.



Εικόνα 4.9: Τα κονδύλια και τα αντίστοιχα τρυπάνια τους

4.4 Συγκράτηση τεμαχίου πάνω στην εργαλειομηχανή

Λόγω της ιδιομορφίας του προς κατεργασία αντικειμένου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέγγενη τύπου swivel and tilting, όπου μπορεί να περιστραφεί κατά 360° (swivel) γύρω από τον άξονα της και κατά 90° (tilt) κατά τον διαμήκη άξονα της. Έτσι μας δίνει την δυνατότητα να κατεργαστούμε τις ποκέτες των βαλβίδων με ένα set up, όπου μετά την ολοκλήρωση της ποκέτας για τις βαλβίδες εισαγωγής μπορούμε να κατεργαστούμε τις ποκέτες για τις βαλβίδες εξαγωγής, περιστρέφοντας την μέγγενη κατά 180° .



Εικόνα 4.10: Μέγγενη τύπου swivel and tilt

Λόγω του ότι μια μέγγενη μπορεί να ασκήσει δύναμη σφιξίματος πάνω στο τεμάχιο μέχρι 225kg (~ 500lbs) θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν καβαλέτα τύπου V ώστε να αυξήσουμε τα σημεία επαφής από 2- σιαγόνες της μέγγενης- σε 4 με τα καβαλέτα. Έτσι αποφεύγουμε μόνιμες παραμορφώσεις στο τελικό μας δοκίμιο που θα το κάνουν να χάσει την κυλινδρική του.



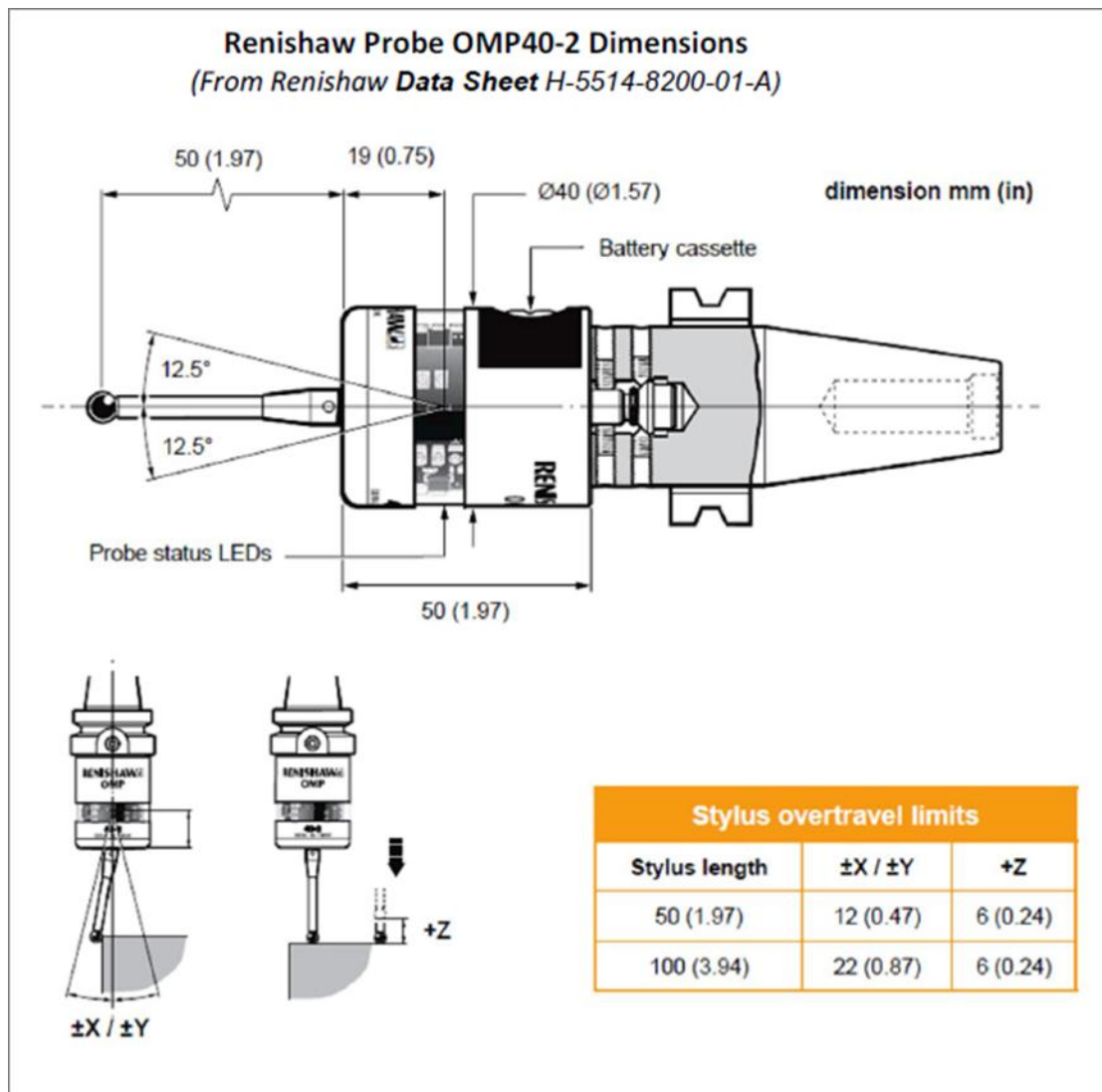
Εικόνα 4.11: Χρησιμοποίηση καβαλέτων V για υποστήριξη κυλινδρικού τεμαχίου

Βέβαια υπάρχει και η επιλογή ενός τραπέζιου ψηφιακής καθοδήγησης (NC tilting rotary table), το οποίο προσθέτει άλλους δύο άξονες (A και B) στη μηχανή και στην ουσία τη μετατρέπει σε 5-άξονική μηχανή.



Εικόνα 4.12: NC tilting rotary table

4.5 Μηδενισμός αρχικού τεμαχίου πάνω στην εργαλειομηχανή




Εικόνα 4.13: Ο ανιχνευτής OMP

Ο ανιχνευτής OMP είναι ένας 3D ανιχνευτής αφής -ελέγχου και τοποθετείται σε έναν εργαλειοδέτη. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μηδενικού σημείου του τεμαχίου καθώς και την διαστασιολογική επιθεώρηση των μερών σε ένα κέντρο κατεργασίας (ο συγκεκριμένος, Renishaw Probe OMP40-2, είναι για εργαλειομηχανή HAAS). Μπορεί να αντιληφθεί αλλαγή του αισθητήριου του σε 5 διαφορετικές κατευθύνσεις + /-X, + /-Y και +Z. Λόγω των ευαίσθητων ηλεκτρονικών ειδών, χαρακτηρίζεται ως βαρύ εργαλείο στην αντίστοιχη σελίδα επιλογής εργαλείων της εργαλειομηχανής.

<< TOOL OFFSET		TOOL INFO		PROBING
IPS ON		ACTUAL	TOOL	
TOOL	FLUTES	DIAMETER	TYPE	
1 SPINDLE	5	0.	0-NONE	
2	2	0.	1-DRILL	
3	2	0.	2-TAP	
4	2	0.	1-DRILL	
5	2	0.	2-TAP	
6	2	0.	4-END MILL	
7	2	0.	0-NONE	
8	2	0.	0-NONE	
9	2	0.	0-NONE	


0-NONE 1-DRILL 2-TAP 3-SHELL MILL 4-END MILL 5-SPOT DRILL 6-BALL NOSE 7-PROBE

DRILL




1

TAP




2

SHELL MILL




3

END MILL




4

CENTER DRILL




5

BALL NOSE



6

PROBE



7

Εικόνα 4.14: Σελίδα επιλογής εργαλείων σε εργαλειομηχανή HAAS

Το OMP λειτουργεί τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση αναμονής της μηχανής. Ενεργοποιείται από ένα διακόπτη ON. Αφού τελειώσουμε με τις εργασίες μας με το συγκεκριμένο αισθητήρα, πατώντας το πλήκτρο RESET, ολοκληρώνουμε τη συγκεκριμένη ρουτίνα.

Ένας άλλος τρόπος μηδενισμού του τεμαχίου πάνω στην εργαλειομηχανή είναι με χειροκίνητη κίνηση της ατράκτου πάνω στο τεμάχιο και κατόπιν μηδενισμός των συντεταγμένων από το χειριστήριο της εργαλειομηχανής.

Για να οριστεί η θέση μηδέν στον άξονα Z (ή tool-length offsets), κατεβάζουμε τον εργαλειοδέτη χειροκίνητα από το χειριστήριο της μηχανής προς την άνω επιφάνεια του τεμαχίου. Όταν πλησιάσει αρκετά το εργαλείο στο τεμάχιο,

τοποθετούμε μια σελίδα από χαρτί ανάμεσα στην ακμή του εργαλείου και την άνω επιφάνεια του τεμαχίου.



Εικόνα 4.15: Ορισμός 0 στον άξονα Z

Με μικρή ταχύτητα πρόωσης συνεχίζουμε να κατεβάζουμε τον εργαλειοδέτη και ταυτόχρονα κινούμε το φύλλο του χαρτιού μπρος-πίσω. Όταν αρχίσουμε να νιώθουμε αντίσταση στην φορά που τραβάμε το χαρτί, τότε πατάμε το πλήκτρο OFFSET της μηχανής, και έπειτα μετακινούμαστε στην οθόνη CLNT (LENGTH) (RADIUS) της εργαλειομηχανής. Στη στήλη GEOMETRY επιλέγουμε το εργαλείο που χρησιμοποιούμε και πατάμε το πλήκτρο TOOL OFFSET MEASURE. Με αυτή μας την ενέργεια έχουμε πάρει την απόλυτη θέση της μηχανής για τον άξονα Z.

Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται και ο μηδενισμός του τεμαχίου στις άλλες δύο διευθύνσεις X και Y. Στην οθόνη WORK ZERO OFFSET της εργαλειομηχανής, επιλέγουμε το PART ZERO SET για τον κάθε άξονα.



Εικόνα 4.16: Ορισμός 0 σε άξονα X και Y

4.6 Επιλογή συστήματος συγκράτησης εργαλείου – εργαλειοδέτη (κόνος)

Η μεγάλη πρόοδος των εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση έχει αναγκάσει τους κατασκευαστές κοπτικών εργαλείων σε ένα διαρκή αγώνα βελτίωσης των υλικών κοπής. Τα σύγχρονα κοπτικά εργαλεία κατασκευάζονται από σκληρομέταλλα, κεραμικά, στελλίτες, διαμάντι και κυβικά βοριονιτρίδια,, ενώ η χρήση ταχυχάλυβα έχει περιοριστεί σε λίγες εφαρμογές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα κοπτικά εργαλεία επικαλύπτονται με λεπτές επιφανειακές στιβάδες που ονομάζονται επικαλύψεις, οι οποίες προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε φθορά. Εκτός των υλικών, στη φάση σχεδιασμού των κοπτικών εργαλείων δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη γεωμετρία της κοπτικής ακμής, αφού αυτή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τεχνολογία της κοπής. Τα κοπτικά αυτά εργαλεία συγκρατούνται πάνω στις εργαλειομηχανές με χρήση των εργαλειοθηκών. Οι διαστάσεις και το είδος των κώνων είναι τυποποιημένες.

Η επιλογή του κατάλληλου εργαλειοδέτη για τη δουλειά είναι εξίσου σημαντική με την επιλογή του σωστού εργαλείου για τη δουλειά. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται πάντα όσο το δυνατόν κοντός εργαλειοδέτης για όλες τις εφαρμογές κατεργασίας. Επιπλέον, το εργαλείο θα πρέπει να συγκρατηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κοπτικό του μέρος. Αυτό θα αυξήσει τη συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέτη, με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των κραδασμών-δονήσεων.



Εικόνα 4.17: Τυπικοί εργαλειοδέτες

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση από τη μύτη του εργαλειοδέτη ως την άκρη του εργαλείου, τόσο πιο άκαμπτο θα είναι το σύνολο ατράκτου-εργαλείου. Η αυξημένη ακαμψία οδηγεί σε λιγότερους κραδασμούς κατά την κοπή.

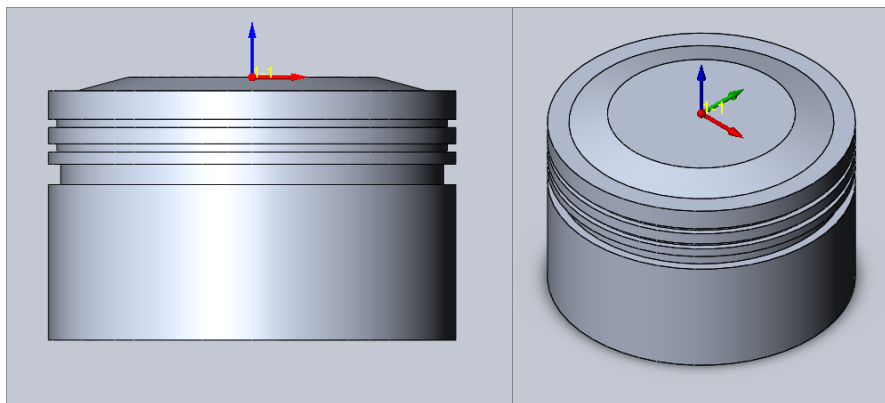
4.7 Φασεολόγια κοπής

Τα κονδύλια έχουν επιλεγεί από τους πίνακες που φαίνονται σε κάθε κατεργασία.

Οι στροφές κατεργασίας και η πρόωση ανά δόντι, επιλέχθηκαν από τους Πίνακες του Παραρτήματος Α, σύμφωνα με το λόγο a_e/D_c (όπου a_e είναι το πλάτος κοπής και υπολογίζεται με το τύπο $a_e \leq 0.6 \times D_c$), και D_c η διάμετρος του κοπτικού. Δηλαδή σύμφωνα με την τιμή του λόγου αυτού και την κατηγορία του μετάλλου που χρησιμοποιούμε, επιλέγουμε την ταχύτητα κοπής v_c [m/min]. Η ταχύτητα αυτή είναι η μέγιστη προτεινόμενη από τον κατασκευαστή. Στη συνέχεια ο πίνακας αυτός μας παραπέμπει στον πίνακα ομάδων υλικών του Παραρτήματος Α, όπου σύμφωνα με το a_e (πλάτος κοπής) και τη διάμετρο του κονδυλίου, επιλέγουμε την πρόωση ανά δόντι [mm/δόντι].

4.7.1 Κατεργασία Ποκέτας βαλβίδων

4.7.1.1 Ορισμός σημείου 0



Εικόνα 4.18: Ορισμός σημείου 0

Για να ορίσουμε το σημείο μηδέν του κομματιού, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, πηγαίνουμε χειροκίνητα από το χειριστήριο της μηχανής τον αισθητήρα μας ή το εργαλείο μας στην περιφέρεια του αρχικού μας τεμαχίου. Εφαπτομενικά στην εξωτερική διάμετρο μηδενίζουμε κατά τον άξονα X (κόκκινος άξονας) Έπειτα μετακινούμε το εργαλείο μας ή τον αισθητήρα στον άξονα Y (πράσινος άξονας), προσεγγίζουμε περιφερειακά την εξωτερική διάμετρο του πιστονιού και μηδενίζουμε. Σε περίπτωση που δεν διαθέτουμε

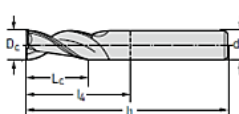
αισθητήρα και μηδενίζουμε με εργαλείο, τότε κατά την εισαγωγή του σημείου 0 στην εργαλειομηχανή θα πρέπει να αφαιρέσουμε την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου, ενώ στη περίπτωση που διαθέτουμε αισθητήρα, δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια ενέργεια. Τέλος για να μηδενίσουμε τον άξονα Z σε αυτό το setup, φέρουμε το εργαλείο και το ακουμπάμε στην άνω επίπεδη επιφάνεια του κυλίνδρου και ορίζουμε το tool offset.

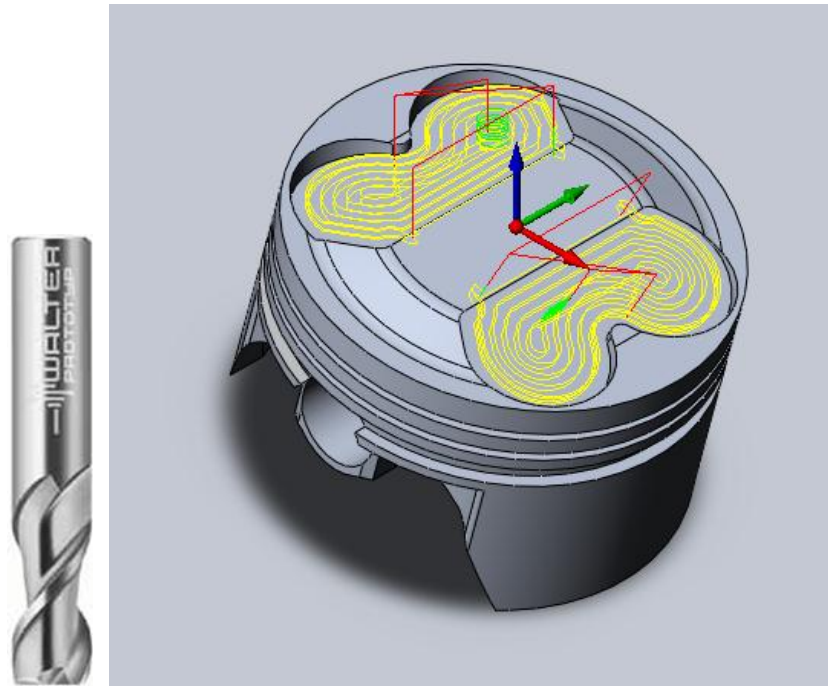
4.7.1.2 Επιλογή εργαλείων και συνθηκών εργασίας

Η επιλογή του κονδυλίου και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=6$ mm
- Εκχόνδριση: $V=110$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/tooth
- Φινίρισμα: $V=110$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/tooth
- Τεχνολογία περιγράμματος
- Μείωση βήματος: 40% της D_c

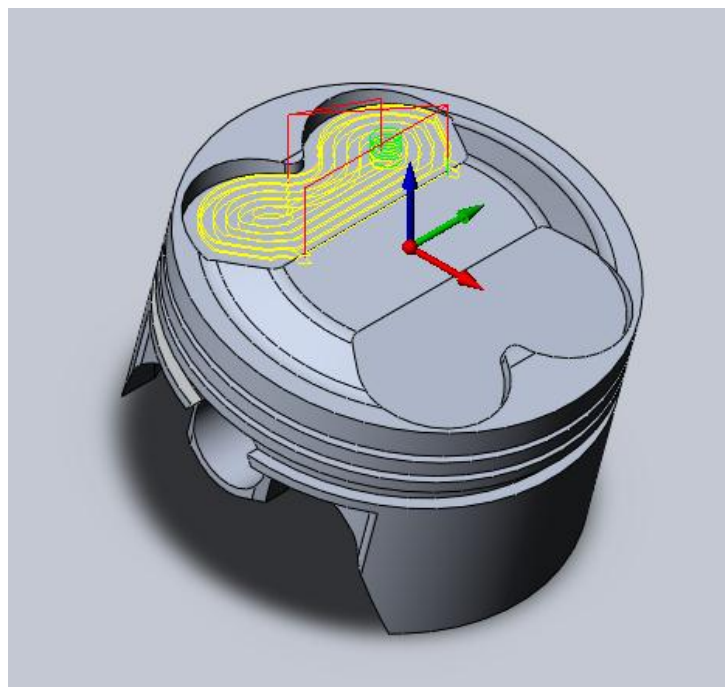
Πίνακας 4.1: Πίνακας επιλογής κονδυλίων των βαλβίδων

DIN 844 A	D_c e8 mm	L_c mm	l_1 mm	l_4 mm	d_1 h6 mm	Z	uncoated designation P602602	P	M	K	N	S	H	O	
								uncoated	●		●●				
Shank DIN 1835 A	2	7	51	15	6	2	-2								
	3	8	52	16	6	2	-3								
	4	11	55	19	6	2	-4								
	5	13	57	21	6	2	-5								
	6	13	57	21	6	2	-6								
	7	16	66	26	10	2	-7								
	8	19	69	29	10	2	-8								
	9	19	69	29	10	2	-9								
	10	22	72	32	10	2	-10								

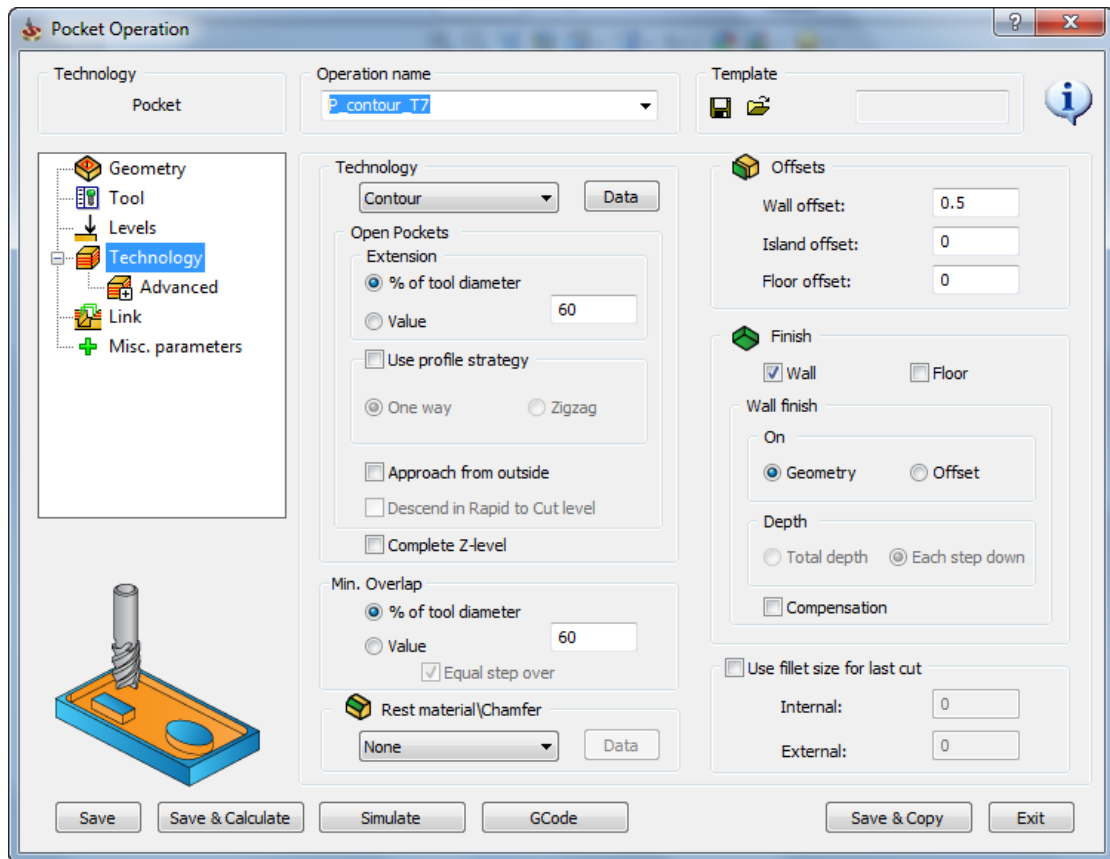


Εικόνα 4.19: Απεικόνιση της κατεργασίας ποκέτας των βαλβίδων με κονδύλι διαμέτρου 10 mm

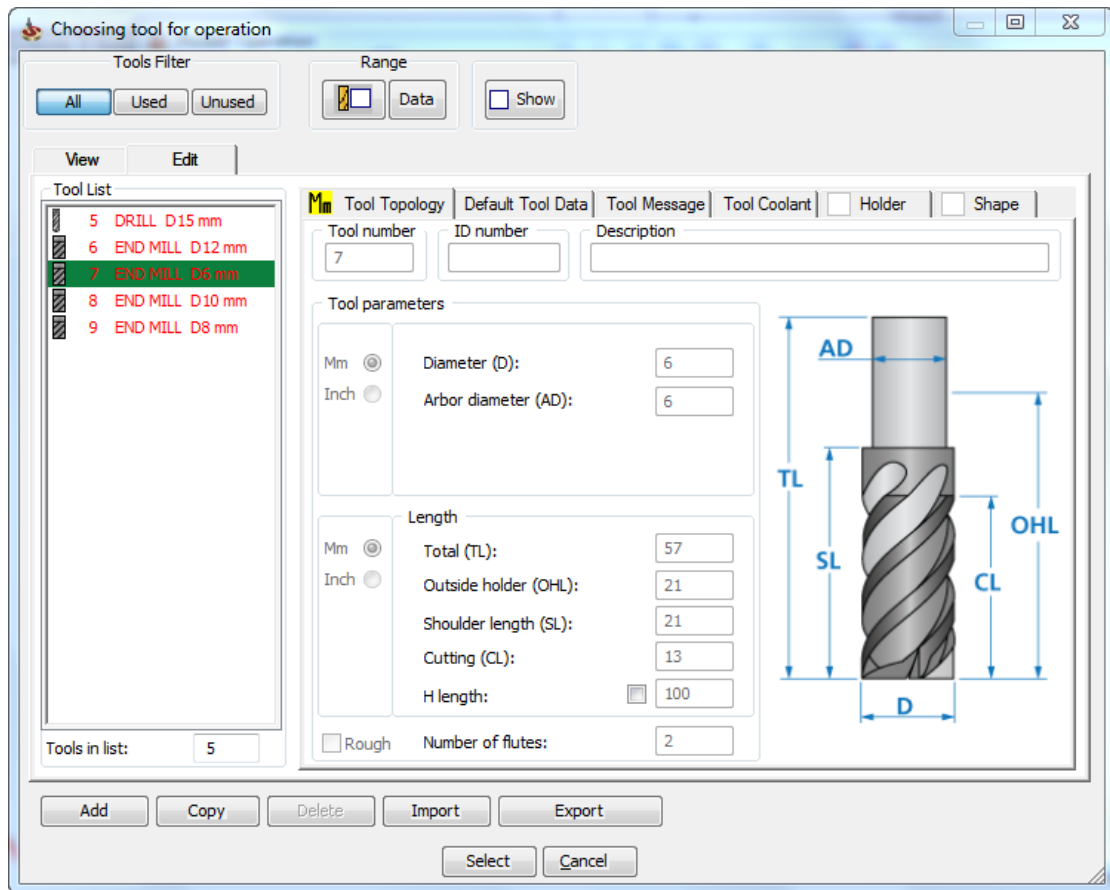
Οι κατεργασίες των βαλβίδων θα γίνουν σε δύο φάσεις. Το αντικείμενο θα περιστραφεί κατά $+15^\circ$ (χρησιμοποιώντας την μέγγενη τύπου swivel and tilt) κατά των άξονα Y και θα γίνει η κατεργασία της ποκέτας βαλβίδων εισαγωγής.



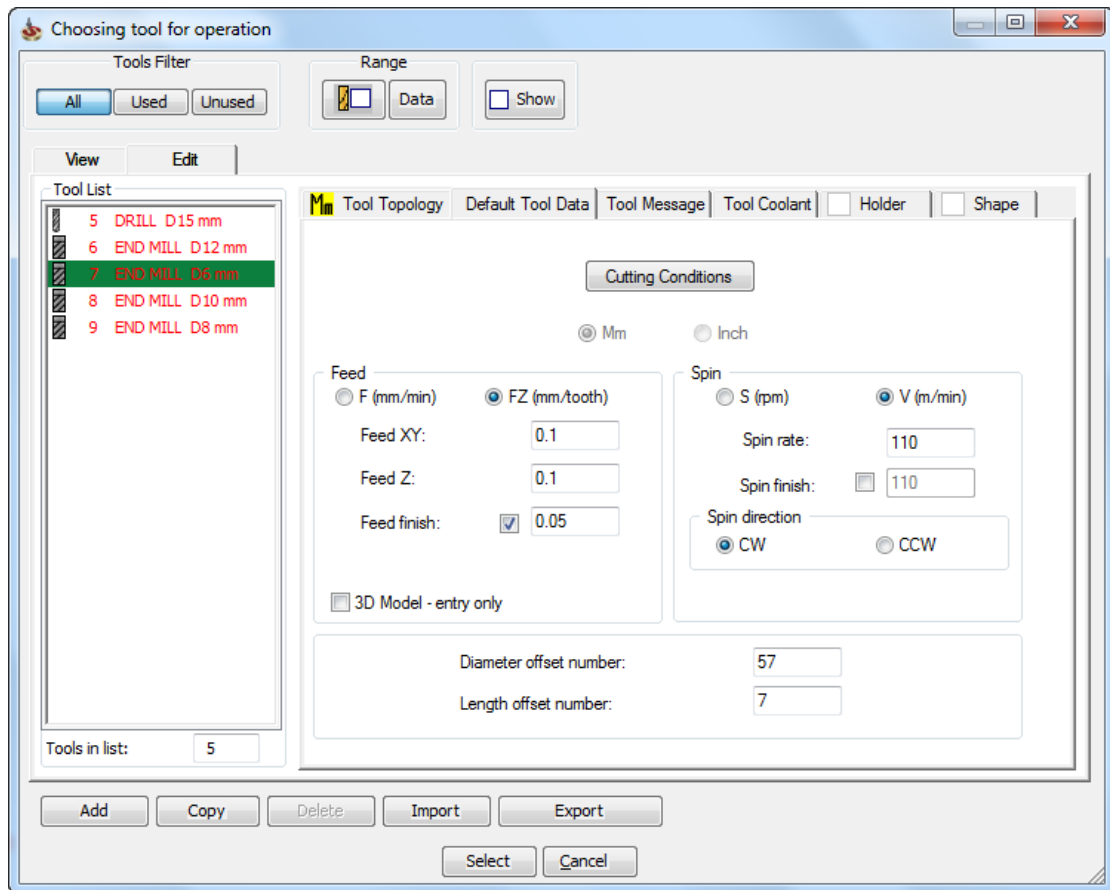
Εικόνα 4.20: Απεικόνιση τροχιάς κοπτικού εργαλείου στη ποκέτα βαλβίδων εισαγωγής



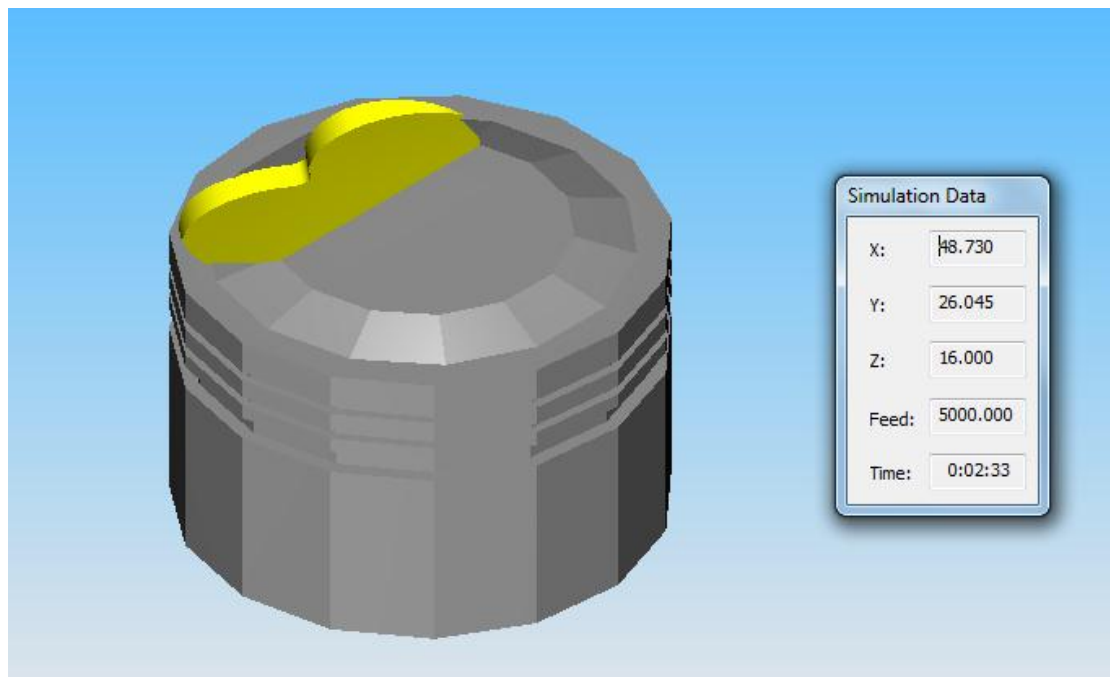
Εικόνα 4.21: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας για την ποκέτα βαλβίδων εισαγωγής



Εικόνα 4.22: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία

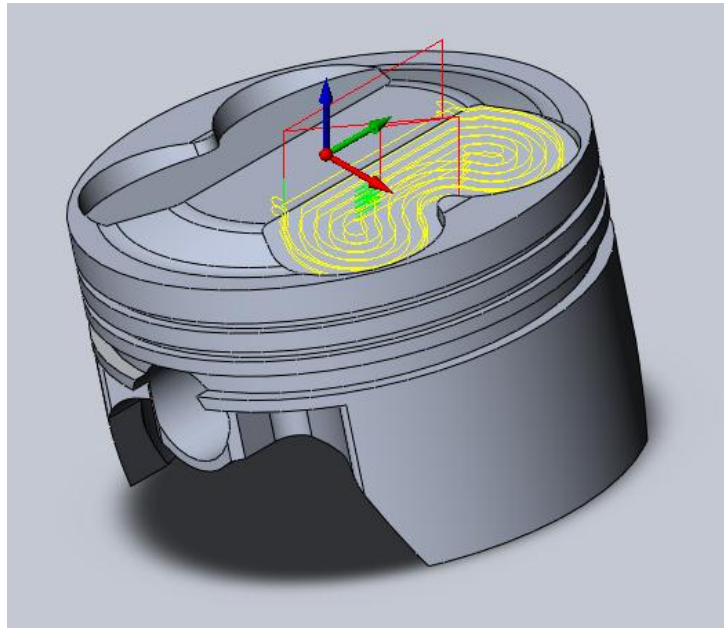


Εικόνα 4.23: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής

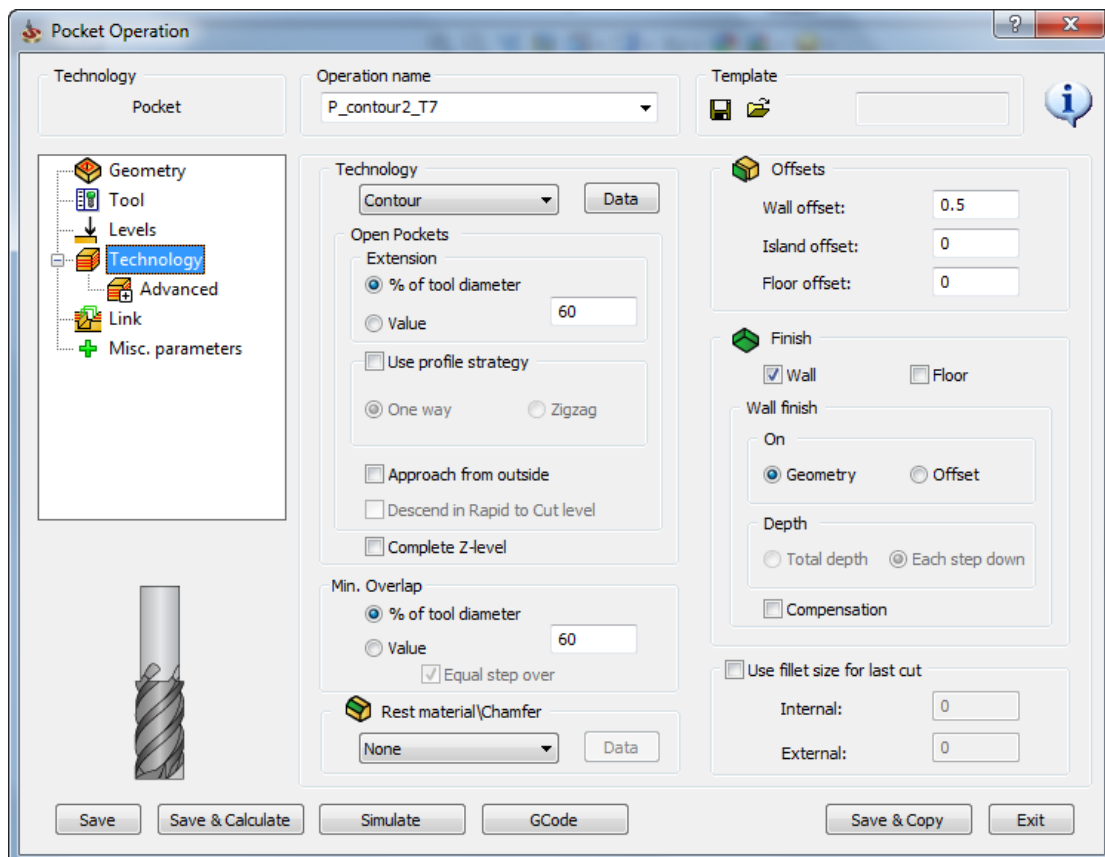


Εικόνα 4.24: Αποτέλεσμα κατεργασίας

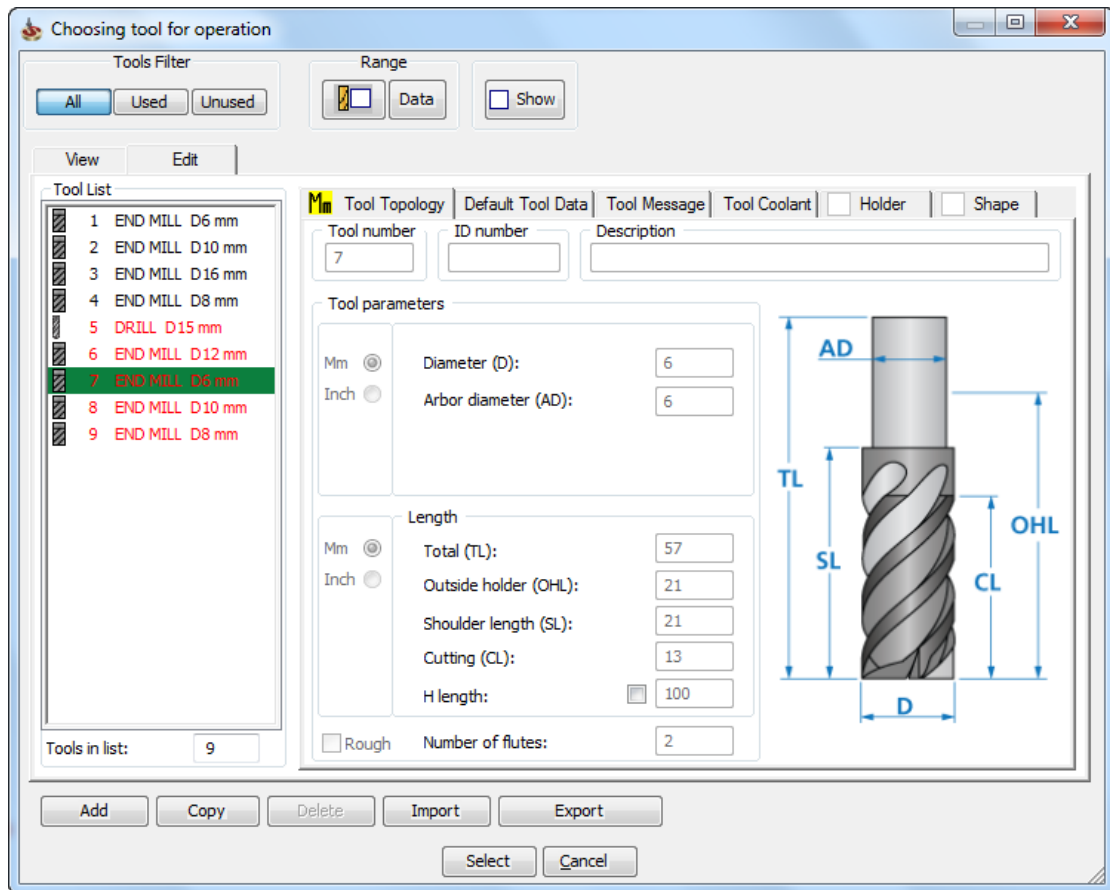
Έπειτα το τεμάχιο θα περιστραφεί στις -15° (χρησιμοποιώντας την μέγγενη τύπου swivel and tilt) και θα γίνει η κατεργασία της ποκέτας βαλβίδων εξαγωγής.



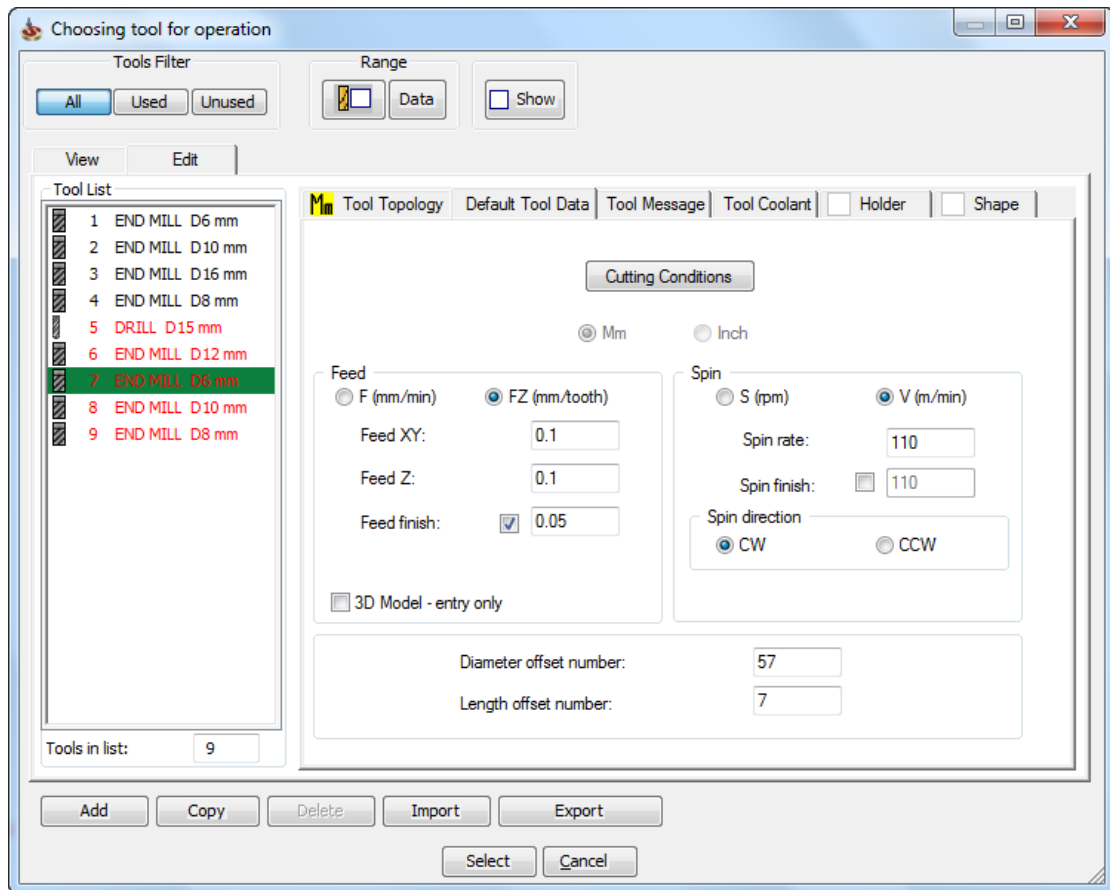
Εικόνα 4.25: Απεικόνιση τροχιάς κοπτικού εργαλείου στη ποκέτα βαλβίδων εξαγωγής



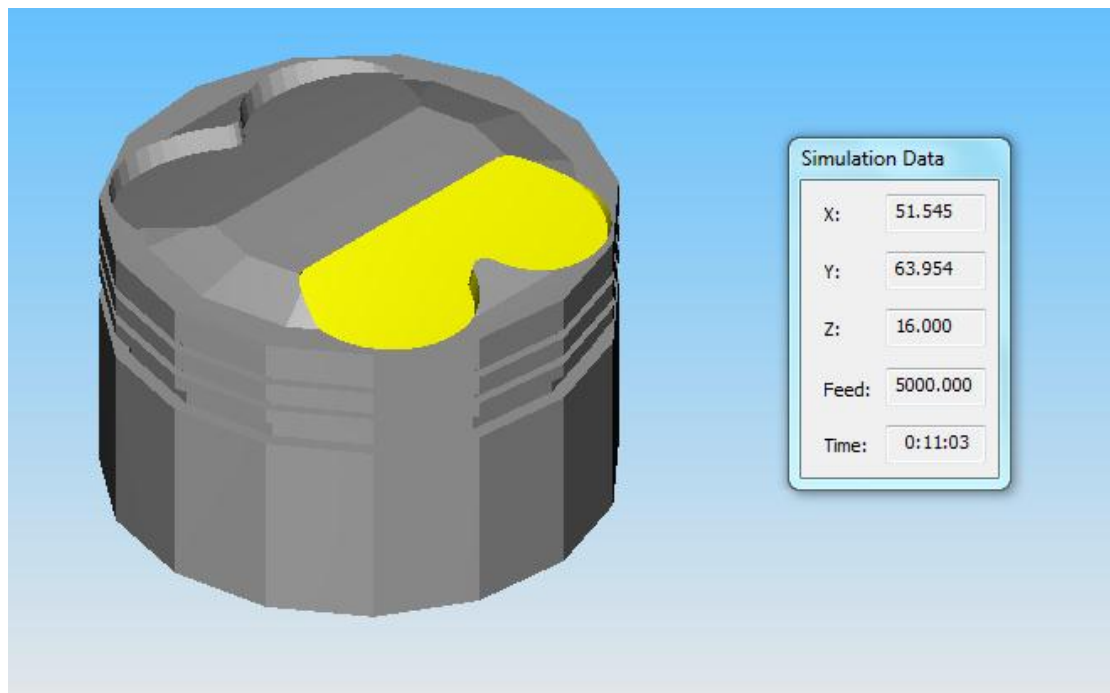
Εικόνα 4.26: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας για την ποκέτα βαλβίδων εξαγωγής



Εικόνα 4.27: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



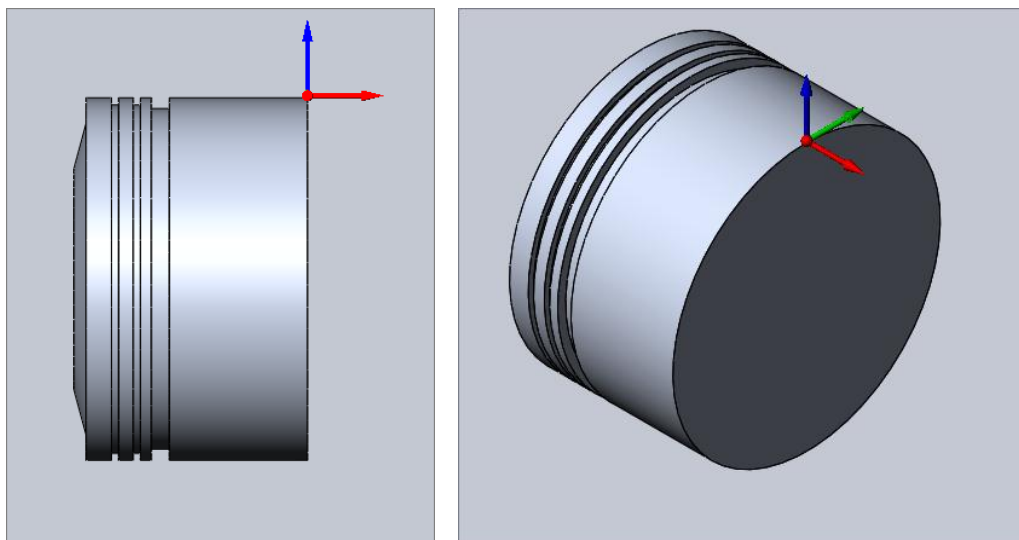
Εικόνα 4.28: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.29: Αποτέλεσμα κατεργασίας

4.7.2 Κατεργασία της “φούστας” του πιστονιού και οπής πείρου από αριστερά

4.7.2.1 Ορισμός σημείου 0 από αριστερά



Εικόνα 4.30: Ορισμός σημείου 0

Σε αυτό το setup ο ορισμός του σημείου μηδέν που φαίνεται παραπάνω θα γίνει ακουμπώντας περιφερειακά και εφαπτομενικά το εργαλείο κατά τον άξονα Y (πράσινος άξονας), στην περιφέρεια του κυλίνδρου, και ορίζοντας το 0 στον άξονα Y. Έπειτα μετακινώ το εργαλείο κατά τον άξονα X (κόκκινος άξονας) στο κάτω μέρος του πιστονιού (επίπεδη επιφάνεια) και ορίζω εκεί τον άξονα X. Τέλος για να μηδενίσω τον άξονα Z, ακουμπώ το εργαλείο κατά τον άξονα Z στην άνω περιφέρεια του κυλίνδρου.

4.7.2.2 Επιλογή εργαλείων και συνθηκών εργασίας από αριστερά

Η επιλογή του κονδυλίου και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:

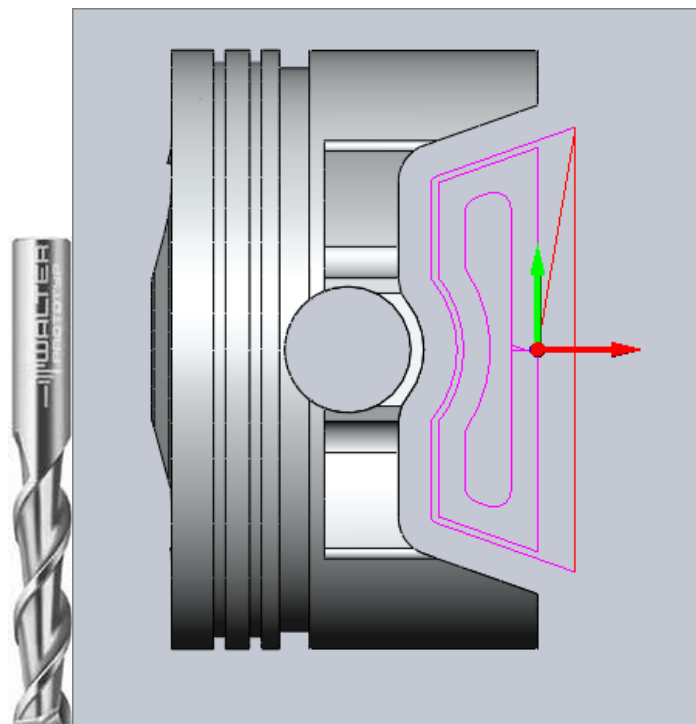
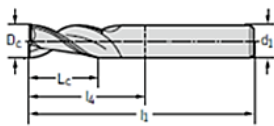
- Διάμετρος κονδυλίου: $D_c=10\text{mm}$
- Εκχόνδριση: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,18\text{ mm/δόντι}$
- Φινίρισμα: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,09\text{ mm/δόντι}$
- Τεχνολογία περιγράμματος

- Μείωση βήματος: 40% της D_c

Πίνακας 4.2: Πίνακας επιλογής κονδυλίου καταργασίας της «φούστας» του πιστονιού

		P	M	K	N	S	H	O
uncoated		●			●●			

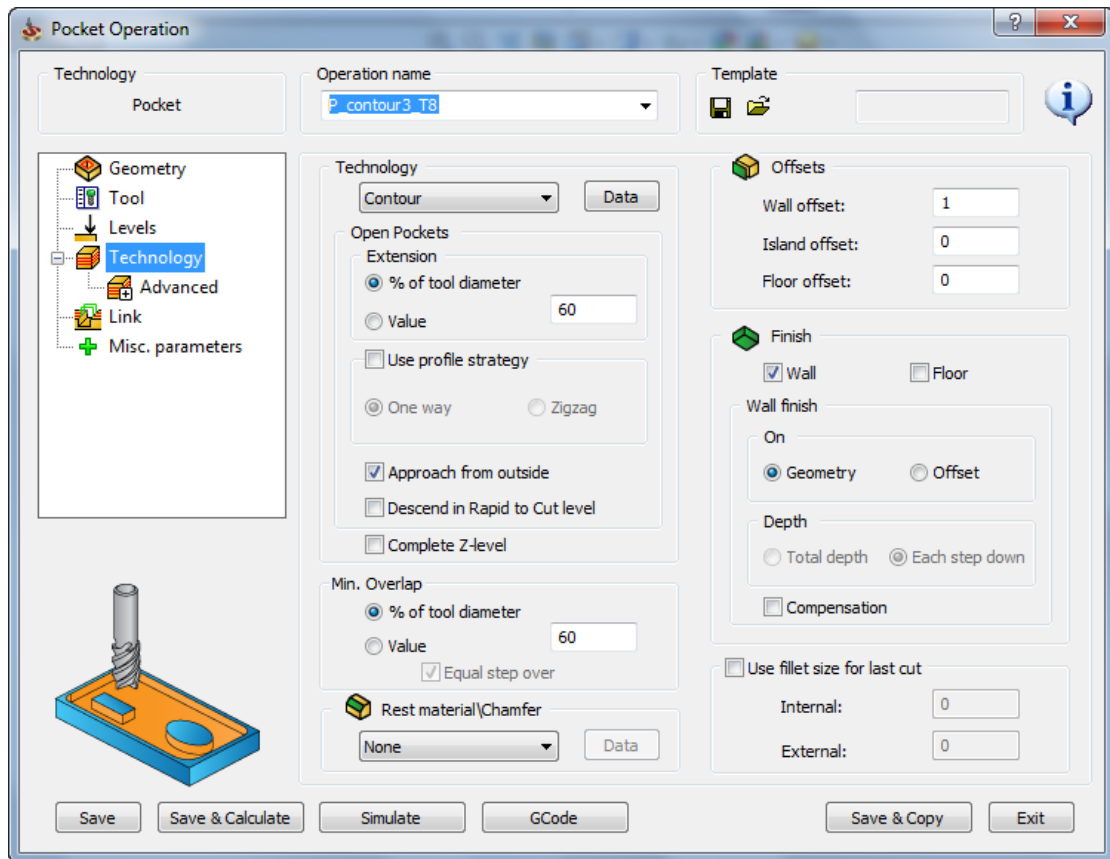
DIN 844 A	D_c e8 mm	L_c mm	l_1 mm	l_2 mm	d_1 h6 mm	Z	uncoated designation P602612
Shank DIN 1835 A	6	24	68	32	6	2	-6
	8	38	88	48	10	2	-8
	10	45	95	55	10	2	-10
	12	53	110	65	12	2	-12
	14	53	110	65	12	2	-14
	16	63	123	75	16	2	-16
	18	63	123	75	16	2	-18
	20	75	141	91	20	2	-20



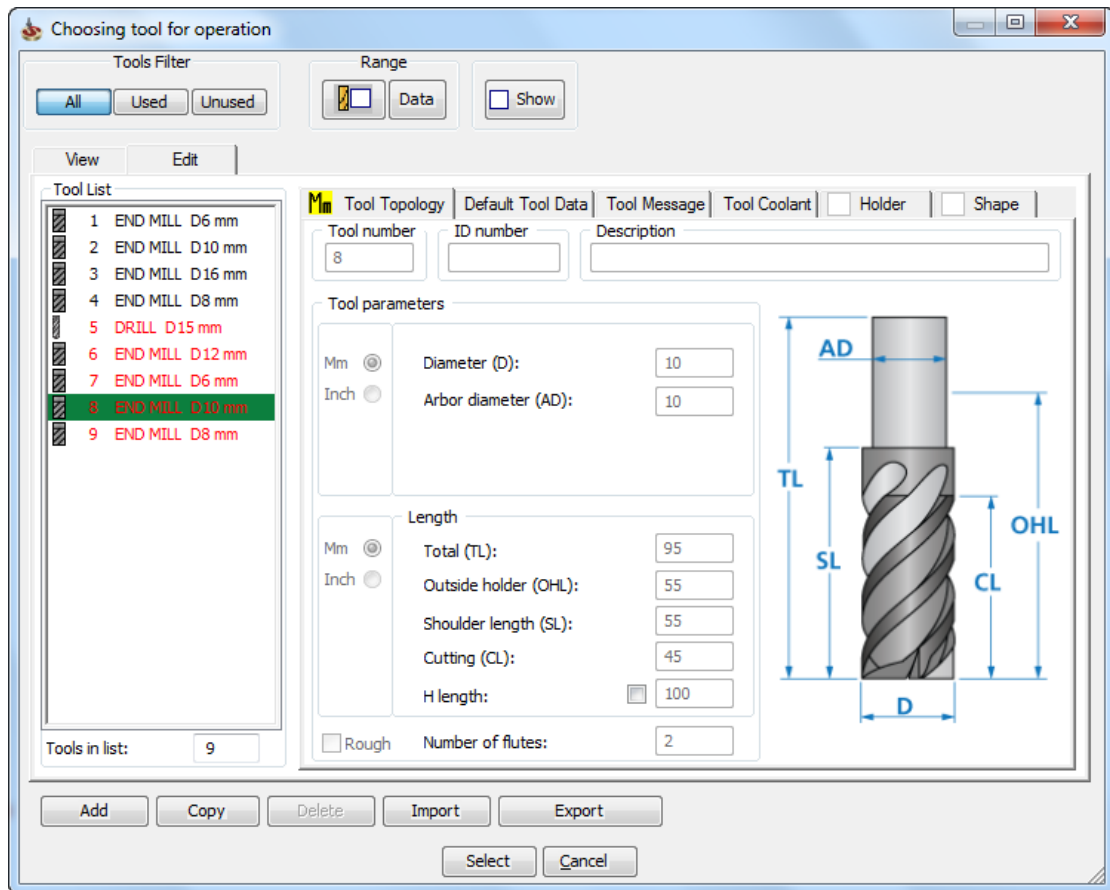
Εικόνα 4.31: Απεικόνιση της καταργασίας της «φούστας» του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 12 mm

Στην καταργασία της οπής του πείρου χρησιμοποιήθηκαν δύο τρυπάνια για εξοικονόμηση χρόνου.

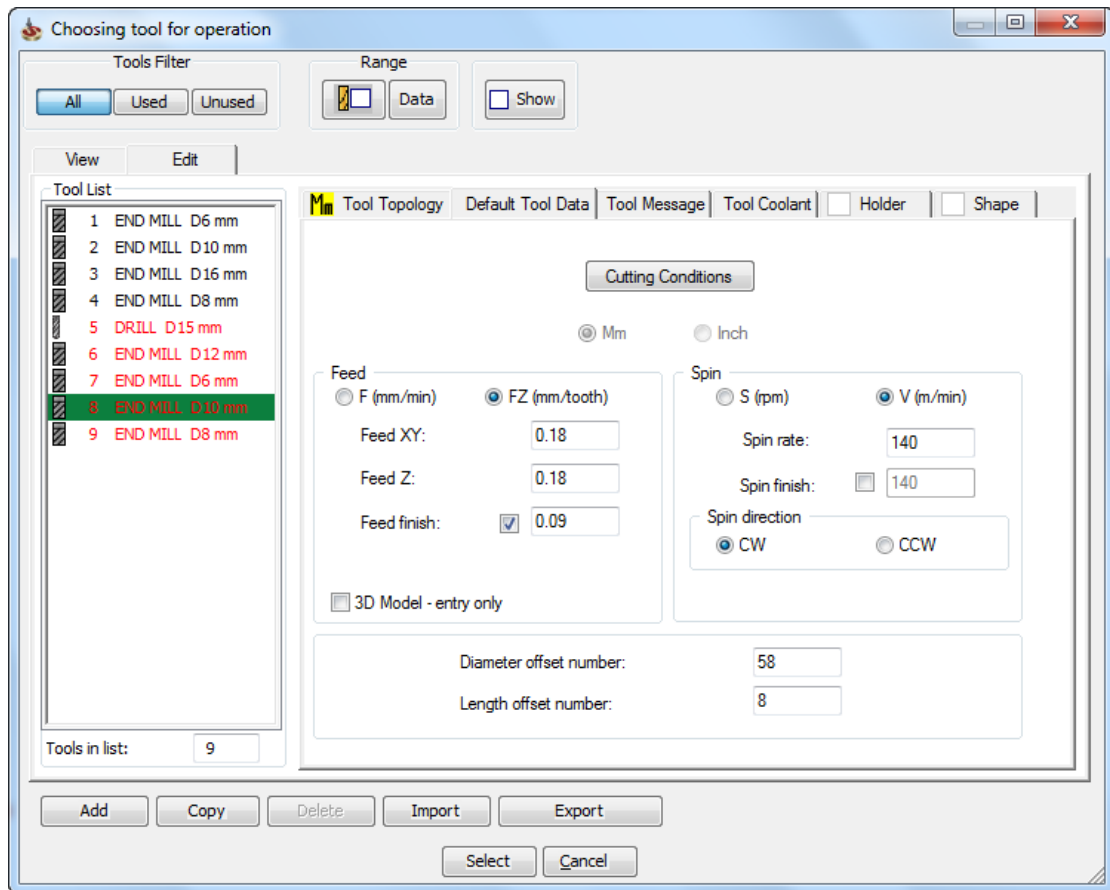
Η επιλογή των κονδυλίων και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:



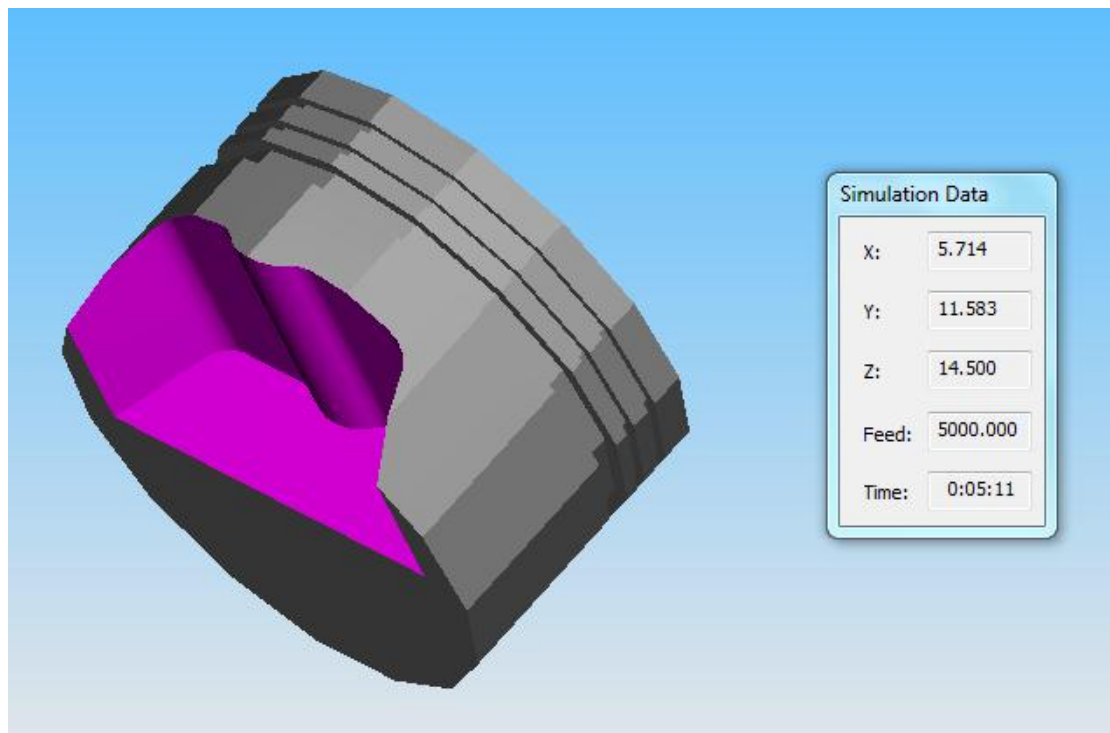
Εικόνα 4.32: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας της οπής του πείρου



Εικόνα 4.33: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



Εικόνα 4.34: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.35: Αποτέλεσμα κατεργασίας

Κατεργασία διάτρησης

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=15\text{mm}$
- $S=1000\text{ rpm}$, $f_z = 33\text{ mm/min}$

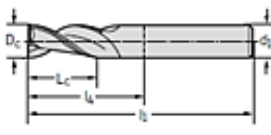
Τελική κατεργασία

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=12\text{mm}$
- **Εκγόνδριση:** $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,2\text{ mm/tooth}$
- **Φινίρισμα:** $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,1\text{ mm/tooth}$
- Τεχνολογία περιγράμματος
- Μείωση βήματος: 40% της D_c

Πίνακας 4.3: Πίνακας επιλογής κονδυλίων κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού

		P	M	K	N	S	H	O
uncoated		●			●●			

DIN 844 A	D_c e8 mm	L_c mm	l_1 mm	l_4 mm	d_1 h6 mm	Z	uncoated designation P602612
Shank DIN 1835 A	6	24	68	32	6	2	-6
	8	38	88	48	10	2	-8
	10	45	95	55	10	2	-10
	12	53	110	65	12	2	-12
	14	53	110	65	12	2	-14
	16	63	123	75	16	2	-16
	18	63	123	75	16	2	-18
	20	75	141	91	20	2	-20

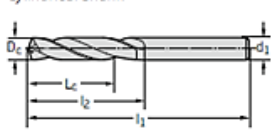


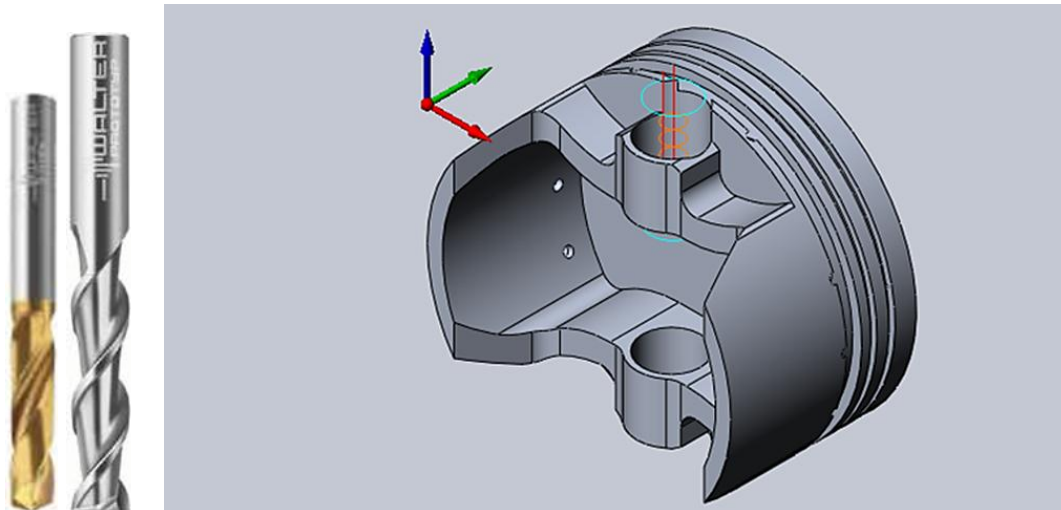
Πίνακας 4.4: Πίνακας επιλογής συνθηκών αποπεράτωσης της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού

$3 \times D_c$

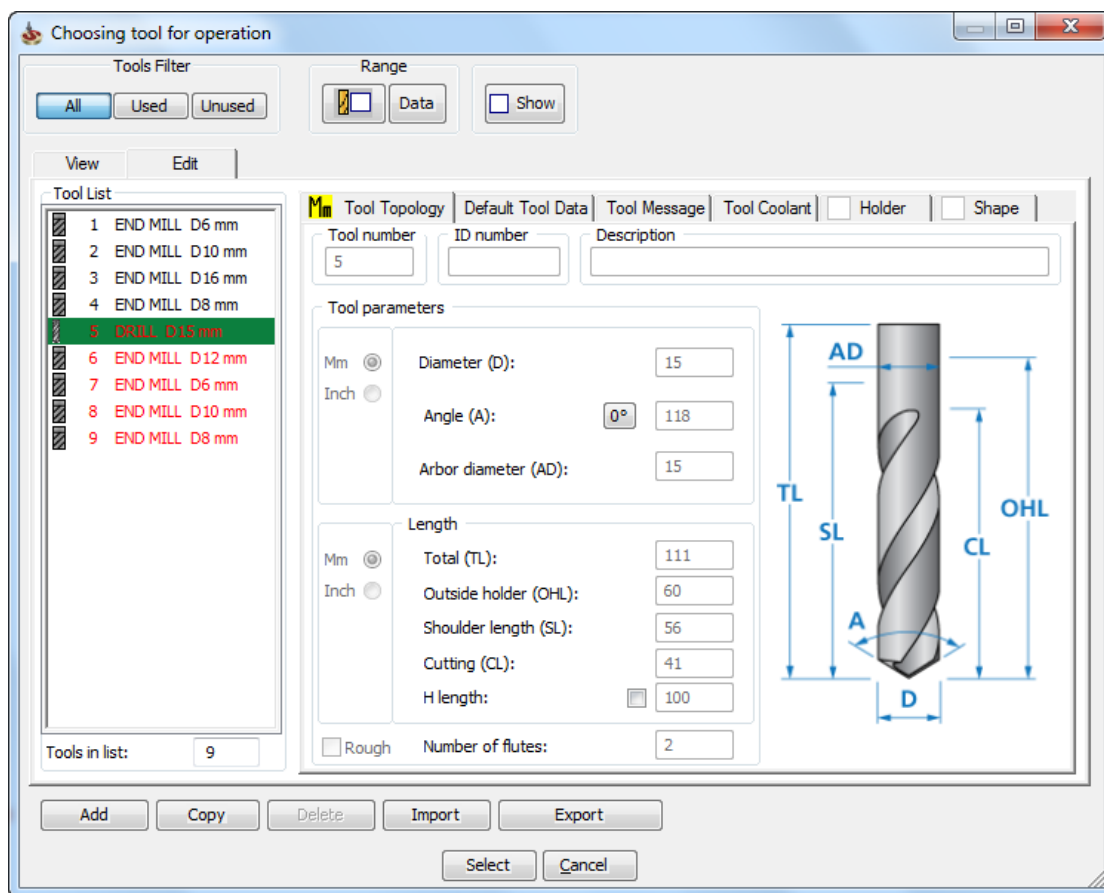
		P	M	K	N	S	H	O
Continued		●●	●●	●●	●●	●●	●	●●

		TiN						
DIN 6539	D_c h7 mm	D_c Inches/No	d_1 h6 mm	L_c mm	l_1 mm	l_2 mm	Designation A1164TiN	
Cylindrical shank	13.3		13.3	40	107	54	-13.3	
	13.4		13.4	40	107	54	-13.4	
	13.494	17/32"	13.494	40	107	54	-17/32IN	
	13.5		13.5	40	107	54	-13.5	
	13.6		13.6	40	107	54	-13.6	
	13.7		13.7	40	107	54	-13.7	
	13.8		13.8	40	107	54	-13.8	
	13.9		13.9	40	107	54	-13.9	

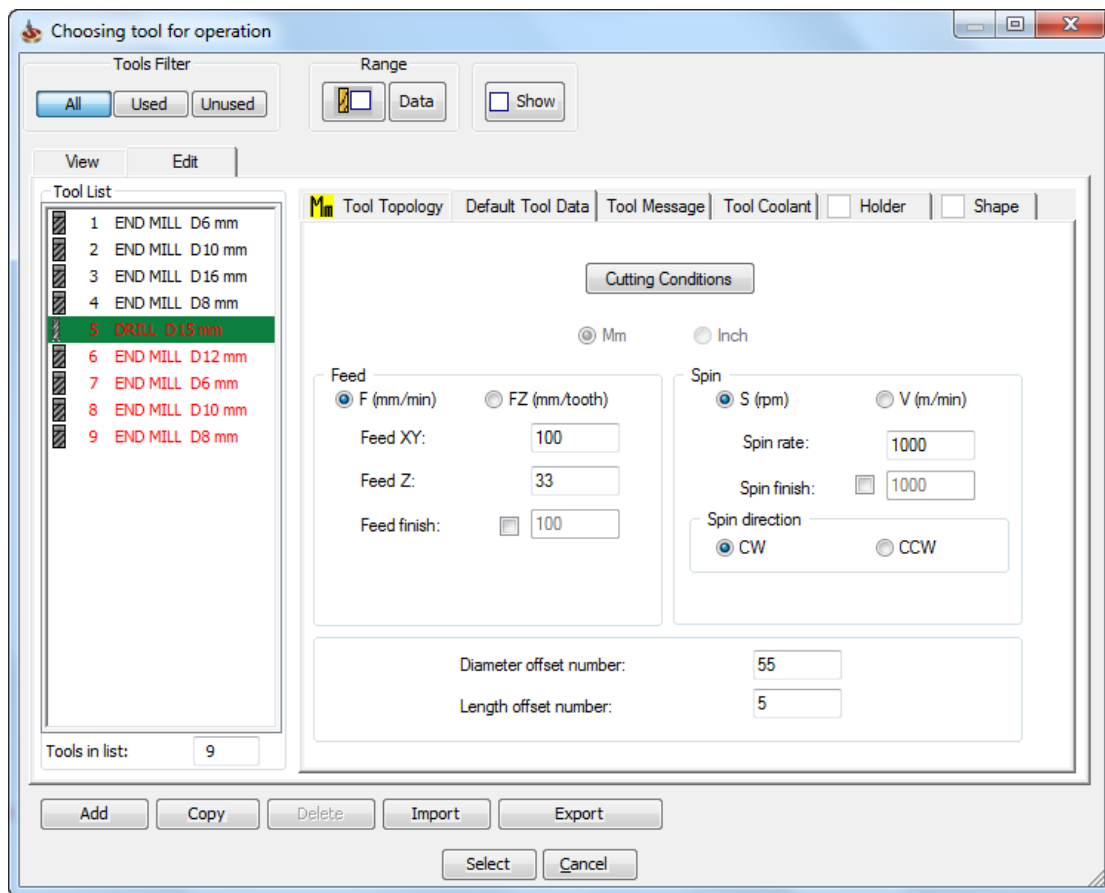




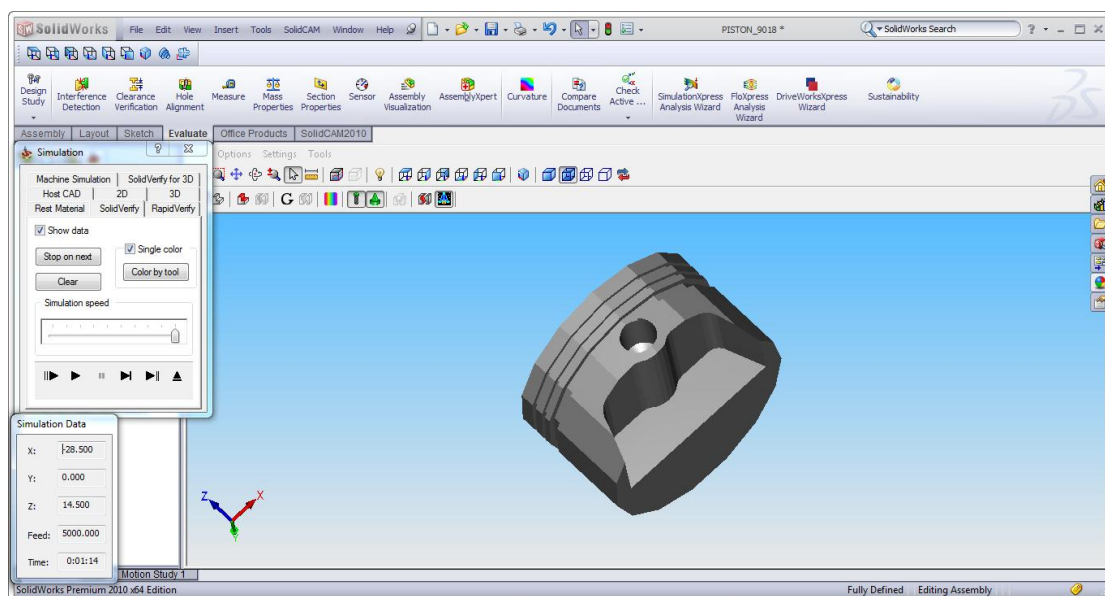
Εικόνα 4.36: Απεικόνιση της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού με κονδύλια διαμέτρου 15 mm και 12 mm



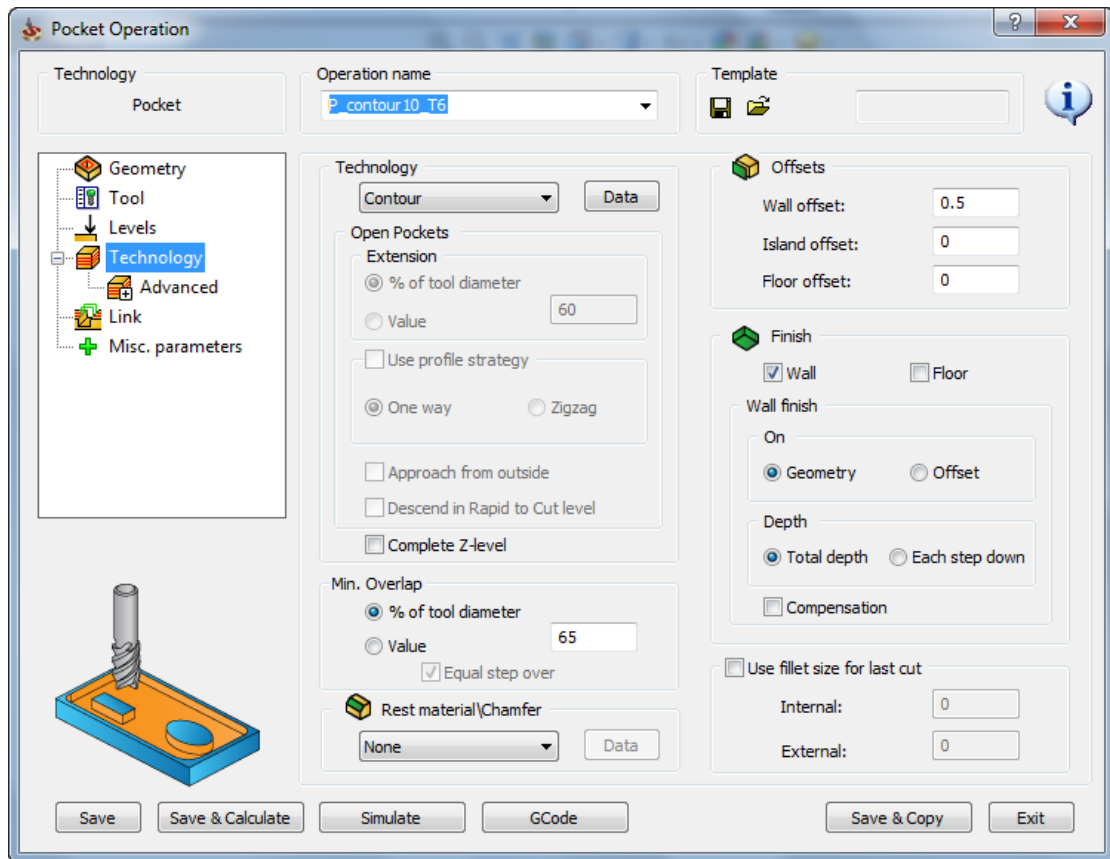
Εικόνα 4.37: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



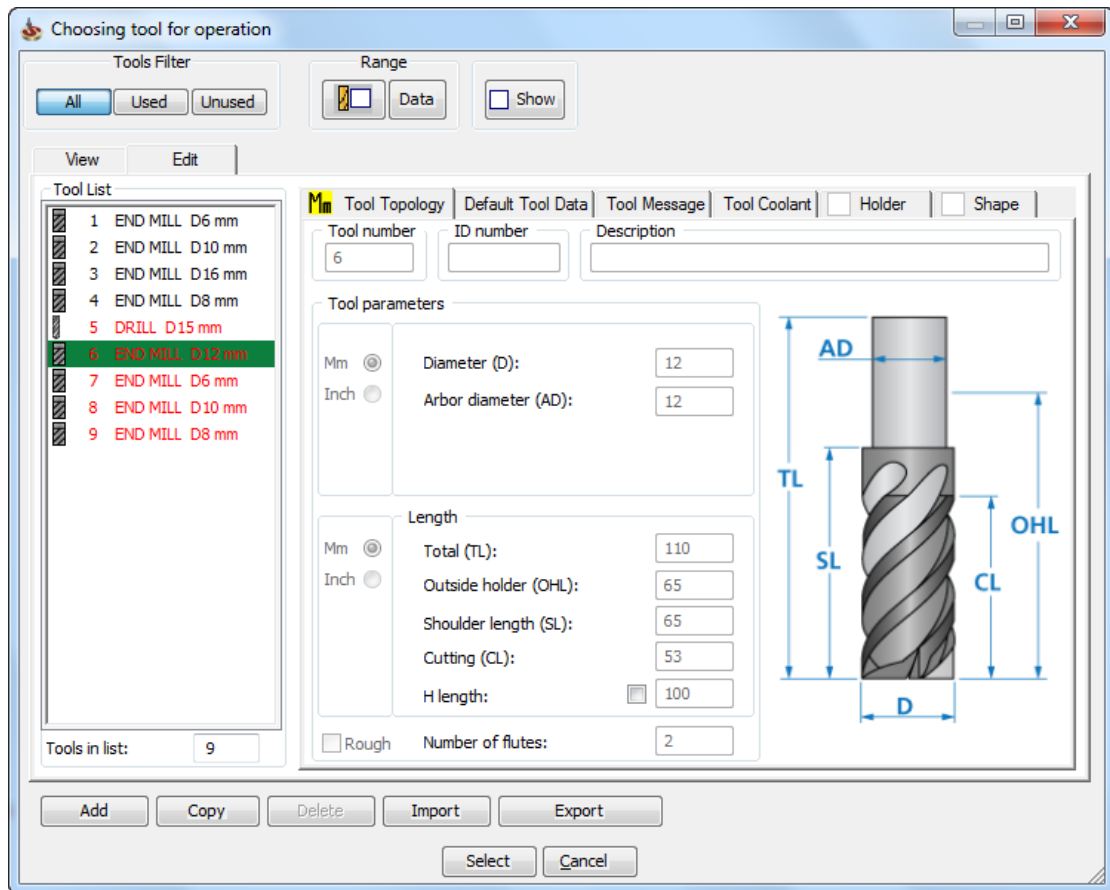
Εικόνα 4.38: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



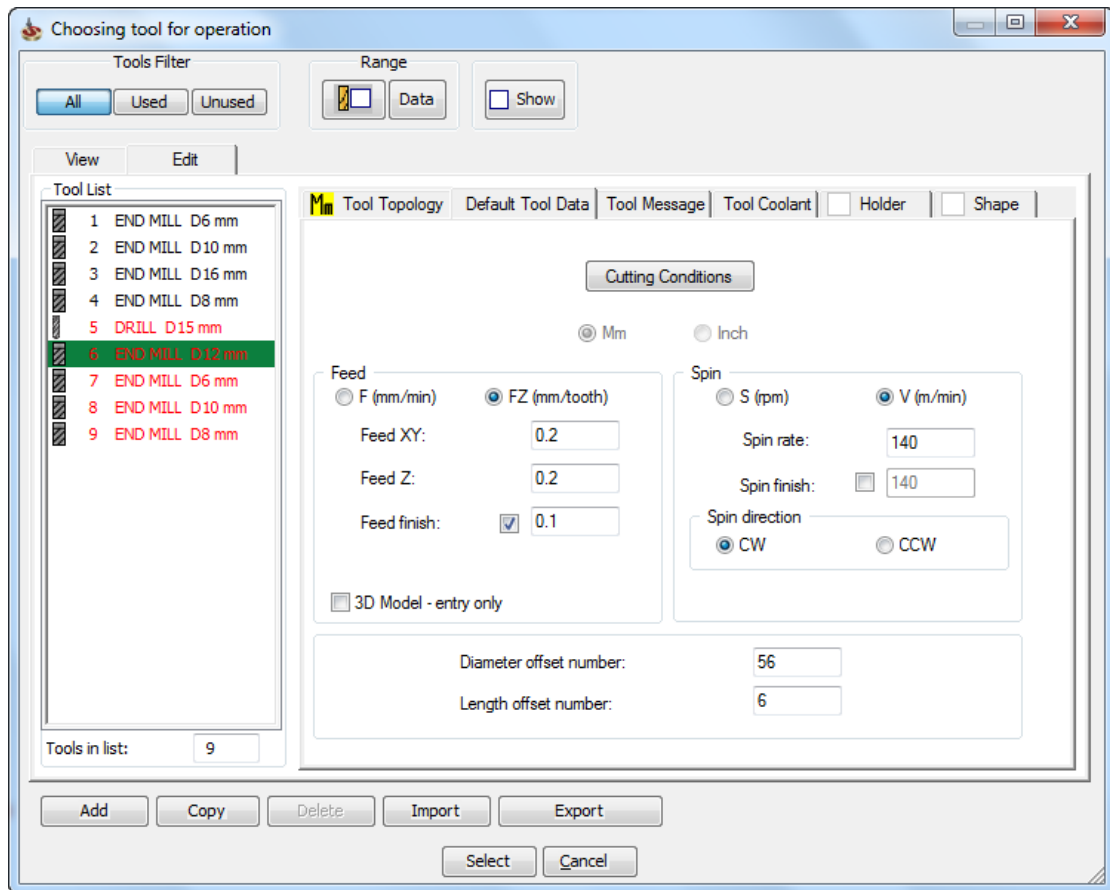
Εικόνα 4.39: Αποτέλεσμα κατεργασίας



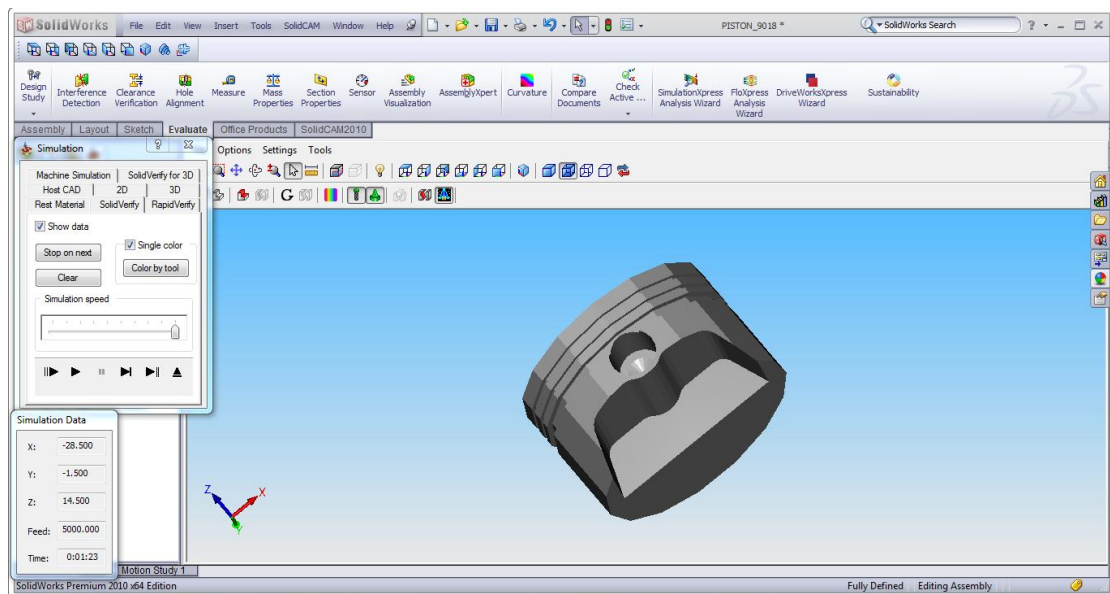
Εικόνα 4.40: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας



Εικόνα 4.41: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



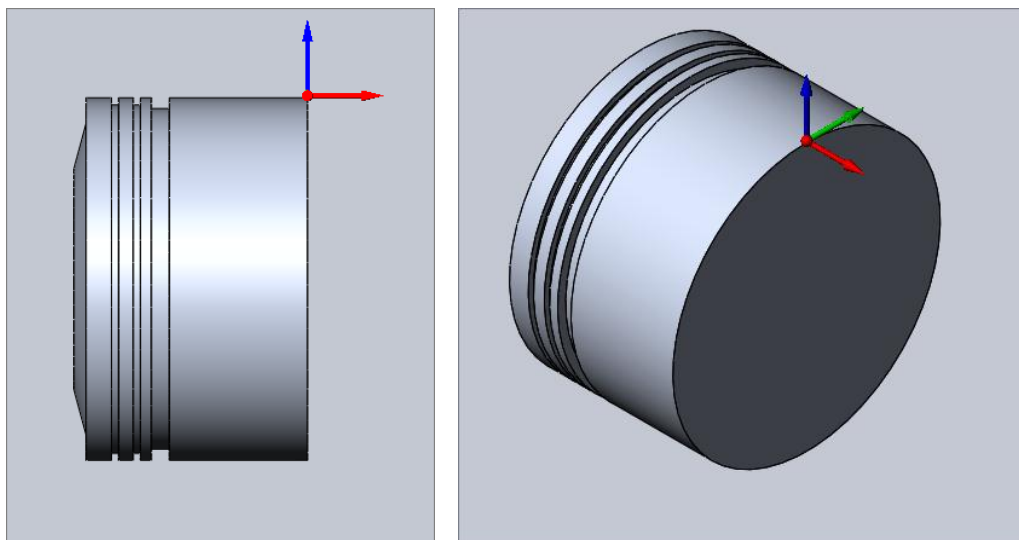
Εικόνα 4.42: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.43: Αποτέλεσμα κατεργασίας

4.7.3 Κατεργασία της “φούστας” του πιστονιού και οπής πείρου από δεξιά

4.7.3.1 Ορισμός σημείου 0 από δεξιά



Εικόνα 4.44: Ορισμός σημείου 0

Σε αυτό το setup ο ορισμός του σημείου μηδέν που φαίνεται παραπάνω θα γίνει ακουμπώντας περιφερειακά και εφαπτομενικά το εργαλείο κατά τον άξονα Y (πράσινος άξονας), στην περιφέρεια του κυλίνδρου, ορίζοντας το 0 στον άξονα Y. Έπειτα μετακινώντας το εργαλείο κατά τον άξονα X (κόκκινος άξονας) στο κάτω μέρος του πιστονιού (επίπεδη επιφάνεια) ορίζω εκεί τον άξονα X. Τέλος για να μηδενίσω τον άξονα Z ακουμπώ το εργαλείο κατά τον άξονα Z στην άνω περιφέρεια του κυλίνδρου.

4.7.3.2 Επιλογή εργαλείων και συνθηκών εργασίας από δεξιά

Η επιλογή του κονδυλίου και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:

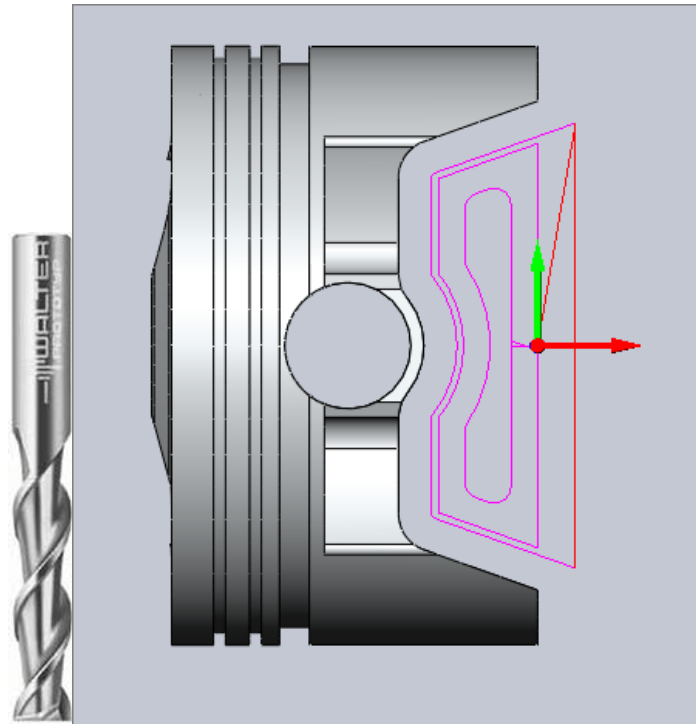
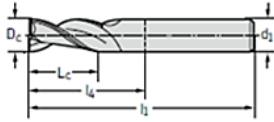
- Διάμετρος κονδυλίου: $D_c=10\text{mm}$
- Εκχόνδριση: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,18\text{ mm/δόντι}$
- Φινίρισμα: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,09\text{ mm/δόντι}$
- Τεχνολογία περιγράμματος

- Μείωση βήματος: 40% της Dc

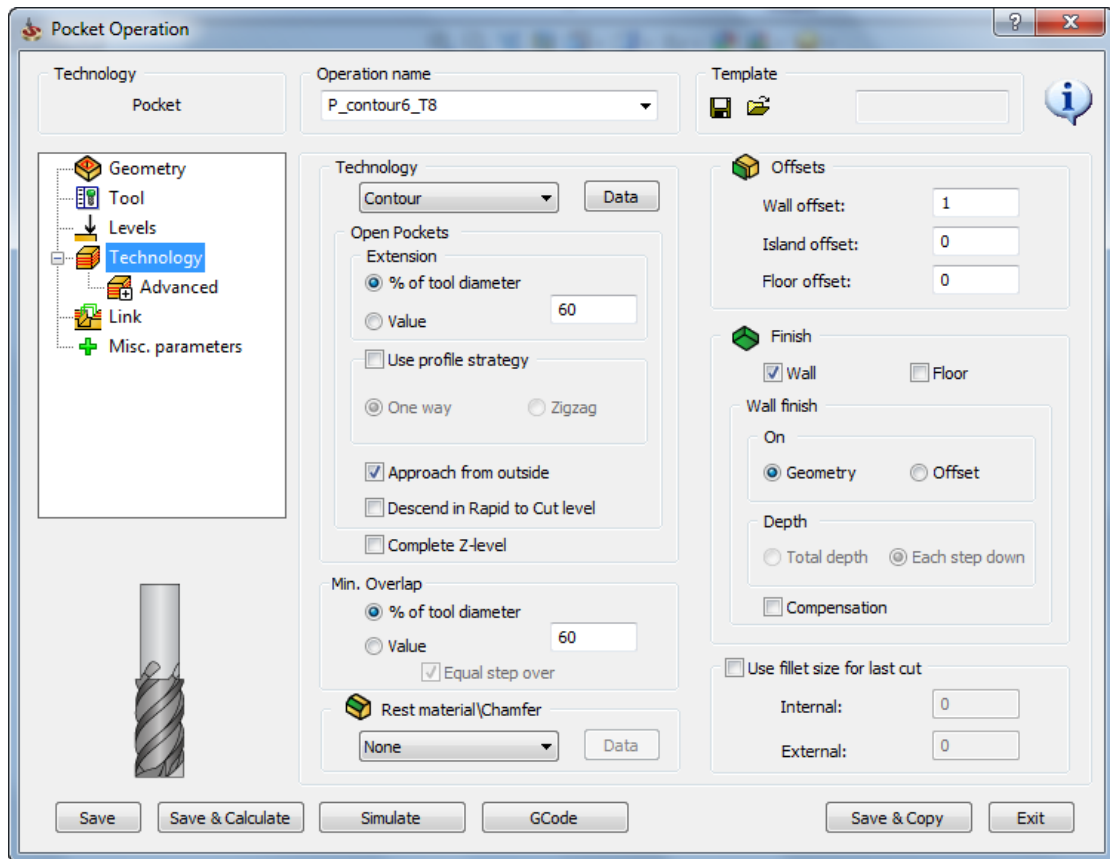
Πίνακας 4.5: Πίνακας επιλογής κονδυλίου καταργασίας της «φούστας» του πιστονιού

		P	M	K	N	S	H	0
uncoated		●			●●			

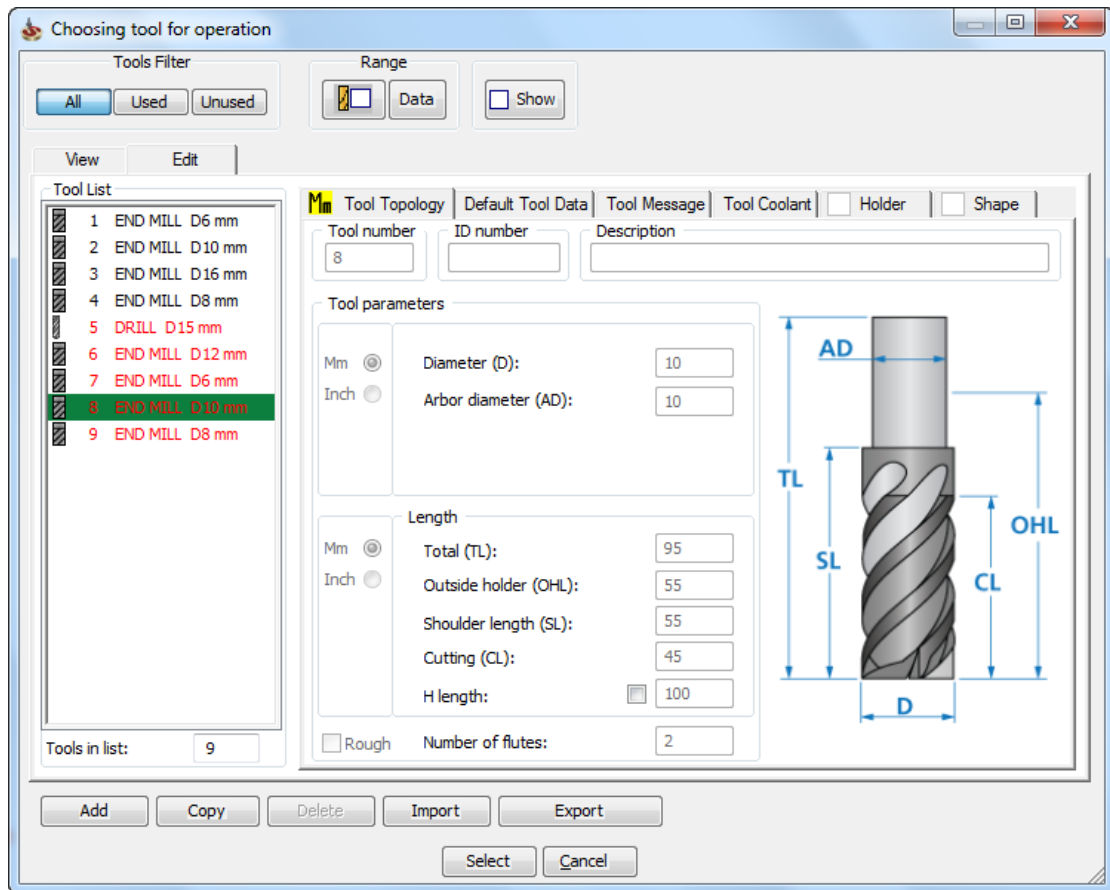
DIN 844 A	D _c e8 mm	L _c mm	l ₁ mm	l ₂ mm	d ₁ h6 mm	Z	uncoated designation P602612
Shank DIN 1835 A	6	24	68	32	6	2	-6
	8	38	88	48	10	2	-8
	10	45	95	55	10	2	-10
	12	53	110	65	12	2	-12
	14	53	110	65	12	2	-14
	16	63	123	75	16	2	-16
	18	63	123	75	16	2	-18
	20	75	141	91	20	2	-20



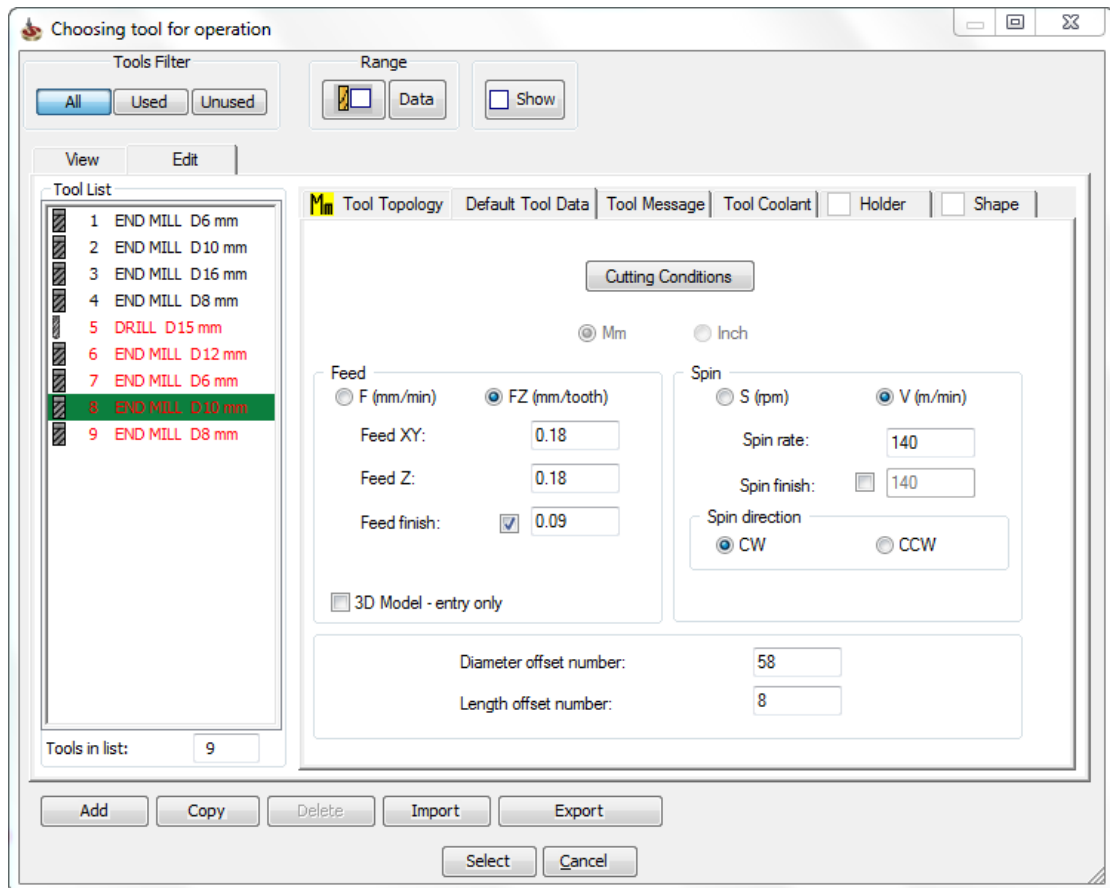
Εικόνα 4.45: Απεικόνιση της καταργασίας της «φούστας» του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 12 mm



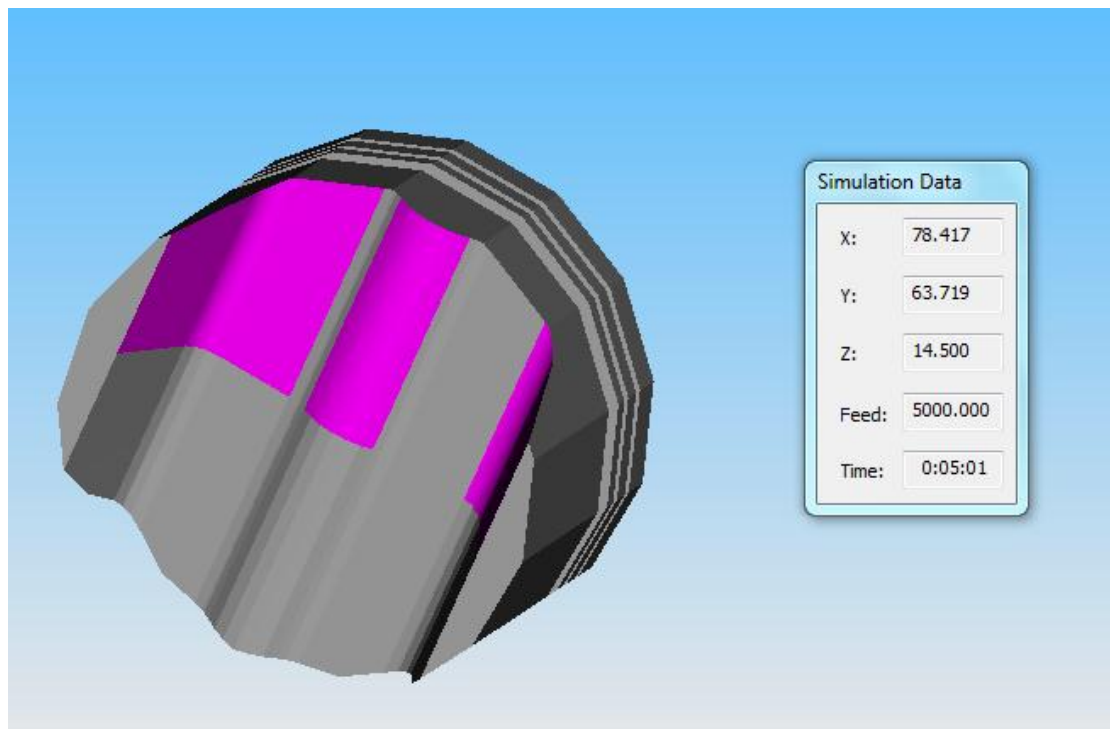
Εικόνα 4.46: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας



Εικόνα 4.47: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



Εικόνα 4.48: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.49: Αποτέλεσμα κατεργασίας

Στην κατεργασία της οπής του πείρου χρησιμοποιήθηκαν δύο τρυπάνια για εξοικονόμηση χρόνου.

Η επιλογή των κονδυλίων και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:

Κατεργασία διάτρησης

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=15\text{mm}$
- $S=1000\text{ rpm}$, $f_z = 33\text{ mm/min}$

Τελική κατεργασία

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=12\text{mm}$
- **Εκχόνδριση:** $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,2\text{ mm/tooth}$
- **Φινίρισμα:** $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,1\text{ mm/tooth}$
- Τεχνολογία περιγράμματος
- Μείωση βήματος: 40% της D_c

Πίνακας 4.6: Πίνακας επιλογής κονδυλίων κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού

		P	M	K	N	S	H	O
uncoated		●			●●			

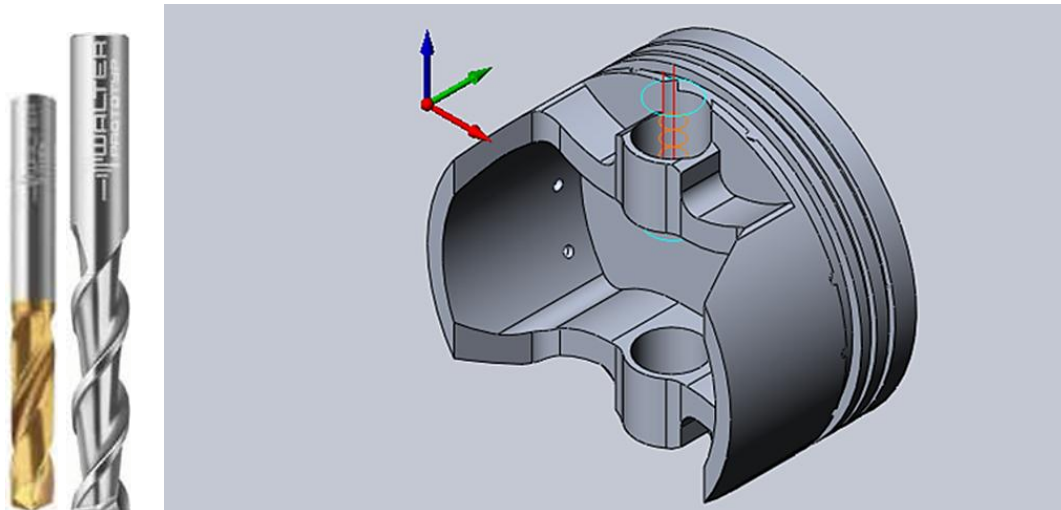
DIN 844 A	D_c e8 mm	L_c mm	l_1 mm	l_4 mm	d_1 h6 mm	Z	uncoated designation P602612
Shank DIN 1835 A	6	24	68	32	6	2	-6
	8	38	88	48	10	2	-8
	10	45	95	55	10	2	-10
	12	53	110	65	12	2	-12
	14	53	110	65	12	2	-14
	16	63	123	75	16	2	-16
	18	63	123	75	16	2	-18
	20	75	141	91	20	2	-20

Πίνακας 4.7: Πίνακας επιλογής συνθηκών αποπεράτωσης της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού

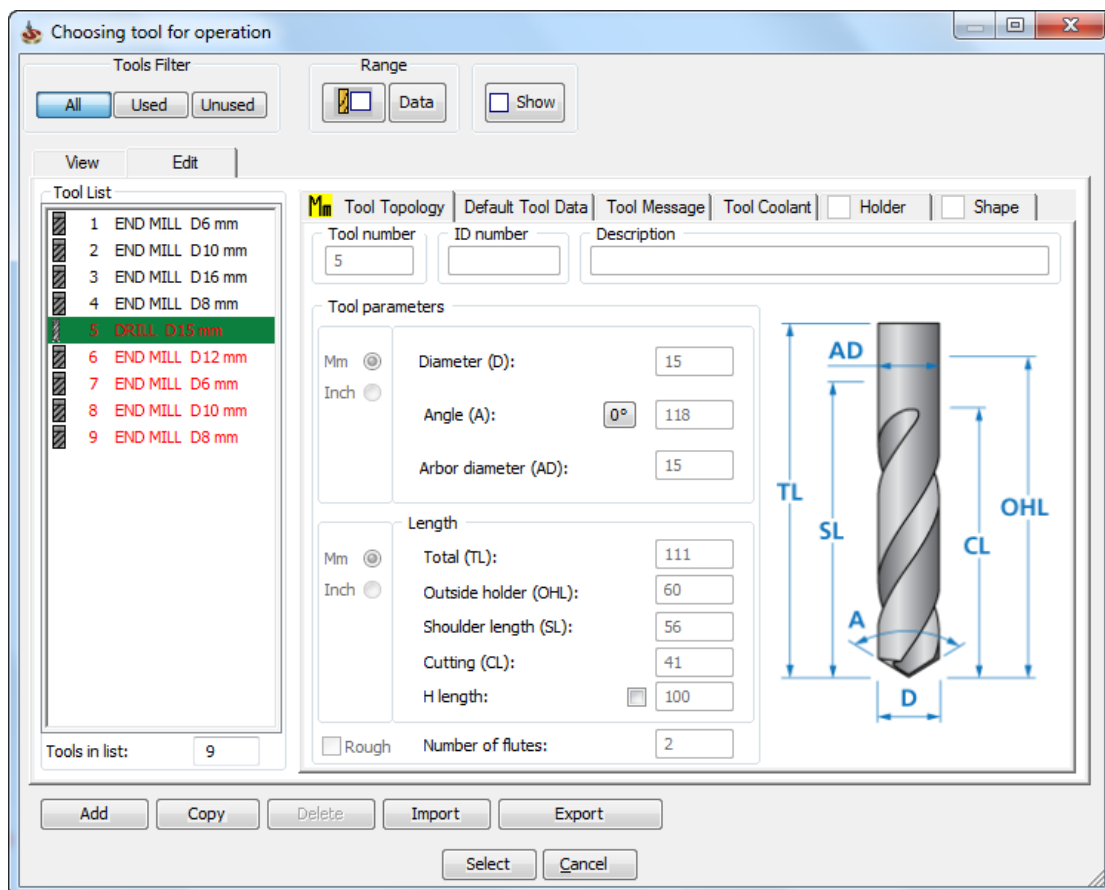
$3 \times D_c$

		P	M	K	N	S	H	O
TiN		●●	●●	●●	●●	●●	●	●●

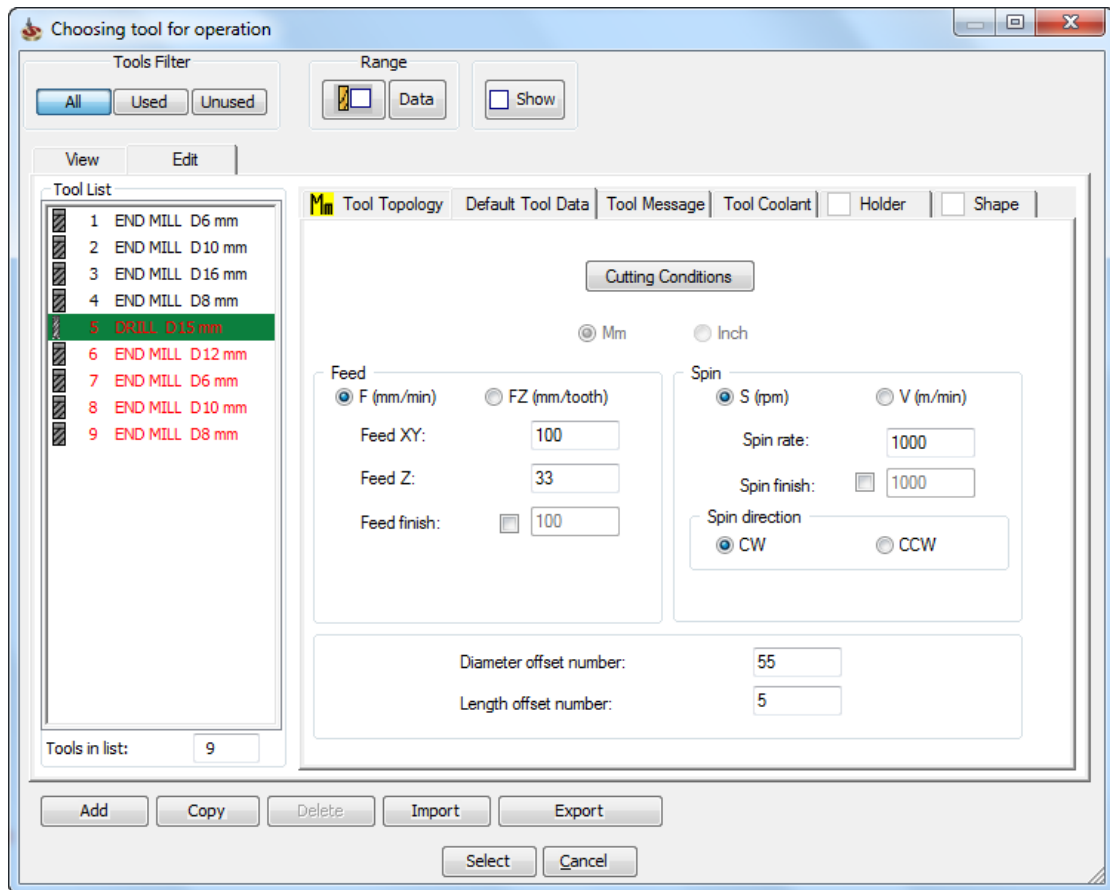
DIN 6539	D_c h7 mm	D_c Inches/No	d_1 h6 mm	L_c mm	l_1 mm	l_2 mm	Designation A1164TiN
Cylindrical shank	13.3		13.3	40	107	54	-13.3
	13.4		13.4	40	107	54	-13.4
	13.494	17/32"	13.494	40	107	54	-17/32IN
	13.5		13.5	40	107	54	-13.5
	13.6		13.6	40	107	54	-13.6
	13.7		13.7	40	107	54	-13.7
	13.8		13.8	40	107	54	-13.8
	13.9		13.9	40	107	54	-13.9



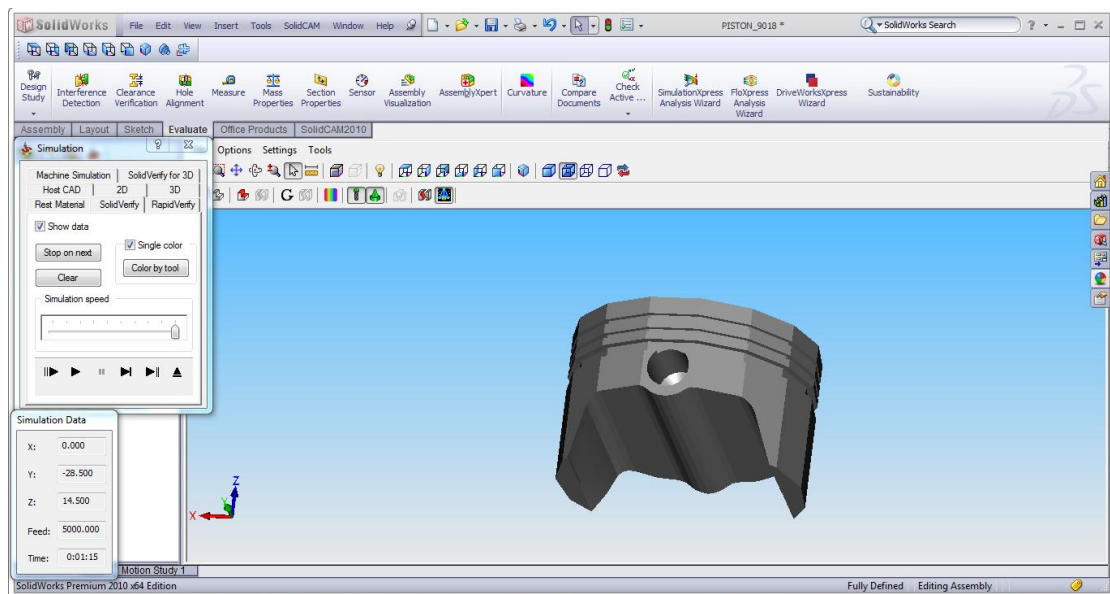
Εικόνα 4.50: Απεικόνιση της κατεργασίας οπής του πείρου του πιστονιού με κονδύλια διαμέτρου 15 mm και 12 mm



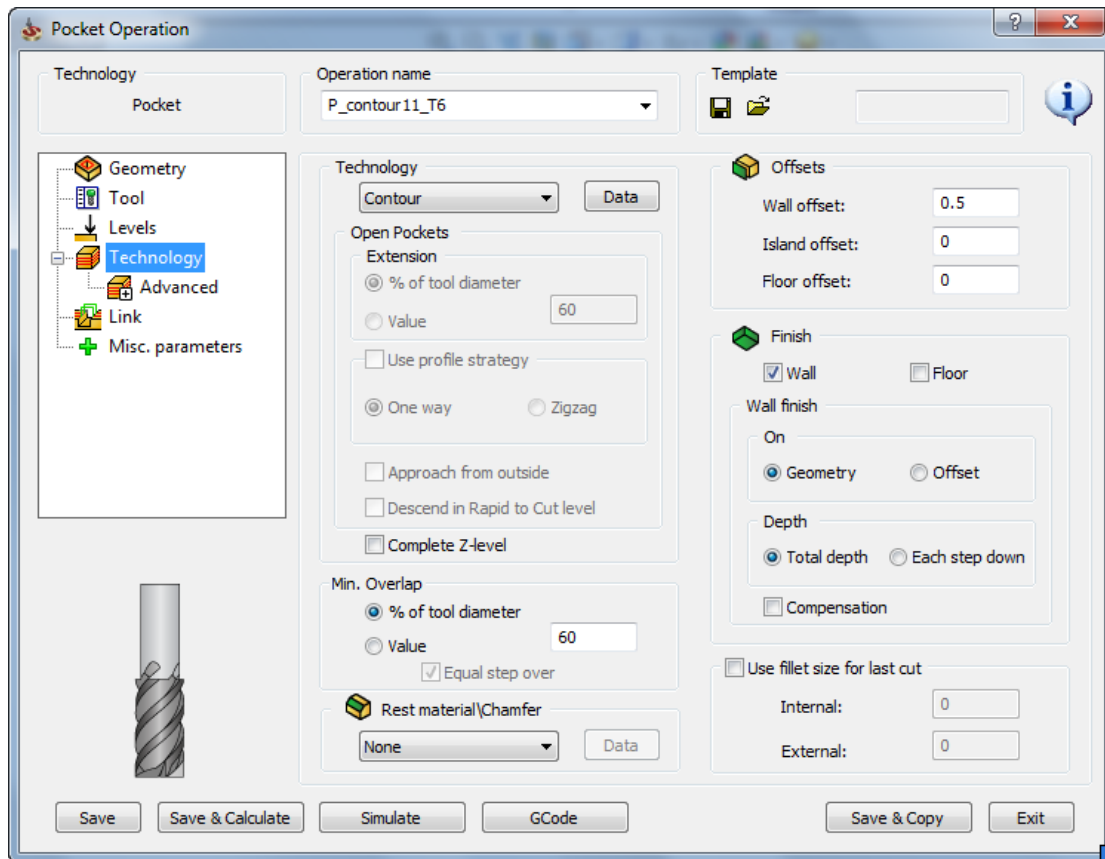
Εικόνα 4.51: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



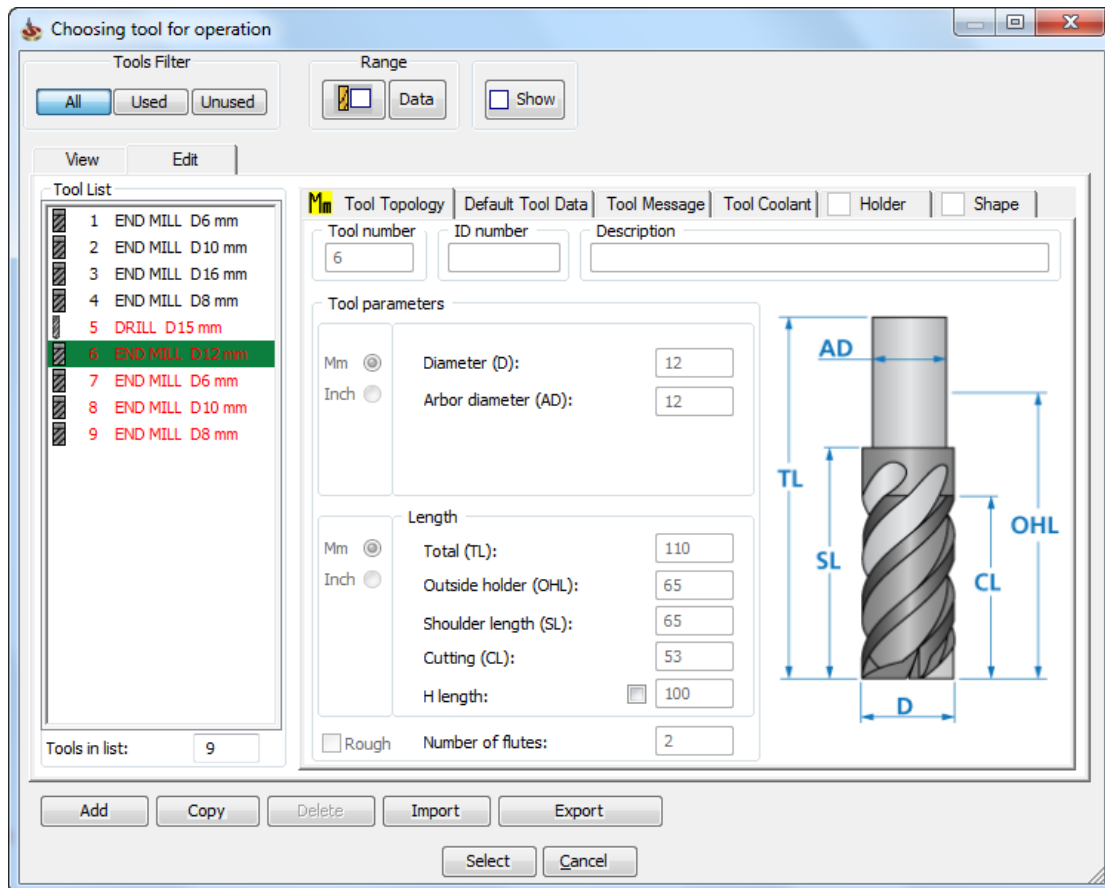
Εικόνα 4.52: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



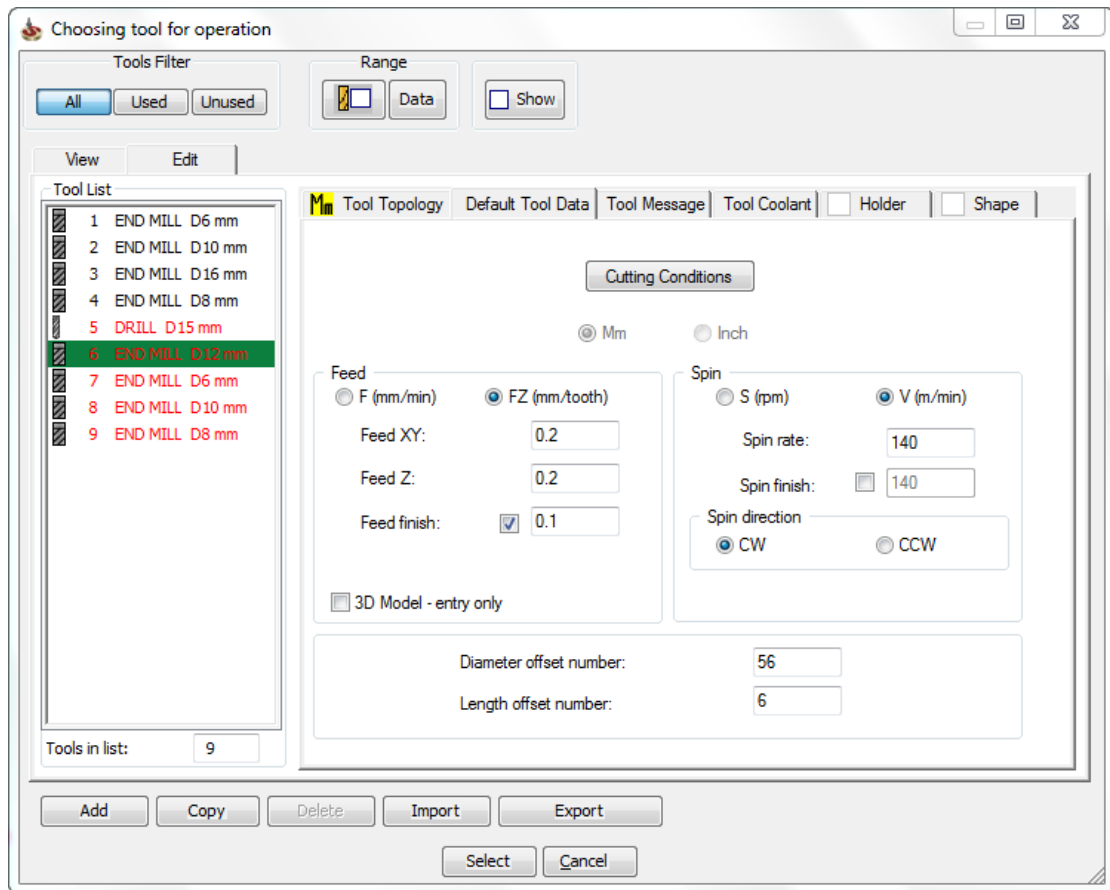
Εικόνα 4.53: Αποτέλεσμα κατεργασίας



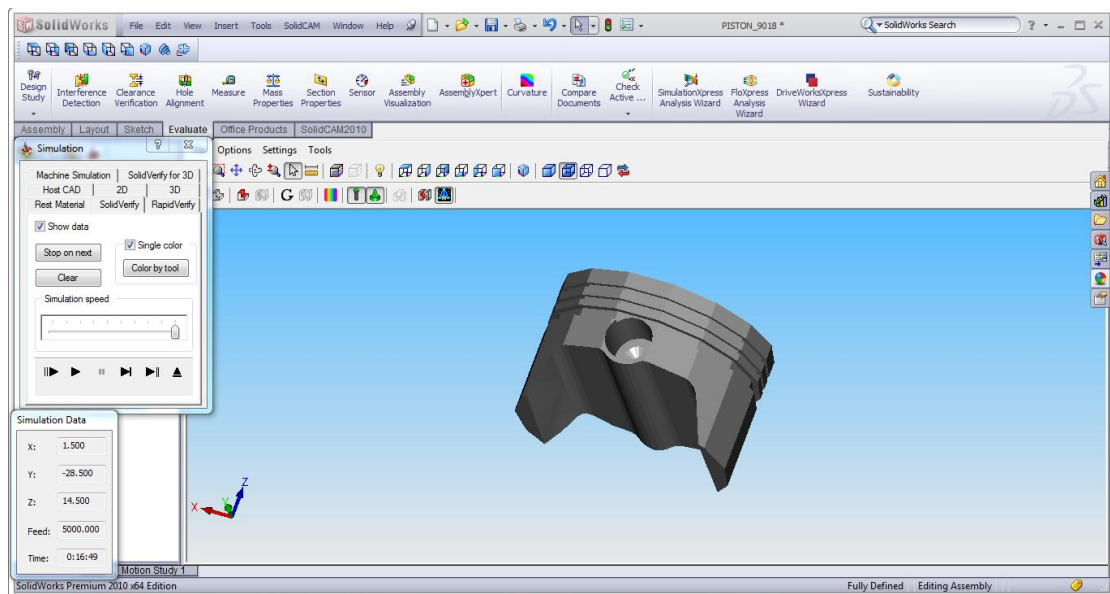
Εικόνα 4.54: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας



Εικόνα 4.55: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



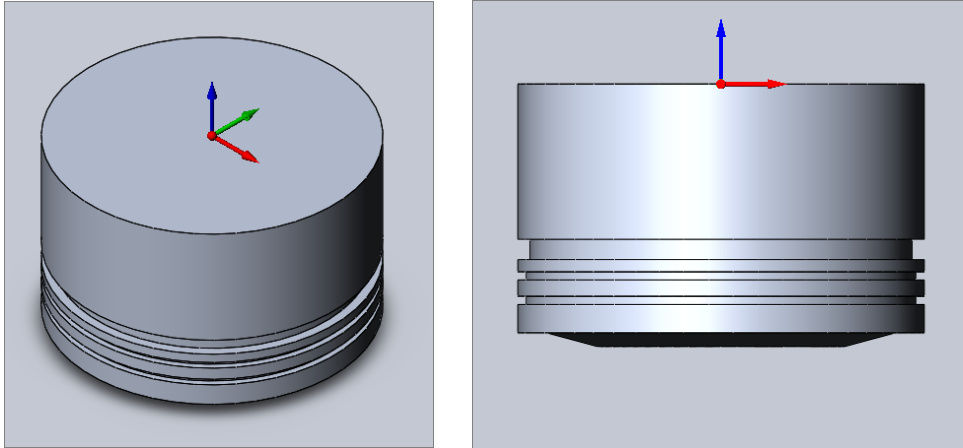
Εικόνα 4.56: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.57: Αποτέλεσμα κατεργασίας

4.7.4 Κατεργασία κάτω μέρους πιστονιού

4.7.4.1 Ορισμός σημείου 0



Εικόνα 4.58: Ορισμός σημείου 0

Για την τελευταία κατεργασία, δηλαδή, την ποκέτα του διωστήρα, το σημείο 0 θα οριστεί με τον εξής τρόπο: Το εργαλείο (ή ο αισθητήρας) θα ακουμπήσουν περιφερειακά τον κύλινδρο και στους δύο άξονες, μία κατά τον άξονα X (κόκκινος) και μία κατά τον άξονα Y (πράσινος). Τέλος για τον άξονα Z αρκεί να ακουμπήσω το εργαλείο στην άνω επίπεδη επιφάνεια (κατά τη φορά συγκράτησης) του πιστονιού.

4.7.4.2 Επιλογή εργαλείων και συνθηκών εργασίας

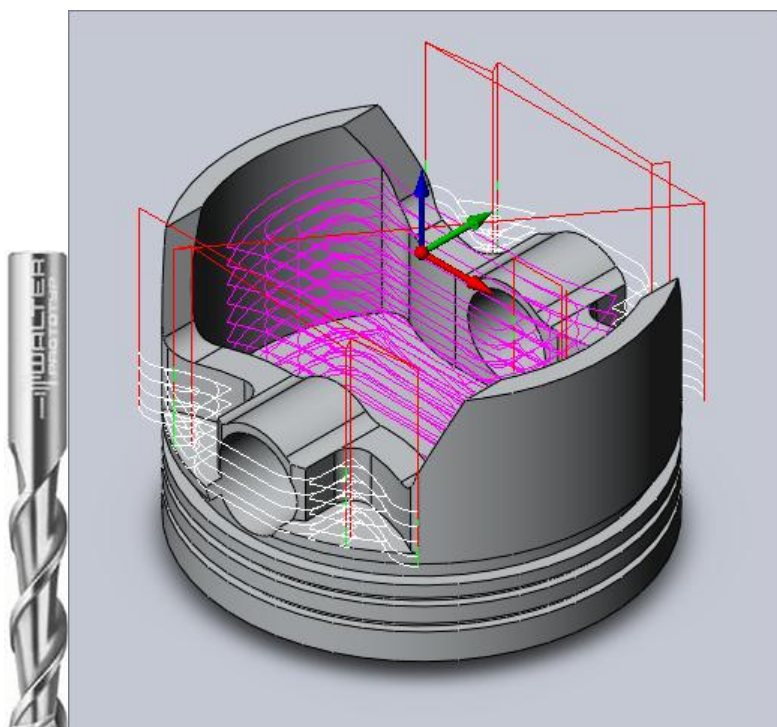
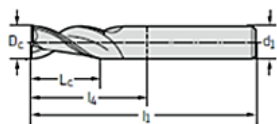
Η επιλογή του κονδυλίου και οι συνθήκες κοπής προέκυψαν από πίνακα και είναι οι ακόλουθες:

- Διάμετρος κονδυλίου $D_c=10\text{mm}$
- Εκχόνδριση: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,18\text{ mm/δόντι}$
- Φινίρισμα: $V=140\text{ m/min}$, $f_z = 0,09\text{ mm/δόντι}$
- Τεχνολογία περιγράμματος
- Μείωση βήματος: 40% της D_c

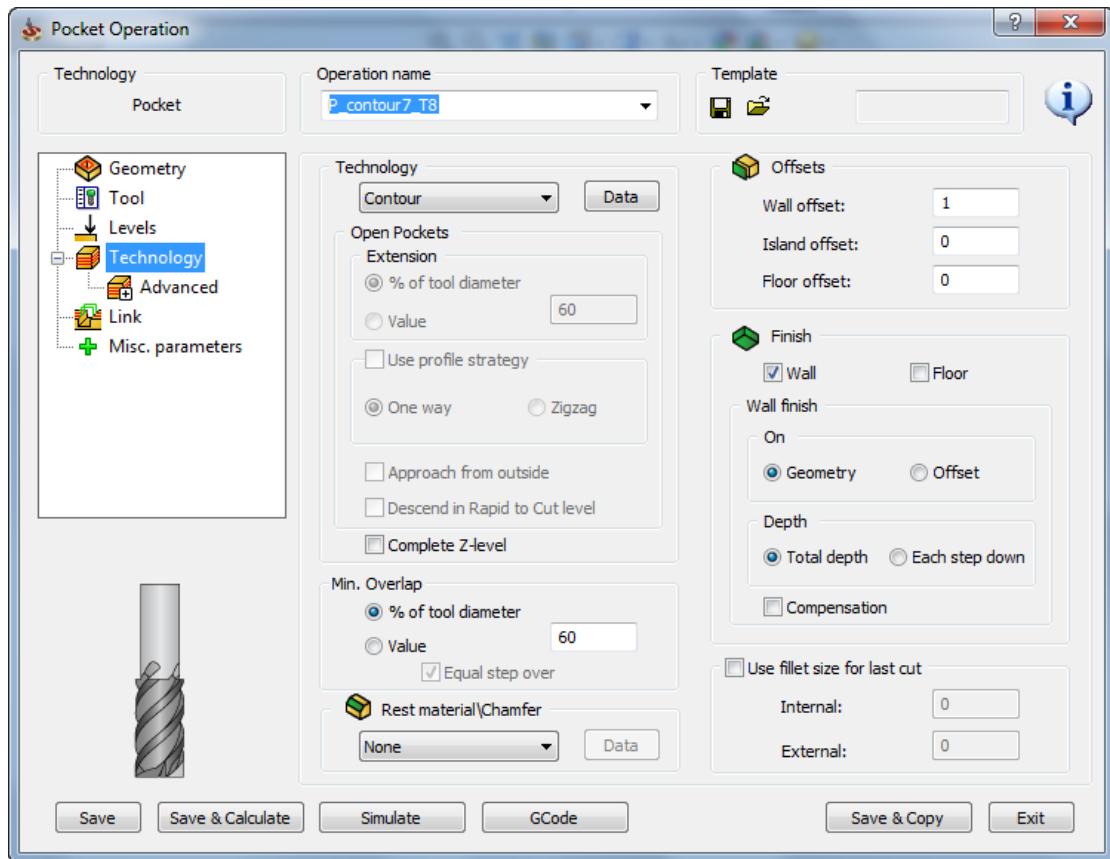
Πίνακας 4.8: Πίνακας επιλογής κονδυλίου κατεργασίας του κάτω μέρους του πιστονιού

		P	M	K	N	S	H	0
uncoated		●			●●			

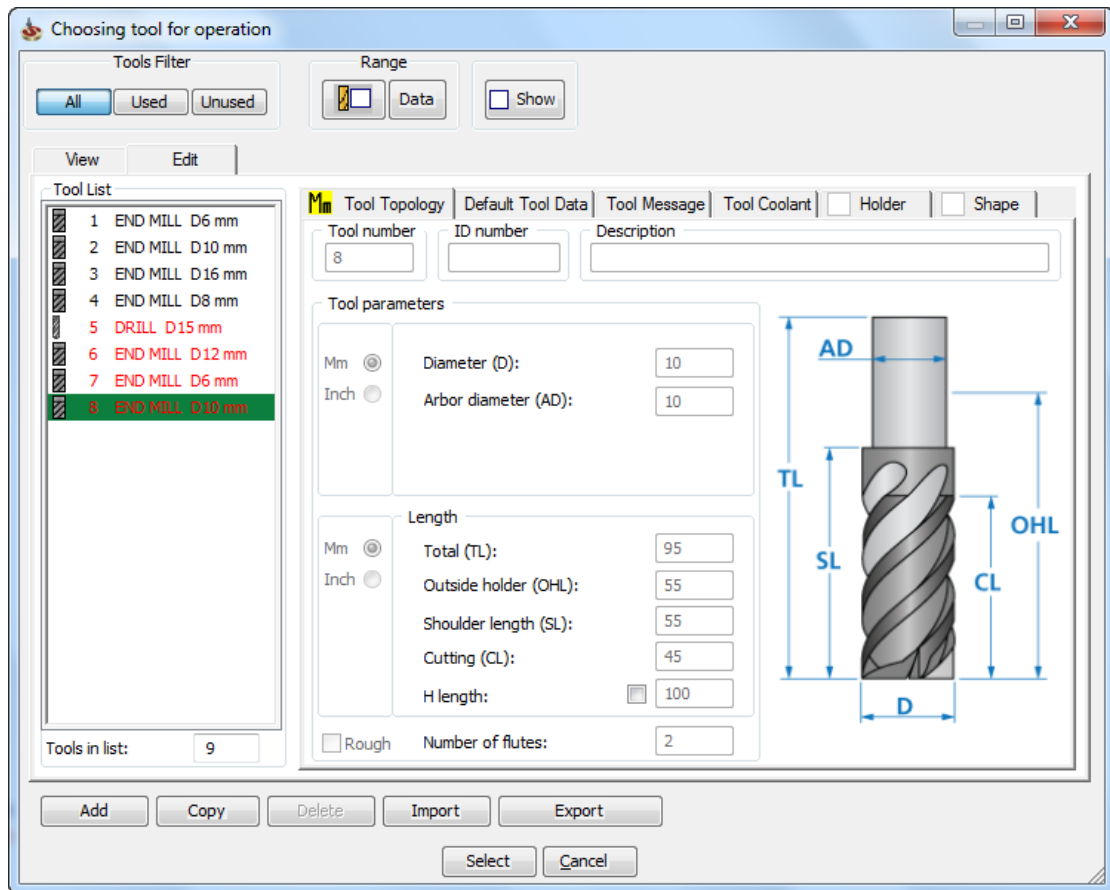
DIN 844 A	D_c e8 mm	L_c mm	l_1 mm	l_2 mm	d_1 h6 mm	Z	uncoated designation P602612
Shank DIN 1835 A	6	24	68	32	6	2	-6
	8	38	88	48	10	2	-8
	10	45	95	55	10	2	-10
	12	53	110	65	12	2	-12
	14	53	110	65	12	2	-14
	16	63	123	75	16	2	-16
	18	63	123	75	16	2	-18
	20	75	141	91	20	2	-20



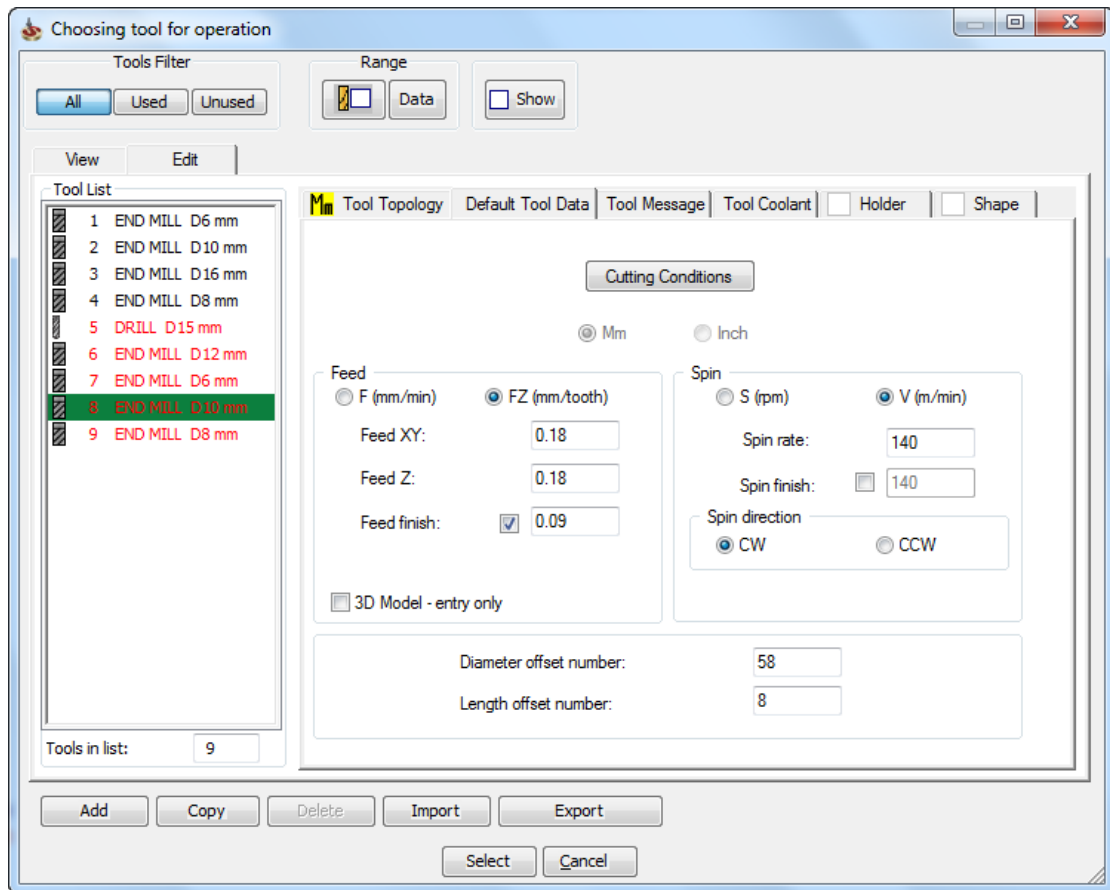
Εικόνα 4.59: Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας του κάτω μέρους του πιστονιού με κονδύλι διαμέτρου 10 mm



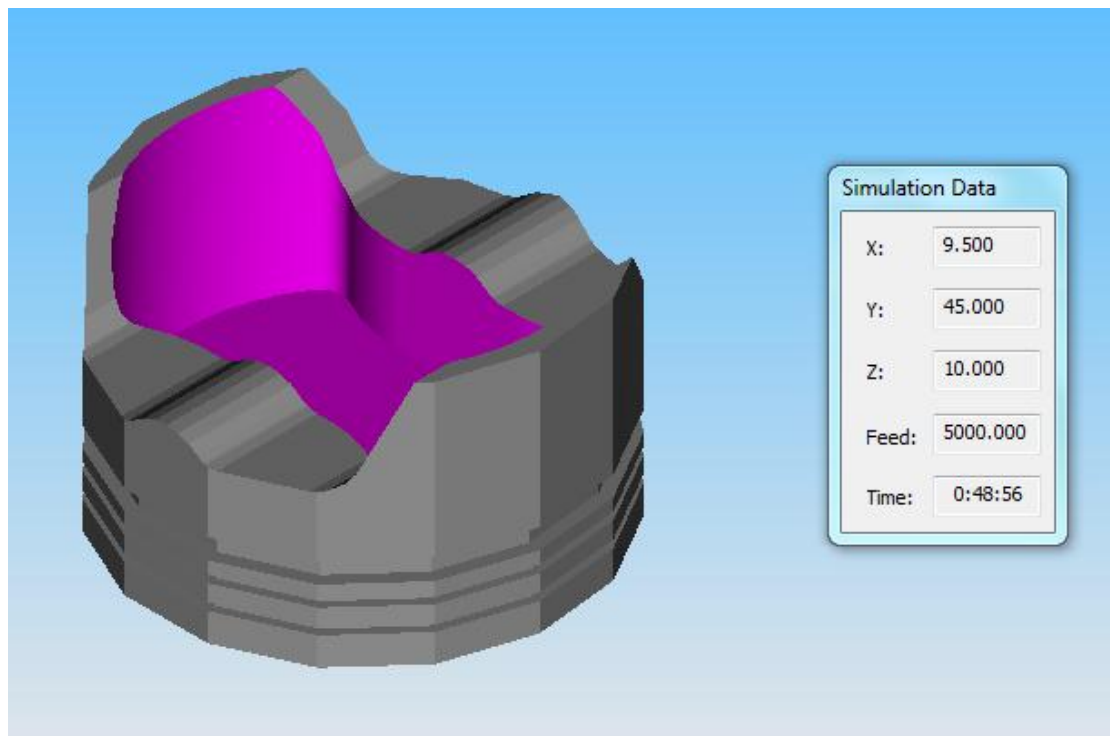
Εικόνα 4.60: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας



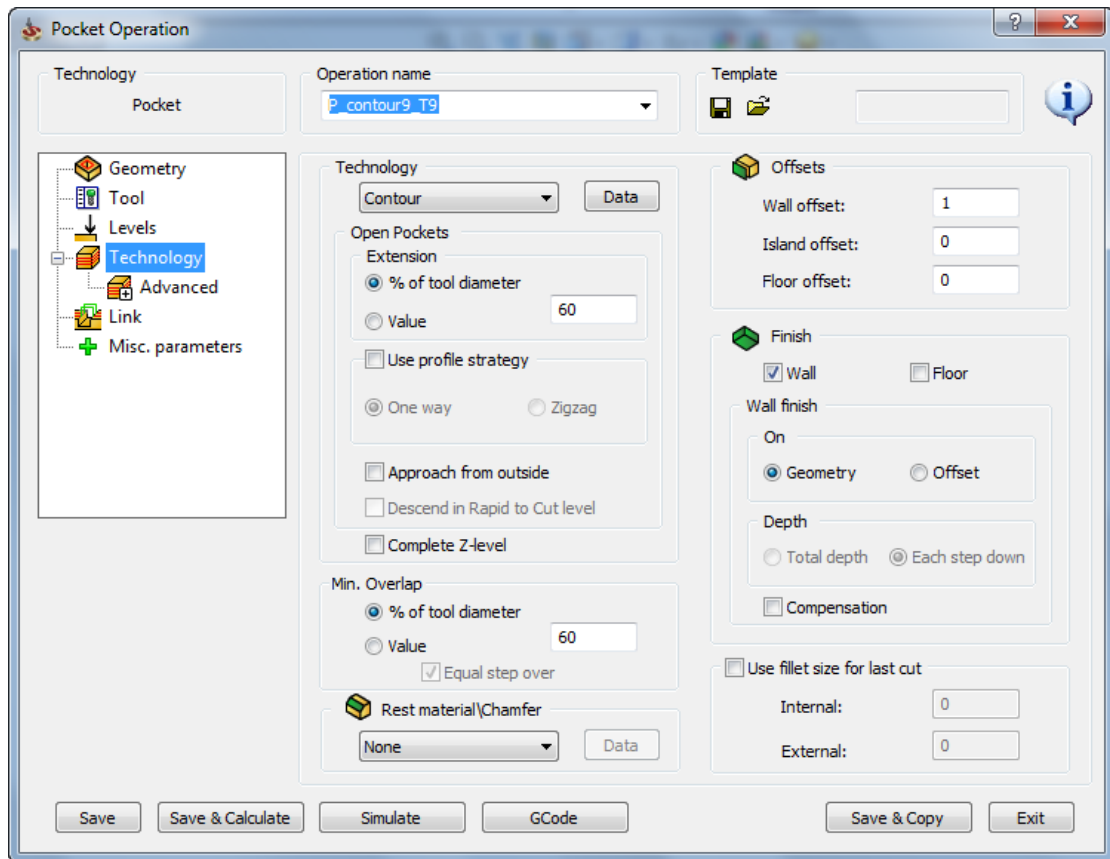
Εικόνα 4.61: Σελίδα επιλογής εργαλείου για την κατεργασία



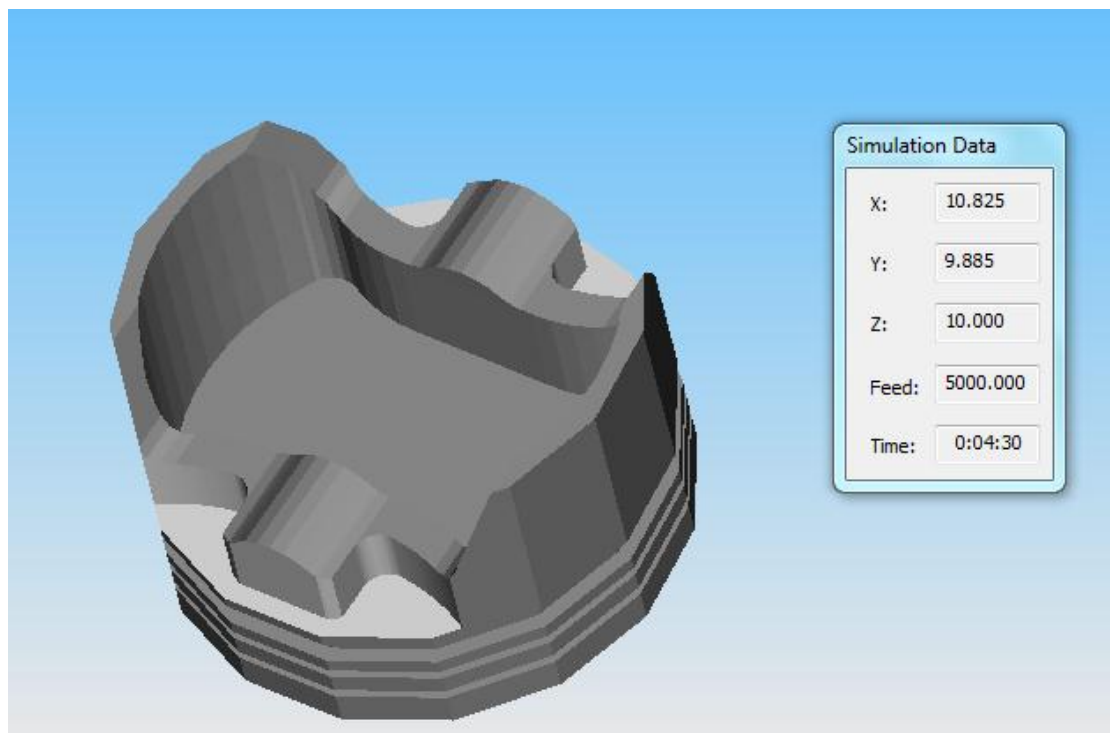
Εικόνα 4.62: Σελίδα εισαγωγής συνθηκών κοπής



Εικόνα 4.63: Αποτέλεσμα κατεργασίας



Εικόνα 4.64: Σελίδα προγραμματισμού κατεργασίας



Εικόνα 4.65: Αποτέλεσμα κατεργασίας

4.8 Πιθανοί περιορισμοί για εξασφάλιση παραμετρικότητας

Επειδή το πιστόνι είναι ένα μηχανολογικό εξάρτημα ακριβείας, θα πρέπει κατά τον προγραμματισμό σε περιβάλλον CAM να υπάρχει μεγάλη προσοχή, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι σύμφωνο με το αρχικό μοντέλο και να μην παρουσιάζει διαστασιολογικές αποκλίσεις. Η επιλογή των εργαλείων έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι η βέλτιστη για το συγκεκριμένο πιστόνι κάθε φορά. Αλλαγή της κύριας διαμέτρου του πιστονιού από 100 mm σε 90 mm οδηγεί αμέσως και σε αλλαγή των υπόλοιπων διαστάσεων που έχουμε ορίσει παραπάνω. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή των κοπτικών εργαλείων, εφ' όσον αλλάζουν και οι γεωμετρίες των κοιλοτήτων. Τα κριτήρια επιλογής των εργαλείων ήταν κυρίως το ενεργό μήκος κοπής του εργαλείου, μιας και στο τεμάχιο υπάρχουν κοιλότητες μεγάλου βάθους, και με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η σύγκρουση της ατράκτου με το τεμάχιο.

Αλλαγή στη γεωμετρία του πιστονιού μέσω της παραμετρικότητας επιφέρει αμέσως και αλλαγές στα εργαλεία και συνεπώς στις ταχύτητες κοπής, αλλά όχι στη στρατηγική κοπής. Η αλλαγή των εργαλείων επιφέρει και αλλαγές στο βάθος κοπής (διατηρήθηκε ο κανόνας 40% επί της διαμέτρου του εργαλείου) καθώς και τον ταχυτήτων κοπής, οι οποίες υπολογίστηκαν πάλι χρησιμοποιώντας τους πίνακες του κατασκευαστή.

Με άλλα λόγια η έννοια της παραμετρικότητας είναι να εξασφαλίσει στον χρήστη όσο το δυνατόν λιγότερες ενέργειες που αφορούν στον προγραμματισμό CAM. Βέβαια μικρές αλλαγές στη διάμετρο, της τάξης του χιλιοστού, δεν επιφέρουν καμία αλλαγή στα εργαλεία. Ακόμα οι διάμετροι των πιστονιών μπορούν να ομαδοποιηθούν, ώστε να μην χρειάζεται αλλαγή ούτε στα κοπτικά εργαλεία αλλά και ούτε στις ταχύτητες κοπής. Για παράδειγμα το εύρος των διαμέτρων 90-100 mm θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τα ίδια εργαλεία ενώ στο εύρος 101-110 mm θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα εργαλεία. Βεβαίως ένα πιστόνι στο εύρος 101-110 mm θα μπορούσε να κατεργαστεί με εργαλεία και ταχύτητες κοπής πιστονιού που ανήκει στο εύρος 90-100 mm, αλλά αυτό θα είχε αντίκτυπο στο τελικό χρόνο της κατεργασίας, θα οδηγούσε δηλαδή σε αύξηση του χρόνου και συνεπώς σε αύξηση του κόστους. Το αντίθετο δεν θα μπορούσε να γίνει.

Τέλος σε κάθε αλλαγή διαμέτρου, εφόσον όλες οι διαστάσεις είναι παραμετρικά ορισμένες, θα πρέπει να ορίζεται εκ νέου το βάθος κοπής της εκάστοτε κατεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Κώδικας CNC για κατασκευή πιστονιών

5.1 Επιλογή στρατηγικών στο Solidcam

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται το αρχικό τεμάχιο πριν την κατεργασία και το μοντέλο, όταν έχει υποστεί την τελική κατεργασία.



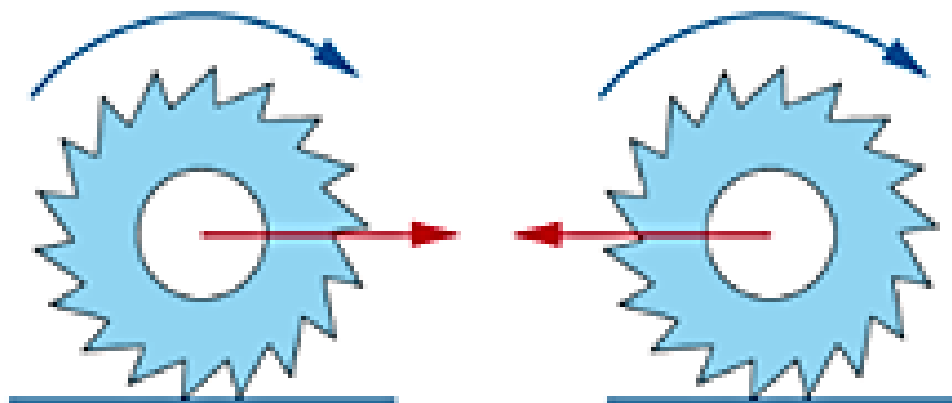
Εικόνα 5.1: Το τεμάχιο στην αρχική και την τελική μορφή του

Στην Εικόνα 5.2 το παρουσιάζεται το σύστημα συντεταγμένων στο Solidworks και στο SolidCam. Στο SolidCam ο άξονας του εργαλείου είναι πάντα ο άξονας z.



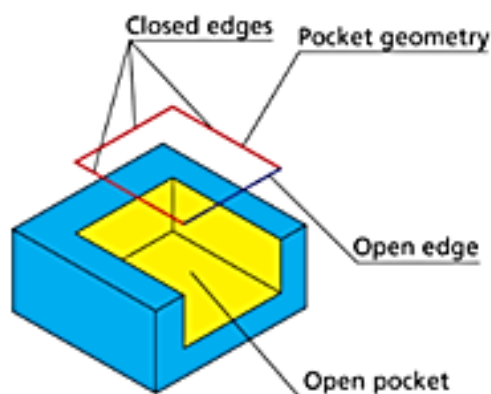
Εικόνα 5.2: Το σύστημα συντεταγμένων στο Solidworks (αριστερά) και το σύστημα συντεταγμένων στο SolidCam (δεξιά)

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ομόρροπου ή αντίρροπου φρεζαρίσματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε ομόρροπο φρεζάρισμα, για καλύτερο αποτέλεσμα επιφάνειας και αποφυγή των τάσεων, λόγω του ότι δεν χρησιμοποιείται ψυκτικό.



Εικόνα 5.3: Ομόρροπο (αριστερά) και αντίρροπο (δεξιά) φρεζάρισμα

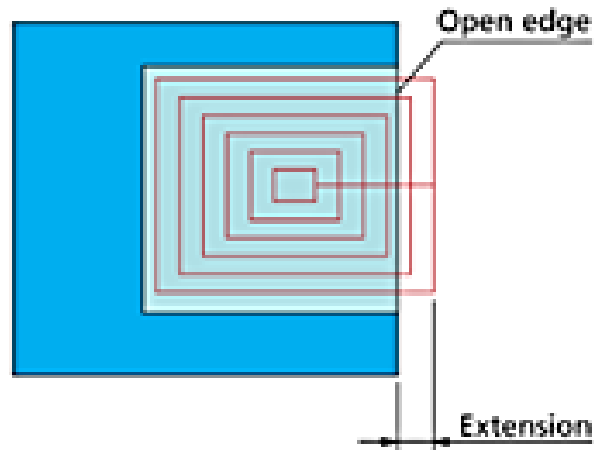
Η ποκέτα μπορεί να κατεργαστεί με στρατηγική ανοικτής ή κλειστής ποκέτας (open/closed), στην κατεργασία κλειστής ποκέτας ακολουθείται το τοίχωμα του τεμαχίου για τη διαδρομή του εργαλείου, ενώ στην κατεργασία ανοικτής ποκέτας το εργαλείο μπορεί να βγει και έξω από το τεμάχιο, για διευκόλυνση της κατεργασίας.



Εικόνα 5.4: Κατεργασία με στρατηγική ανοικτής και κλειστής ποκέτας

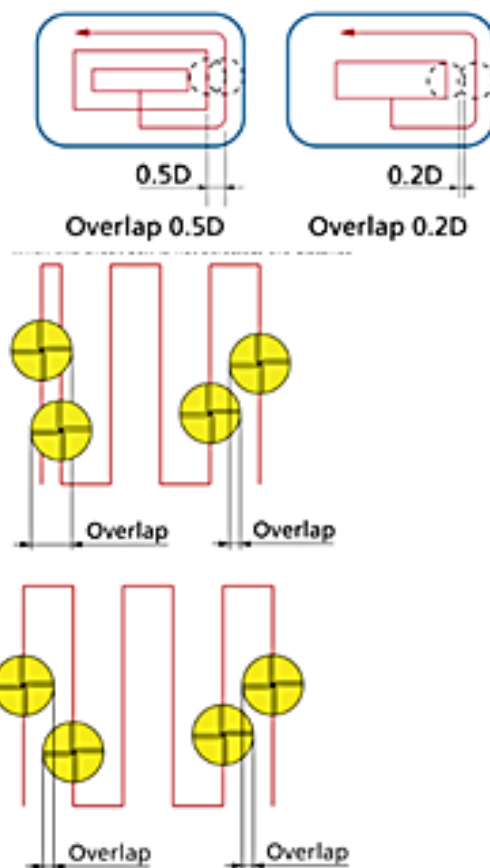
Η τεχνική που χρησιμοποιούνται στην κατεργασία ανοικτής ποκέτας είναι η επέκταση (extension). Κατά την κατεργασία ανοικτής ποκέτας, η διαδρομή του

εργαλείου επεκτείνεται έξω από τα όρια της ανοικτής ποκέτας. Η τιμή που χρησιμοποιείται συνήθως είναι 60% της διαμέτρου του κονδυλίου.



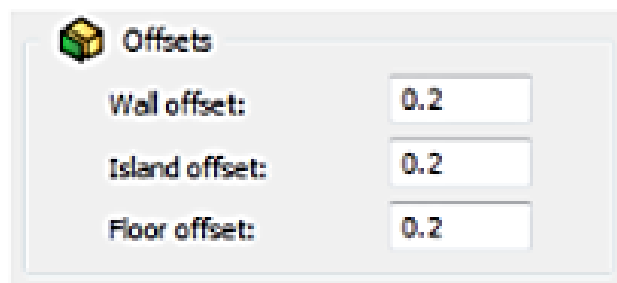
Εικόνα 5.5: Η τεχνική της επέκτασης στην κατεργασία ανοικτής ποκέτας

Η διαδρομή του εργαλείου σχεδιάζεται έτσι ώστε να υπάρχει επικάλυψη (overlap). Αν επιλεγεί μεγάλη επικάλυψη, ο χρόνος κατεργασίας αυξάνεται, ενώ η επιλεγεί μικρή τιμή, θα οδηγηθούμε σε επιφάνεια με γρέζια.



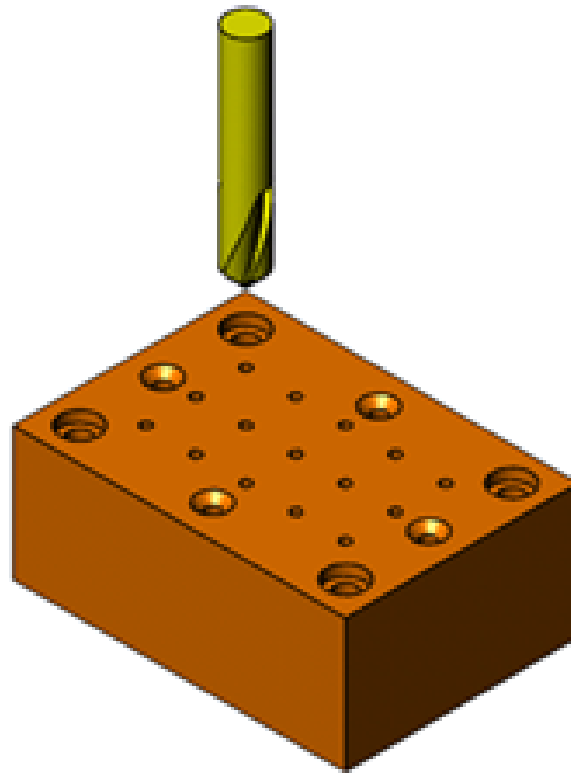
Εικόνα 5.6: Εφαρμογή της επικάλυψης (overlap) σε κατεργασία ποκέτας

Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η απόσταση από τα τοιχώματα και τη βάση της ποκέτας, στην οποία θα σταματήσει η εκχόνδριση και θα ξεκινήσει το φινίρισμα, το οποίο θα γίνει με μικρότερη ταχύτητα κατεργασίας. Στη συγκεκριμένη εργασία έχει επιλεγεί 0.7 mm.



Εικόνα 5.7: Επιλογή αποστάσεων για φινίρισμα της ποκέτας

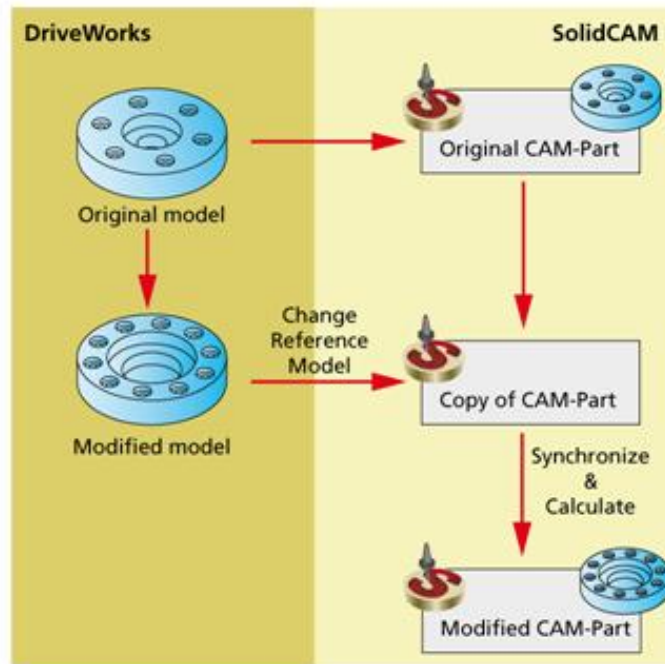
Στο SolidCam παρέχεται επίσης η δυνατότητα παραγωγής οπών, όπως χρησιμοποιήθηκε και στο συγκεκριμένο τεμάχιο.



Εικόνα 5.8: Κατεργασία διάτρησης

Το λογισμικό DriveWorks μπορεί να δημιουργήσει αυτόματα επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες, επιτρέποντας την αυτόματη παραγωγή τεμαχίων κατεργασίας. Το λογισμικό αυτό είναι ενσωματωμένο στο SolidCam, επιτρέποντας την αυτοματοποίηση της διαδικασίας από το σχεδιασμό ως την κατασκευή. Η βασική αρχή του DriveWorks είναι η αυτόματη τροποποίηση των παραμέτρων ενός αρχείου. Βάσει ενός μοντέλου του SolidWorks με δοσμένες παραμέτρους, το DriveWorks δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει παρόμοια μοντέλα με τροποποιημένες παραμέτρους και χαρακτηριστικά (π.χ. μεταβολή του μεγέθους, προσθήκη ή αφαίρεση οπών κλπ.)

Όταν το DriveWorks χρησιμοποιείται για να τροποποιήσει ένα μοντέλο του SolidWorks, στο οποίο βασίζεται κάποιο τμήμα του SolidCam, το DriveWorks αντιγράφει το αρχικό μοντέλο σε ένα ξεχωριστό κατάλογο (directory) και πραγματοποιεί τις απαραίτητες τροποποιήσεις.

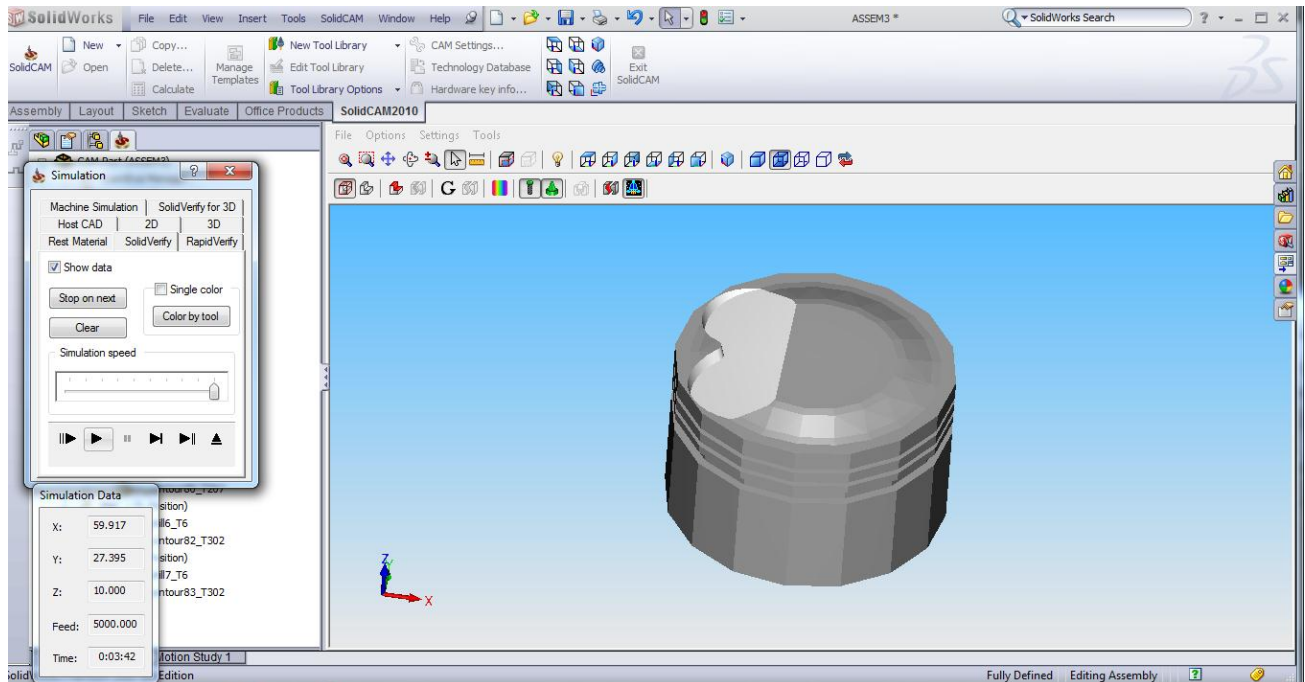


Εικόνα 5.9: Επικοινωνία μεταξύ DriveWorks και SolidCam

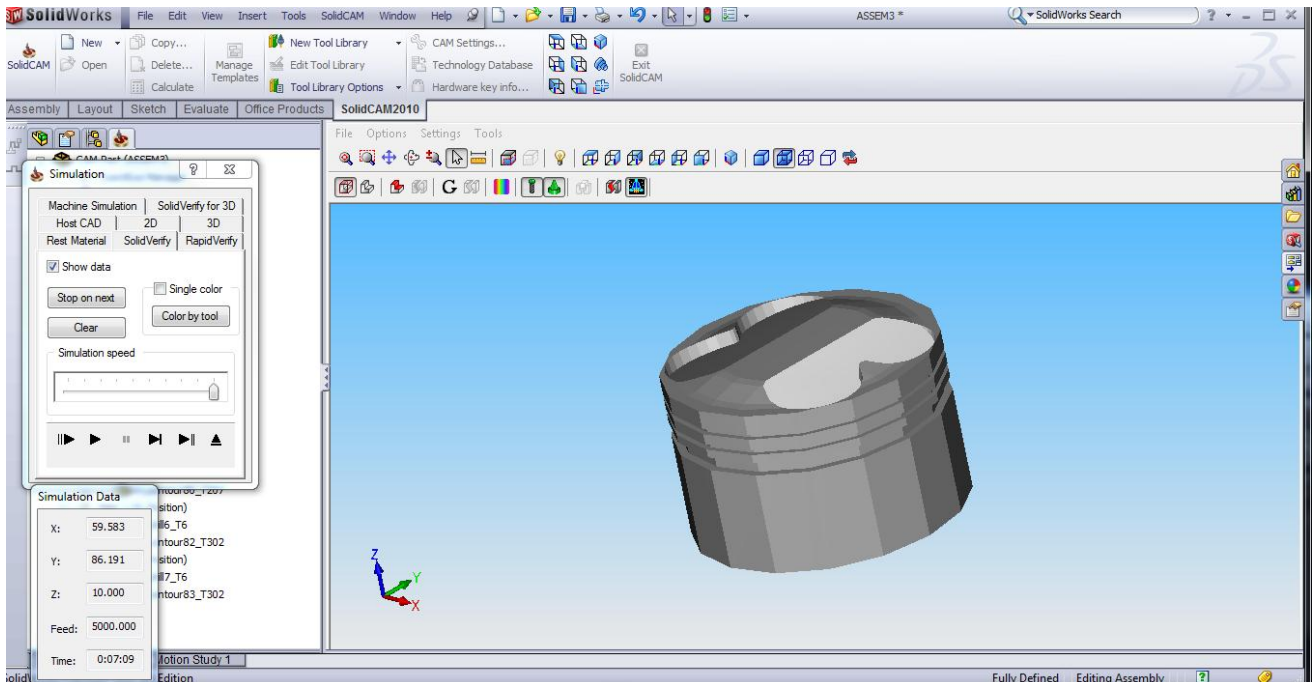
5.2 Χρόνοι εκχόνδρισης και αποπεράτωσης για στρατηγική τεχνολογίας περιγράμματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται εικόνες από στιγμιότυπα της κατεργασίας του αρχικού τεμαχίου του πιστονιού. Σε κάθε εικόνα παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα κάθε διαδικασίας και ο απαιτούμενος χρόνος αποπεράτωσης. Οι μέθοδοι επεξεργασίας που εφαρμόστηκαν είναι φρεζάρισμα με την τεχνική (contour) για τη δημιουργία της ποκέτας, της φούστας και του κάτω μέρος του πιστονιού, ενώ χρησιμοποιείται και διάτρηση για το άνοιγμα της οπής του πείρου. Το φινίρισμα και η βελτίωση της ποιότητας των επιφανειών των οπών ολοκληρώνεται με φρεζάρισμα με την τεχνική (contour).

5.2.1 Δημιουργία ποκέτας πιστονιού



Εικόνα 5.10: Δημιουργία του αριστερού μέρους της ποκέτας του πιστονιού

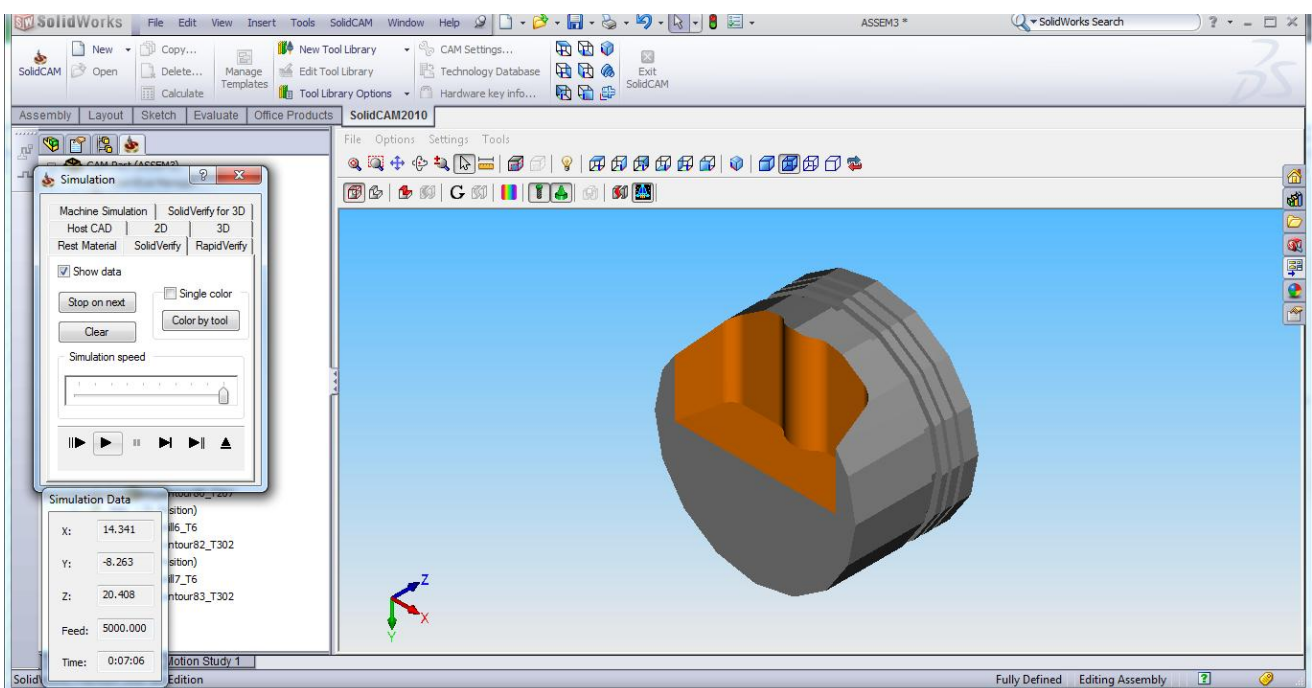


Εικόνα 5.11: Ολοκλήρωση της δεξιάς ποκέτας του πιστονιού

Λόγω του ότι η καταργασία των ποκέτων των βαλβίδων είναι μία τετραζονική καταργασία, ενώ το εργαστήριο των Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής

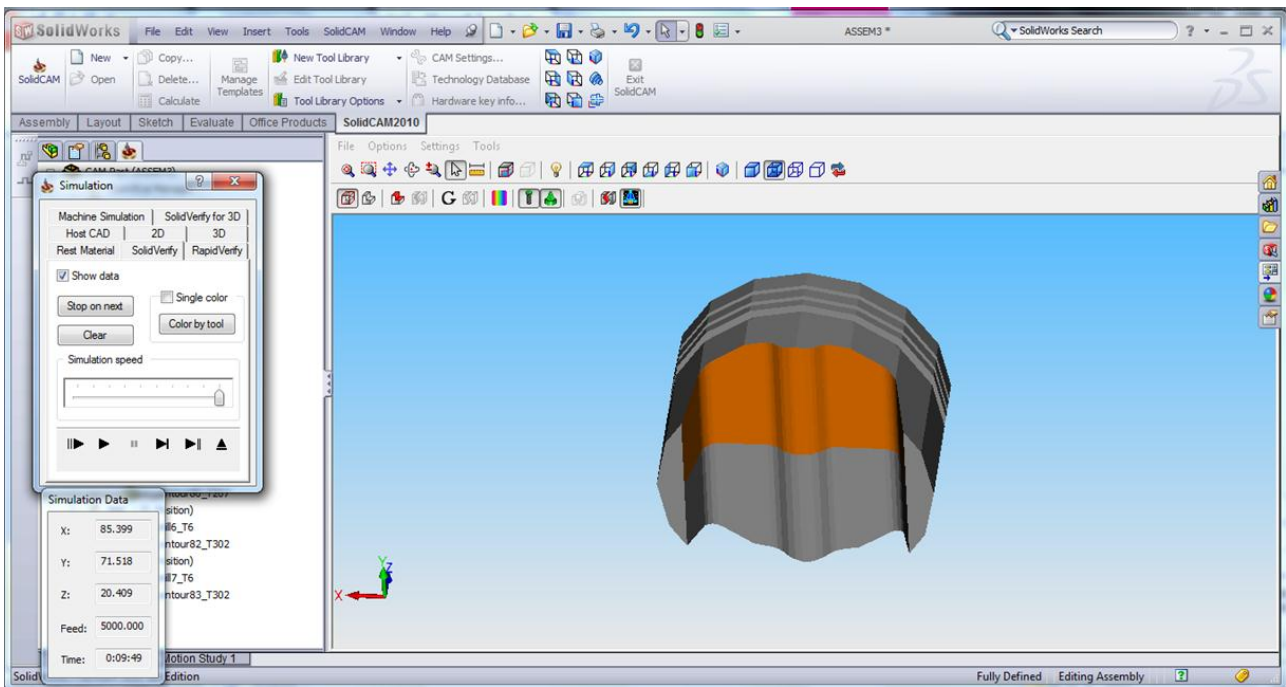
Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ δεν έχει μηχανές που να υποστηρίζουν τέτοιου είδους κατεργασίες, επιλέχθηκε η στρατηγική της εκχόνδρισης και της αποπεράτωσης να γίνει σε δύο φάσεις. Μία σε κλίση $+15^\circ$ κατά των άξονα Z, χρησιμοποιώντας τη μέγγενη που περιγράφεται στη Παράγραφο 4.5. Έπειτα θα πρέπει να περιστρέψουμε τη μέγγενη σε κλίση -15° πάλι κατά τον άξονα Z και να γίνει η κατεργασία της απέναντι ποκέτας. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίσαμε ότι το κοπτικό εργαλείο είναι πάντα κάθετο στην διεύθυνση κοπής.

5.2.2 Κατεργασία της φούστας του πιστονιού

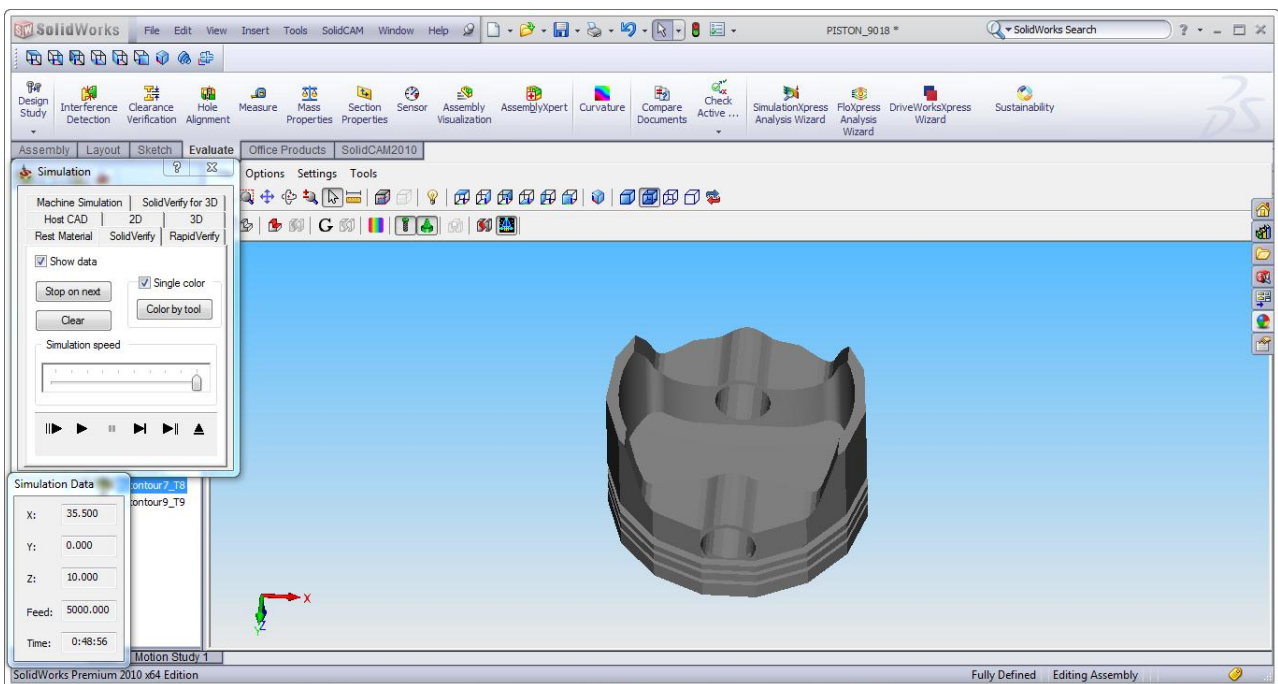


Εικόνα 5.12: Φρεζάρισμα της φούστας του πιστονιού με την τεχνική περιγράμματος

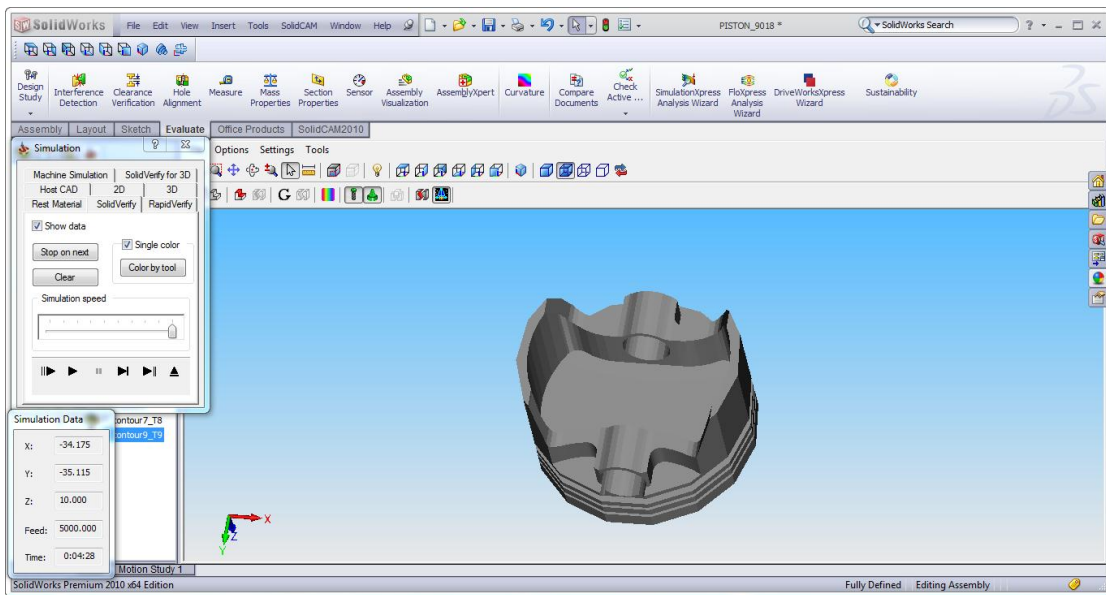
Η κατεργασία της φούστας του πιστονιού αποφασίστηκε να γίνει μισή-μισή. Λόγω του ότι το μήκος για αποπεράτωση είναι σχετικά μεγάλο, 90mm θα έπρεπε να επιλεγθεί κοπτικό εργαλείο με στέλεχος μεγαλύτερο από 90mm ώστε να αποφύγουμε να συγκρουστεί ο εργαλειοδέτης με τον τεμάχιο. Ακόμα και αν υπήρχε τόσο μακρύ εργαλείο, το βέλος κάμψης που θα παρουσίαζε το εργαλείο θα δημιουργούσε προβλήματα κατά την κοπή του δοκιμίου όπως διαστασιολογικές αποκλίσεις, κακή ποιότητα επιφανείας μέχρι και καταστροφή από σπάσιμο του κοπτικού εργαλείου. Έτσι λοιπόν κατεργαζόμαστε τη φούστα του πιστονιού μέχρι το μέσο της διαμέτρου της κεφαλής, έπειτα αλλάζουμε τη συγκράτηση του τεμαχίου και κατεργαζόμαστε το άλλο μισό.



Εικόνα 5.13: Ολοκλήρωση κατεργασίας της φούστας του πιστονιού



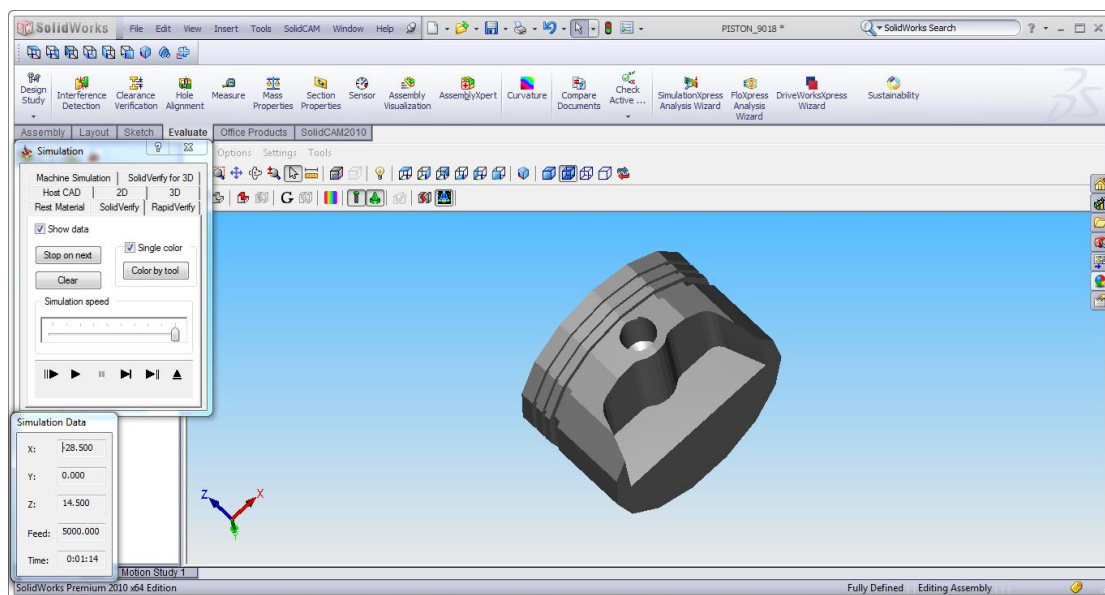
Εικόνα 5.14: Κατεργασία του κάτω μέρους του πιστονιού



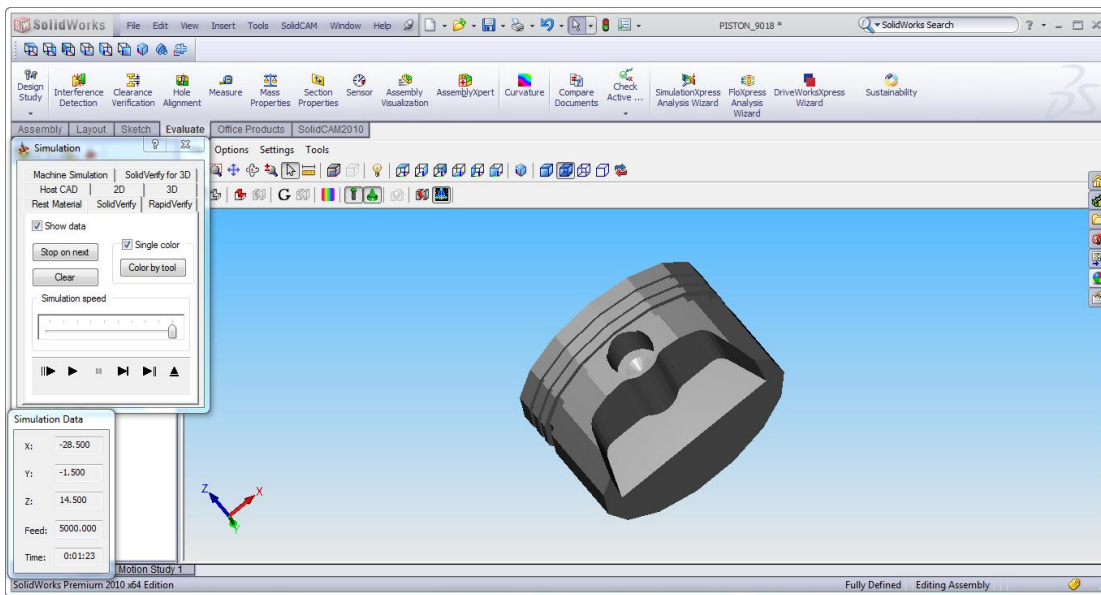
Εικόνα 5.15: Συνέχιση της διαδικασίας φρεζαρίσματος του κάτω μέρους του πιστονιού

5.2.3 Δημιουργία της οπής για τον πείρο του πιστονιού

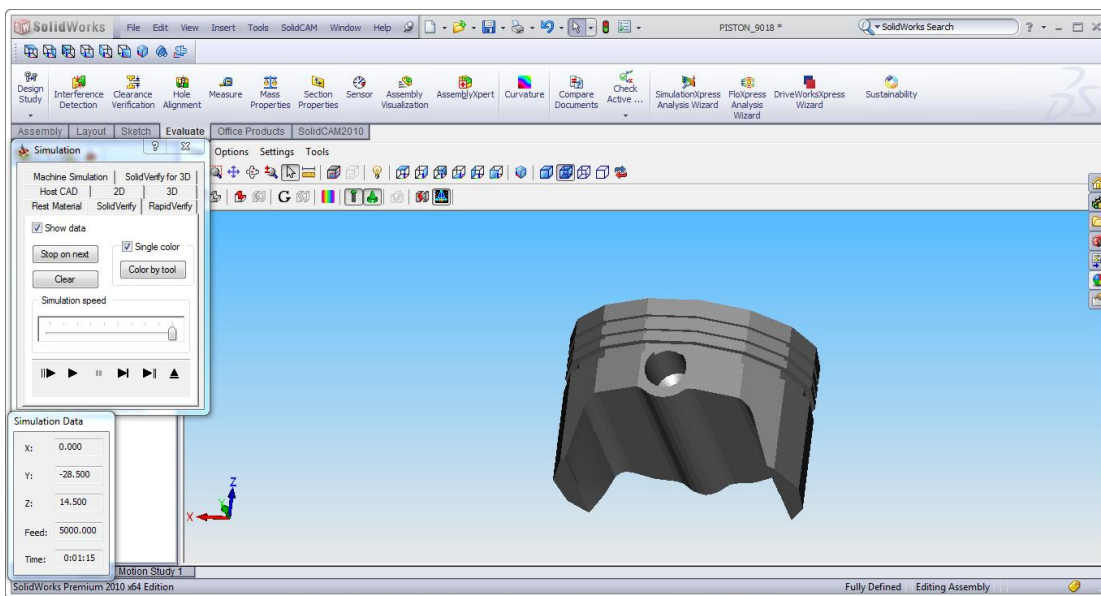
Με την ίδια τεχνική που κατεργαστήκαμε τη φούστα του πιστονιού, δηλαδή πρώτα από τη μία πλευρά και έπειτα αλλαγή προσανατολισμού και κατεργασία από την άλλη για την ολοκλήρωση, κατεργαστήκαμε και την οπή για τον πείρο. Λόγω του ότι η οπή δεν είναι διαμπερής αλλά συγκεκριμένου βάθους, ορίστηκε στην αντίστοιχη σελίδα του προγράμματος το βάθος κοπής. Ακόμα η οπή του πείρου θα μπορούσε να κατεργαστεί με κατεργασία boring, αλλά επειδή είναι πιο χρονοβόρα επιλέχθηκε τελικά να διανοιχτεί πρώτα η οπή με τρυπάνι και μετά να φινιριστεί με κονδύλι.



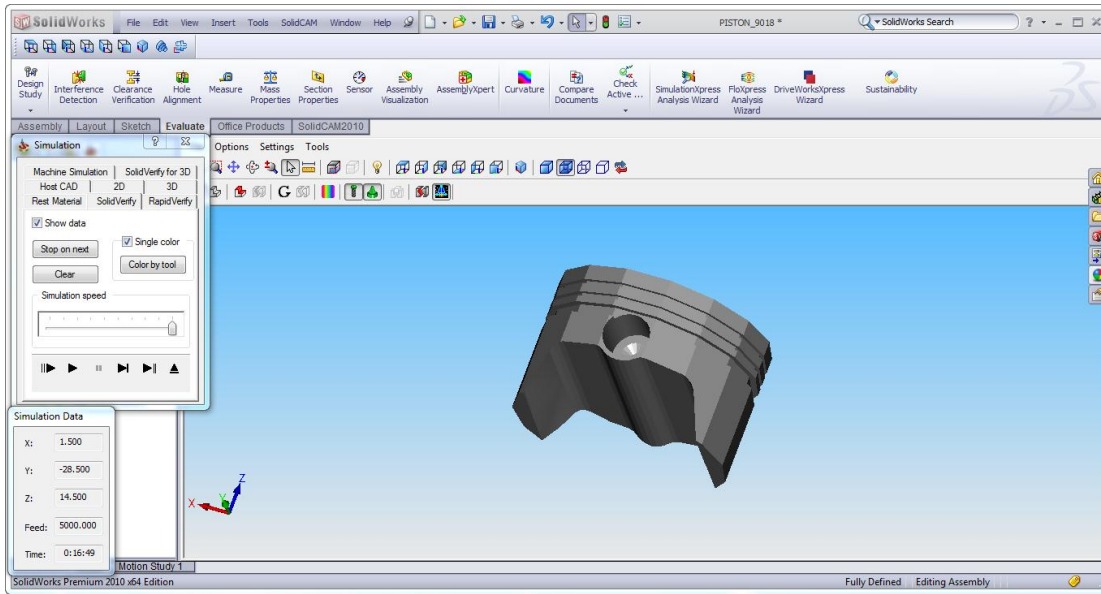
Εικόνα 5.16: Διαδικασία διάτρησης για τη δημιουργία της οπής του πείρου (για τη μια οπή)



Εικόνα 5.17: Κατεργασία φρεζαρίσματος της νεοδημιουργηθείσας οπής του πείρου για τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειάς της



Εικόνα 5.18: Δεύτερη διάτρηση για τη δημιουργία της άλλης οπής του πείρου



Εικόνα 5.19: Κατεργασία φρεζαρίσματος της δεύτερης οπής του πείρου για τη βελτίωση της ποιότητας επιφανείας της

5.3 Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών εκχόνδρισης και αποπεράτωσης του πιστονιού

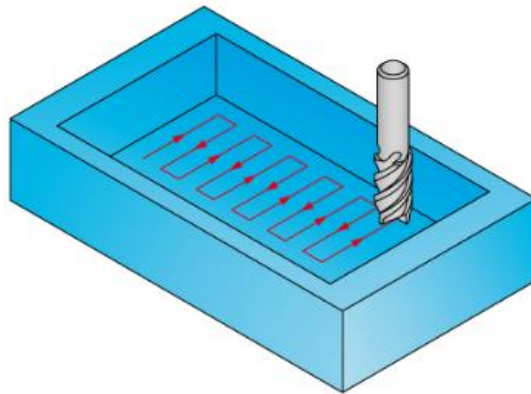
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός-Συγκριτικός πίνακας μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών

Strategy	Contour	Hatch	Hatch+ Finish
Tool Overlap	60%	60%	60%
	h:mm:ss	h:mm:ss	h:mm:ss
Contour_95	0:03:42	0:03:17	0:04:10
Contour_74	0:07:09	0:06:14	0:07:59
Contour_76	0:07:06	0:07:24	0:10:34
Contour_77	0:09:49	0:10:39	0:14:04
Contour_59	0:32:19	0:30:29	0:35:30
Contour_80	0:19:00	n/a	n/a
D_drill6	0:00:33	0:00:33	0:00:33
Contour_82	0:00:42	0:01:01	0:01:09
D_drill7	0:00:33	0:00:33	0:00:33
Contour_83	0:00:38	0:00:47	0:01:01
Total	1:20:34	1:18:55	1:33:36

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι απαιτούμενοι χρόνοι κατεργασίας για κάθε βήμα δημιουργίας του σχεδιασθέντος πιστονιού μας. Οι χρόνοι αυτοί αφορούν την τεχνολογία (contour). Έτσι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την αποπεράτωση του πιστονιού είναι 1:20:34.

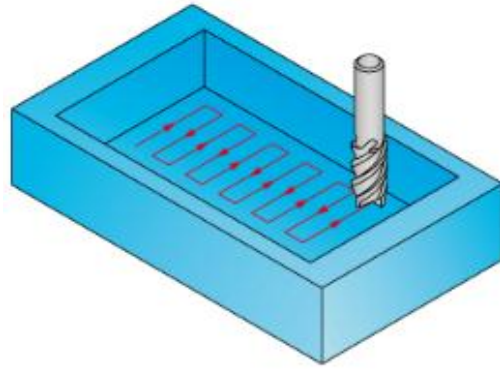
Για λόγους σύγκριση στον παραπάνω πίνακα έχουν συμπεριληφθεί και οι απαιτούμενοι χρόνοι κατεργασίας με δυο άλλες τεχνολογίες: (hatch) και συνδυασμό (hatch/finish).

Η συγκεκριμένη τεχνολογία κατεργάζεται την ποκέτα του τεμαχίου με γραμμικό μοτίβο κινήσεων, τύπου μαιάνδρου, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.20. Έτσι δημιουργείται μια γραμμική πορεία για το εργαλείο μέχρι τα όρια του περιγράμματος της ποκέτας. Η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά πιο γρήγορη από την αντίστοιχη του περιγράμματος (contour) μιας και απαιτεί μικρότερη διαδρομή για το εργαλείο. Μειονέκτημά της όμως είναι ότι έχει χαμηλή ποιότητας επιφάνειας, μιας και το τελικό αποτέλεσμα έχει προεξοχές και ατέλειες λόγω των διαδρομών του εργαλείου. Ο συνολικός χρόνος κατεργασίας είναι 1:18:55.

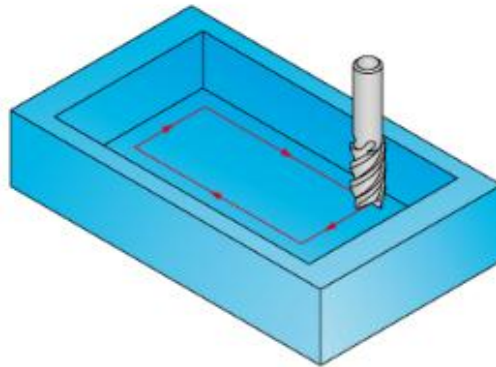


Εικόνα 5.20: Κατεργασία με την τεχνολογία (hatch)

Για τη βελτίωση της τεχνολογίας προστέθηκε και ένα τελικό στάδιο φινιρίσματος. Έτσι για τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας του τελικού τεμαχίου, το εργαλείο ακολουθεί μιας περιμετρική πορεία ώστε να αφαιρέσει τις προεξοχές από το περίγραμμα του πιστονιού. Τα προαναφερθέντα φαίνονται παραστατικά στην Εικόνα 5.21. Όπως είναι λογικό αυτό έχει αντίκτυπο στον συνολικό απαιτούμενο χρόνο κατεργασίας και αποπεράτωσης, καθώς απαιτούνται συνολικά 1:33:36.



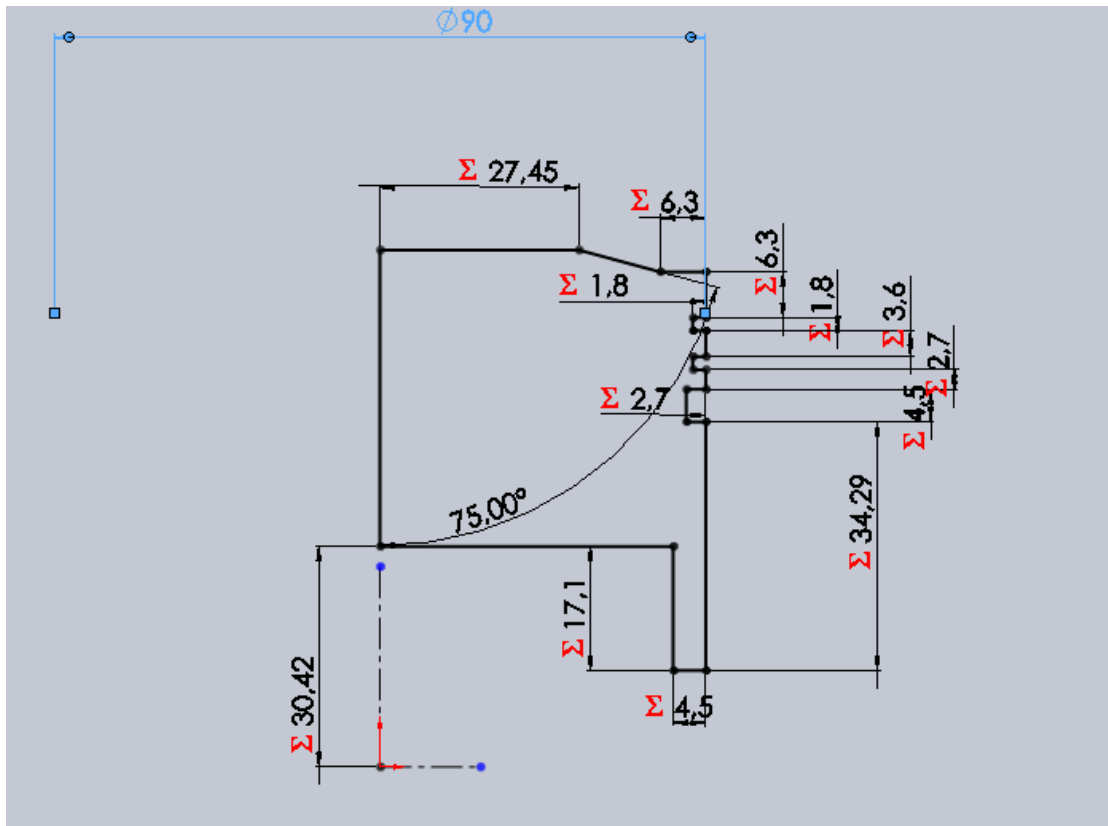
Hatching



Final profiling

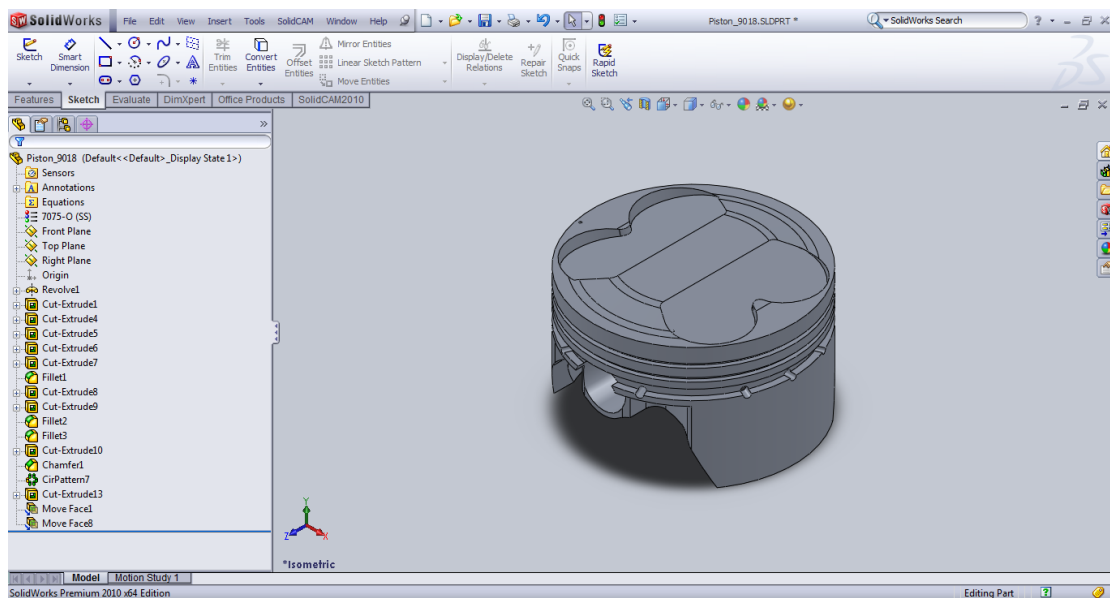
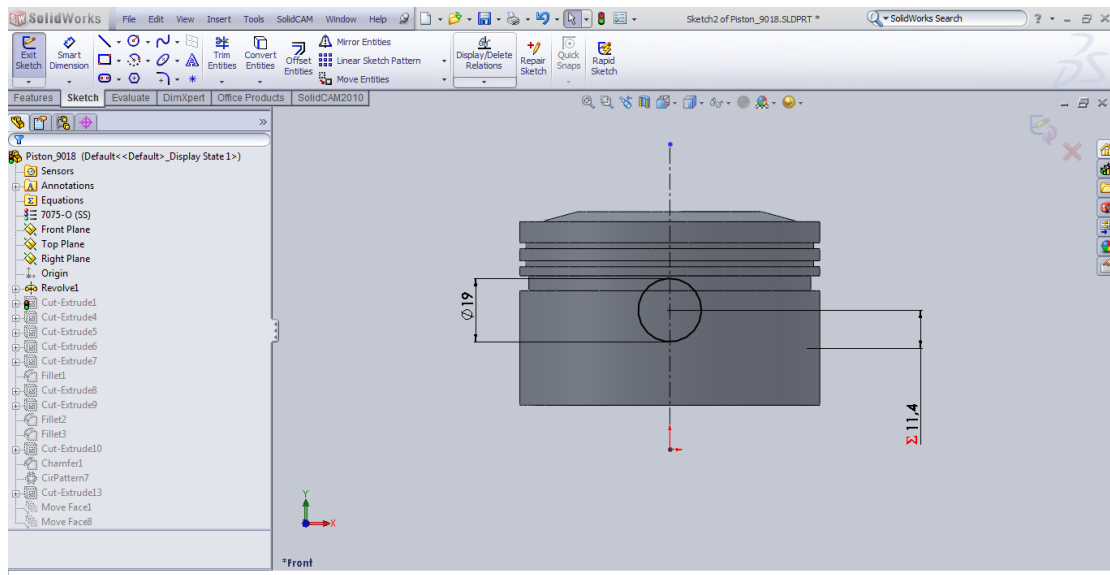
Εικόνα 5.21: Κατεργασία με την τεχνολογία ζ (hatch) και φινιρίσματος της επιφάνειας

5.4 Παραμετρικός ορισμός και προγραμματισμός κοπής πιστονιού 90mm

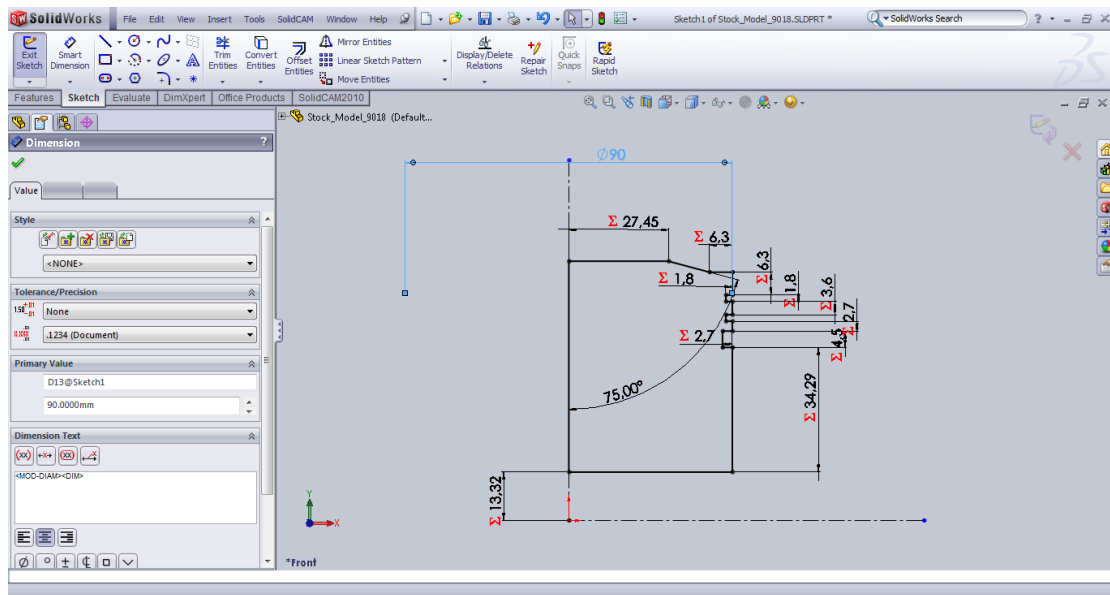


Εικόνα 5.22: Αλλαγή διαμέτρου κεφαλής εμβόλου

Αρχικά αλλάχθηκε η διάμετρος της κεφαλής του εμβόλου από 100mm σε 90mm. Επειδή το μοντέλο είναι ορισμένο παραμετρικά, δηλαδή όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις του είναι ορισμένες παραμετρικά σε σχέση με τη διάμετρο, μεταβλήθηκαν και αυτές. Η διάμετρος της οπής του πείρου επιλέχθηκε 19 mm.



Εικόνα 5.23: Τελική μορφή κεφαλής εμβόλου 90mm



Εικόνα 5.24: Αλλαγή διαμέτρου stock model

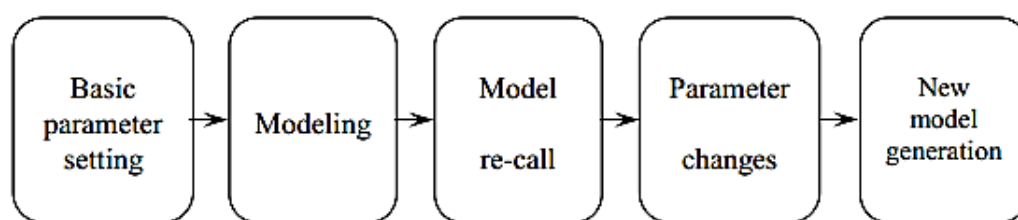
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Η έννοια του παραμετρικού σχεδιασμού αναφέρεται σε μεθόδους χρήσης του υπολογιστή για την κατασκευή πολύπλοκων κατά κανόνα γεωμετριών με οικονομικό τρόπο. Αυτό γίνεται με την παραμετροποίηση αυτών των κατασκευών σε εξειδικευμένα προγράμματα και την εξάρτηση των μερών τους από το σύνολο των τμημάτων με συγκεκριμένους συσχετισμούς. Σε ένα τέτοιο παραμετρικό μοντέλο οι αλλαγές που γίνονται στη γεωμετρία του, «ενημερώνουν» αυτόματα τις γεωμετρίες κατώτερων ιεραρχικά στοιχείων, ενώ αυτοματοποιείται και η προσαρμογή της ίδιας λεπτομέρειας σε διαφορετικές συνθήκες.

Εφ' όσον βρισκόμαστε στο περιβάλλον του υπολογιστή, το Output του παραμετρικού μοντέλου μπορεί να είναι η πληροφορία που χρειάζονται μηχανές καθοδηγούμενες από υπολογιστή (CNC) για να κατασκευάσουν τη δεδομένη γεωμετρία.

Συνεπώς η μορφή εμπεριέχεται μέσα στο ίδιο το παραμετρικό μοντέλο, καθώς επίσης και οι δυνάμει παραλλαγές της και οι οδηγίες κατασκευής κάθε μιας από αυτές.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία (μέθοδος) χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία και δίνει την ευελιξία παραγωγής προϊόντων, που καλύπτουν τις ανάγκες των εκάστοτε πελατών (custom solutions).



Εικόνα 6.1: Βασικά βήματα των παραμέτρων μοντελοποίησης

Η επιλογή του προγραμματισμού σε περιβάλλον CAM κρίθηκε αναγκαία για την συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της πολυπλοκότητας του κομματιού. Σε συνδυασμό με την παραμετροποίηση που έγινε νωρίτερα προσφέρει ένα πολύ ανταγωνιστικό πακέτο σε σχέση με πιο παραδοσιακές μεθόδους, οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Προγραμματισμός μοναδικού G κώδικα για πιστόνι συγκεκριμένης διαμέτρου
- 2) Προγραμματισμός μοναδικού CAM προγράμματος για πιστόνι συγκεκριμένης διαμέτρου
- 3) Σχεδιασμός πιστονιού της συγκεκριμένης διαμέτρου με κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα και παραγωγή του με τη μέθοδο χύτευσης
- 4) Σχεδιασμός πιστονιού της συγκεκριμένης διαμέτρου με κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα και παραγωγή του με τη μέθοδο της σφυρηλάτησης

Κρίνοντας κατά περίπτωση, μια βιομηχανική μονάδα, η οποία παράγει μια γκάμα διαστάσεων για το συγκεκριμένο πιστόνι, επιβάλλεται να χρησιμοποιήσει τον συνδυασμό παραμετροποίησης – προγραμματισμού CAM. Αυτό φαίνεται στη σύγκριση, ανά βήμα των παραμέτρων μοντελοποίησης, των αναφερθέντων μεθόδων.

Στην περίπτωση 1) απαιτείται αρχικά δημιουργία ενός κώδικα G για τη σχεδίαση του πιστονιού. Αυτό είναι φυσικά πιο εύκολο με το Solidworks. Η αρχική σχεδίαση, όπως προτείνεται στην παρούσα διπλωματική, φαίνεται πολυπλοκότερη αφού χρειάζεται γνώση περισσότερων προγραμμάτων (Solidworks, DriveworksXpress).

Στην πράξη, το γεγονός ότι χρησιμοποιείται οπτική μέθοδο διεπαφής (φαίνεται άμεσα τι δημιουργείται) σε σχέση με τον G κώδικα, που απαιτεί αντίστοιχα την δημιουργία κειμένου και σε δεύτερο χρόνο επιβεβαίωση για το τι εκφράζει αυτός, κάνει τον αρχικό σχεδιασμό, τελικά, πιο εύκολη διαδικασία. Επίσης τα λάθη περιορίζονται, αφού μέσω των συσχετίσεων, το Solidworks σε κάθε βήμα της σχεδίασης ειδοποιεί το χρήστη για τυχόν σφάλματα, τα οποία διορθώνονται επί τόπου.

Στην παραμετροποίηση του κομματιού, πάλι η παρούσα μέθοδος είναι προτιμότερη αφού αυτή γίνεται στοχευμένα μέσω του Xdrivexpress, αντίθετα με τον G κώδικα που απαιτεί πολύωρη αναζήτηση (ειδικά σε μεγάλους κώδικες) στο κείμενο του για να εντοπιστεί το σημείο που χρειάζεται η αλλαγή παραμετροποίησης.

Επίσης το Solidworks διατηρεί πάντα τις σχέσεις παραμετροποίησης, μέσω του DriveworksXpress, χωρίς να χρειάζεται να γίνει εκ νέου, όπως στο G κώδικα (όπου απαιτείται επιστροφή του χρήστη στον G κώδικα, για διορθώσεις, ή αλλαγές σε συγκεκριμένα σημεία, όπου ο χρόνος εντοπισμού των σημείων

αυτών είναι αρκετός, ειδικά για μεγάλους κώδικες), ενώ αντίθετα στην παρούσα μέθοδο η δημιουργία των παραμετροποιημένων κομματιών απαιτεί αναλογικά ελάχιστο χρόνο (με αλλαγή τιμών σε προκαθορισμένες θέσεις στο DriveworksXpress).

Στην περίπτωση 2) δεν υπάρχουν διαφορές σχετικά με την αρχική σχεδίαση του πιστονιού, ως προς την πρώτη περίπτωση. Όμως η κατασκευή των διαφορετικής διαμέτρου πιστονιών βασίζεται εξ ολοκλήρου στη δημιουργία του πιστονιού από την αρχή, καθώς δεν υφίσταται παραμετροποίηση.

Οποιαδήποτε μεταβολή στις γεωμετρικές διαστάσεις του υπάρχοντος πιστονιού (ακόμα και μόνο μια διάσταση) επιβάλλει την εξ' αρχής σχεδίαση του πιστονιού, γιατί οι συσχετίσεις μέσω των «RELATIONS» που έχουν τα σχεδιαστικά εργαλεία του προγράμματος (Solidworks) καταστρέφουν το σχέδιο. Η συσχέτιση του σχεδίου χάνεται με την δημιουργία υλικού αντικειμένου (εδώ το πιστόνι) με δεδομένα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Στην οθόνη του H/Y εμφανίζονται σχέδια χωρίς πρακτικό αντίκρισμα.

Στην περίπτωση 3) αφού σχεδιαστεί το πιστόνι με κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, έχουμε στην συνέχεια μια εντελώς ασύμφορη από οικονομικής άποψης διαδικασία, που αφορά την δημιουργία των καλουπιών για την χύτευση του πιστονιού. Τα καλούπια αυτά είναι άχρηστα μετά από κάθε χύτευση, οπότε χρειάζονται συνεχώς καινούργια.

Και εδώ συνυπολογίζεται το πρόβλημα της μη παραμετροποίησης του πιστονιού για τις διαφορετικές εκδόσεις του, όπου χρειάζεται επανασχεδιασμός του, και φυσικά, νέα καλούπια για την παραγωγή των πιστονιών.

Επίσης σε ειδικές περιπτώσεις, όπως είναι το πιστόνι που εξετάζει αυτή η διπλωματική, απαιτείται σε συγκεκριμένα σημεία του ειδική κατεργασία λείανσης από εργαλειομηχανές, λόγω της λειτουργίας του. Τα σημεία αυτά είναι οι υποδοχές των ελατηρίων, η θέση στήριξης του πείρου για τον διωστήρα, οι θέσεις των βαλβίδων κ.λ.π. Αυτό γίνεται γιατί η χύτευση δεν επιτυγχάνει το επίπεδο ομαλότητας των συγκεκριμένων επιφανειών ώστε το πιστόνι να λειτουργεί ,ως μέρος της μηχανής με τον ιδανικό, κατά τον κατασκευαστή, τρόπο. Η απαίτηση αυτή αυξάνει κι άλλο το χρόνο αλλά και το κόστος για τη δημιουργία του παραμετροποιημένου πιστονιού.

Στην περίπτωση 4) υπάρχει ένα πλεονέκτημα έναντι της αναφερόμενης μεθόδου της παρούσας εργασίας, αλλά εμφανίζεται αποκλειστικά στο τελικό στάδιο της παραγωγής των παραμετροποιημένων πιστονιών. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζεται στο στάδιο όπου η βιομηχανία έχει καταλήξει σε

κάποια μεγέθη ως προς το τελικό προϊόν και αρχίζει την μαζική-βιομηχανική παραγωγή τους, όπου σίγουρα η μέθοδος της σφυρηλάτησης είναι πιο οικονομική και γρήγορη για την δημιουργία του αρχικού τύπου του τελικού κομματιού.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και η σφυρηλάτηση δεν έχει την ακρίβεια στην κατεργασία του τεμαχίου που δίνει μια εργαλειομηχανή όπως συμβαίνει με την περίπτωση 3.

Γι' αυτό πάντα και τα σφυρήλατα πιστόνια περνούν από κατεργασία, μικρή ή μεγάλη, σε εργαλειομηχανές ανάλογα την χρήση τους, π.χ. μικρή όταν αφορά κινητήρες για αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής, ενώ πολύ μεγαλύτερη για ειδικές εκδόσεις ή αγωνιστικούς κινητήρες. Και σ' αυτή την περίπτωση, όμως, η σφυρηλάτηση έχει το πρόβλημα της παραμετροποιημένης σχεδίασης του πιστονιού, αφού η πρέσα δημιουργεί μόνο ένα μέγεθος αυτού, ενώ το κόστος αλλαγής της κατάλληλης πρέσας για διαφορετικών διαστάσεων πιστόνια δεν είναι μικρό .

Άρα, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να υπάρξει ως αυτόνομη στην δημιουργία παραμετροποιημένων πιστονιών, αλλά σαν επικουρική κατά την μαζική παραγωγή τους.

Καταδεικνύεται τελικά ότι, με εξαίρεση την περίπτωση 4, η εξεταζόμενη μέθοδος είναι η καλύτερη στο κομμάτι της σχεδίασης-παραμετροποίησης αποκλειστικά στο κομμάτι, όσον αφορά την δημιουργία του ζητηθέντος πιστονιού σε βιομηχανική παραγωγή. Είναι σημαντικό ότι δεν απαιτείται εκ νέου σχεδίαση της νέας έκδοσης του υπάρχοντος πιστονιού.

Αφού σχεδιάστηκε μια φορά, έχοντας ορίσει τον τρόπο κατασκευής με τις κατάλληλες συσχετίσεις μέσα από το CAM μέρος του προγράμματος, μέσω του DriveworksXpress, δημιουργείται κάθε μορφής πιστόνι εύκολα, γρήγορα και χωρίς την εμπλοκή του χρήστη.

Το μόνο που χρειάζεται είναι να δοθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του νέου πιστονιού (τιμές των διαστάσεων), πράγμα που δεν αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία.

Από τις παραπάνω περιπτώσεις καταδεικνύεται ότι ο προγραμματισμός σε περιβάλλον CAM με παραμετροποίηση προσφέρει ένα πολύ ανταγωνιστικό πακέτο σε σχέση με πιο παραδοσιακές μεθόδους σε όλο το φάσμα σχεδιαστικών διαδικασιών που απαιτούνται.

Παράρτημα Α

Πίνακας Ι: Επιλογή των στροφών του εργαλείου βάσει της κατηγορίας του υλικού



Material group	Classification of the main material groups and code letters		Brinell hardness HB	Tensile strength Rm N/mm ²	Machining group ¹	Cutting tool material					
						Solid carbide					
						Family	Dia.	λ	Flute		
						AL 30	H607811	30°	E 106		
						AL 25 short H602861 25° E 160 H6028818 E 160					
						Dia. 2 – 20					
						Z = 2					
						uncutted + TAX					
						v ₀ / D _c		VT			
						1/1	1/2	1/10			
P	Unalloyed steel	C ≤ 0,25 %	annealed	125	628	P1					
		C > 0,25... ≤ 0,55 %	annealed	190	639	P2					
		C > 0,25... ≤ 0,55 %	tempered	210	708	P3					
		C > 0,55 %	annealed	190	639	P4					
		C > 0,55 %	tempered	300	1013	P5					
	Free cutting steel (short-chipping)		annealed	220	745	P6					
	Low-alloyed steel			annealed	175	591	P7				
				tempered	300	1013	P8				
				tempered	360	1282	P9				
				tempered	430	1477	P10				
		annealed	200	675	P11						
High-alloyed steel and high-alloyed tool steel		hardened and tempered		300	1013	P12					
		hardened and tempered		400	1361	P13					
Stainless steel		ferritic / martensitic, annealed		200	675	P14					
		martensitic, tempered		330	1114	P15					
M	Stainless steel		austenitic, quench hardened		200	675	M1				
			austenitic, precipitation hardened (PH)		300	1013	M2				
			austenitic / ferritic, duplex		230	778	M3				
K	Malleable cast iron		ferritic		200	675	K1				
			pearlitic		260	867	K2				
	Grey cast iron		low tensile strength		180	602	K3				
			high tensile strength / austenitic		245	825	K4				
	Cast iron with spheroidal graphite		ferritic		155	518	K5				
		pearlitic		215	885	K6					
GGV (CGI)				200	675	K7					
N	Aluminium wrought alloys		cannot be hardened		30	–	N1	1120	1480	2050	C
			hardenable, hardened		100	343	N2	1250	1590	2050	L
	Cast aluminium alloys		≤ 12 % Si, not hardenable		75	250	N3	680	630	850	C
			≤ 12 % Si, hardenable, hardened		90	314	N4	680	630	850	C
			> 12 % Si, not hardenable		130	447	N5	160	210	300	L
Magnesium alloys				70	250	N6	550	680	970	C	
Copper and copper alloys (brasses / bronzes)		unalloyed, electrolytic copper		100	343	N7	320	430	610	C	
		Brass, bronze, red brass		90	314	N8	320	430	610	L	
		Cu alloys, short-chipping		110	382	N9	350	430	610	C	
		high-strength, Ampco		300	1013	N10	50	70	90	C	
S	Heat-resistant alloys		Fe-based		annealed	200	675	S1			
					hardened	260	843	S2			
			Ni or Co base		annealed	250	839	S3			
					hardened	350	1177	S4			
			cast		320	1076	S5				
Titanium alloys		Pure titanium		200	675	S6					
		α and β alloys, hardened		375	1262	S7					
		β alloys		410	1396	S8					
Tungsten alloys				300	1013	S9					
Molybdenum alloys				300	1013	S10					
H	Hardened steel		hardened and tempered		50 HRC	–	H1				
			hardened and tempered		55 HRC	–	H2				
			hardened and tempered		60 HRC	–	H3				
			hardened and tempered		55 HRC	–	H4				
Hardened cast iron				55 HRC	–	H4					
O	Thermoplasts		without abrasive fillers				O1	280	340	490	C
	Thermosetting plastics		without abrasive fillers				O2	130	170	240	C
	Plastic, glass-fibre reinforced		GFRP				O3				
	Plastic, carbon-fibre reinforced		CFRP				O4				
	Plastic, aramid-fibre reinforced		AFRP				O5				
	Graphite (technical)				80 Shore		O6				

¹ The machining groups are assigned from page H.8.

Πίνακας II: Επιλογή της επιθυμητής πρόωσης συναρτήσει του βάθους κοπής και ανάλογα με το υλικό κατεργασίας

C Material groups ISO N and ISO O

a_p [mm]*	Feed per tooth f_z [mm]										
	Dia. 0.3 mm	Dia. 0.5 mm	Dia. 1 mm	Dia. 2 mm	Dia. 3 mm	Dia. 4 mm	Dia. 6 mm	Dia. 8 mm	Dia. 10 mm	Dia. 12 mm	Dia. 14 mm
0,01	0,04	0,04	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,33	0,44		
0,05	0,03	0,03	0,06	0,09	0,15	0,22	0,26	0,33	0,44		
0,1	0,02	0,03	0,04	0,08	0,11	0,18	0,22	0,33	0,44	0,44	0,44
0,2	0,02	0,02	0,03	0,07	0,09	0,13	0,18	0,33	0,40	0,44	0,44
0,5		0,02	0,03	0,06	0,07	0,11	0,15	0,26	0,33	0,33	0,33
1			0,02	0,06	0,07	0,09	0,13	0,20	0,26	0,26	0,26
2				0,04	0,07	0,07	0,11	0,18	0,24	0,26	0,26
3					0,04	0,06	0,10	0,17	0,23	0,26	0,26
5						0,04	0,09	0,15	0,22	0,26	0,26
6							0,07	0,13	0,18	0,22	0,22
8								0,11	0,15	0,20	0,22
10									0,13	0,18	0,22
12										0,15	0,20
14											0,18
16											
18											
20											
25											
32											
40											
50											
63											
80											
100											
160											
200											

C (continued)

a_p [mm]*	Feed per tooth f_z [mm]											
	Dia. 16 mm	Dia. 18 mm	Dia. 20 mm	Dia. 25 mm	Dia. 32 mm	Dia. 40 mm	Dia. 50 mm	Dia. 63 mm	Dia. 80 mm	Dia. 100 mm	Dia. 160 mm	Dia. 200 mm
0,01												
0,05												
0,1	0,44											
0,2	0,44	0,44	0,50									
0,5	0,33	0,44	0,50	0,50								
1	0,26	0,33	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
2	0,26	0,33	0,44	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
3	0,26	0,30	0,39	0,44	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
5	0,26	0,26	0,33	0,44	0,44	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
6	0,26	0,26	0,33	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
8	0,26	0,26	0,33	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,55	0,55	0,55	0,55
10	0,26	0,26	0,31	0,35	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50	0,55	0,55
12	0,24	0,26	0,31	0,35	0,35	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50	0,50
14	0,22	0,26	0,29	0,33	0,35	0,35	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50
16	0,20	0,22	0,26	0,33	0,33	0,35	0,35	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
18		0,22	0,24	0,29	0,33	0,33	0,35	0,35	0,44	0,44	0,44	0,44
20			0,22	0,26	0,29	0,33	0,33	0,35	0,35	0,44	0,44	0,44
25				0,22	0,26	0,29	0,33	0,33	0,35	0,35	0,44	0,44
32					0,22	0,26	0,29	0,33	0,33	0,35	0,35	0,44
40						0,22	0,26	0,29	0,33	0,33	0,35	0,35
50							0,22	0,26	0,29	0,33	0,33	0,35
63								0,22	0,26	0,29	0,33	0,33
80									0,22	0,26	0,29	0,33
100										0,22	0,26	0,29
160											0,22	0,26
200												0,22

*radial feed in mm.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας III: Τύποι υπολογισμού για κατεργασία φρεζαρίσματος

Milling calculation formulae

Speed

$$n = \frac{v_s \times 1000}{D_c \times \pi} \quad [\text{min}^{-1}]$$

Cutting speed

$$v_s = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Feed rate

$$v_f = f_z \times z \times n \quad [\text{mm/min}]$$

Feed per tooth

$$f_z = \frac{v_f}{z \times n} \quad [\text{mm/z}]$$

Metal removal rate

$$Q = \frac{a_p \times a_p \times v_f}{1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

Power requirement

$$P_{\text{req}} = \frac{K_p \times K_a \times \eta \times K_c}{6 \times 10^7 \times \eta} \quad [\text{kW}]$$

Medium chip thickness

$$h_{m1} = \frac{(114,7 \times f_z \times \sin \alpha \times (a_p / D_c))}{\varphi_a} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m \times \varphi_a}{114,7 \times \sin \alpha \times (a_p / D_c)} \quad [\text{mm}]$$

or

$$h_m = f_z \times \sqrt{\frac{K_a}{D_c}} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m}{\sqrt{\frac{K_a}{D_c}}} \quad [\text{mm}]$$

as approximation formula for $a_p, D_c < 32\%$

Engagement angle

where cutter is positioned centrally

$$\varphi_a = 2 \times \arcsin \left(\frac{a_p}{D_c} \right) \quad [^\circ]$$

where cutter is positioned eccentrically

$$\varphi_a = 90^\circ + \arcsin \frac{a_p - (D_c / 2)}{D_c / 2} \quad [^\circ]$$

Specific cutting force

$$K_c = \frac{1 - 0,01 \times \frac{v_s}{h_m}}{h_m^{0,6}} \times K_{c1,1} \quad [\text{N/mm}^2]$$

n	Speed	rpm
D_c	Cutter diameter	mm
a_p	Depth of cut	mm
a_p	Width of cut	mm
z	Number of teeth	-
v_s	Cutting speed	m/min
v_f	Feed rate	mm/min
f_z	Feed per tooth	mm
Q	Metal removal rate	cm ³ /min
P_{req}	Drive power	kW
h_m	Medium chip thickness	mm
K_c	Specific cutting force	N/mm ²
η	Efficiency of machine (0,7-0,95)	-
α	Approach angle	-
φ_a	Engagement angle	-
φ_u	Up-cut milling area	-
φ_s	Synchronous milling area	-
K_c	Specific cutting force	N/mm ²
$K_{c1,1}$	Specific cutting force for 1 mm ³ chip cross section	N/mm ²
$\eta_{c,1}$	Increase in the K_c curve	-
y	Reverse engagement	mm

* $\eta_{c,1}$ and $K_{c1,1}$ see table on page 47

Πίνακας IV: Τύποι υπολογισμού για κατεργασία διάτρησης

Drilling calculation formulae

Speed

$$n = \frac{v_c \times 1000}{D_c \times \pi} \quad [\text{rpm}]$$

Cutting speed

$$v_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Feed per revolution

$$f = f_z \times z \quad [\text{mm}]$$

Feed rate

$$v_f = f \times n \quad [\text{mm/min}]$$

Metal removal rate (drilling)

$$Q = \frac{v_f \times \pi \times D_c^2}{4 \times 1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

Power requirement

$$P_{\text{req}} = \frac{Q \times k_c}{60000 \times \eta} \quad [\text{W}]$$

Torque

$$M_c = \frac{D_c^2 \times k_c \times f}{8000} = \frac{P_c \times 9550}{n} \quad [\text{Nm}]$$

Feed force

$$F_f = 0.83 \times \frac{f \times D_c \times k_c}{2} \quad [\text{N}]$$

Specific cutting force

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^{1/\alpha}}$$

Chip thickness

$$h = f_z \times \sin \alpha \quad [\text{mm}]$$

The top diagram illustrates a single-flute drill bit cutting a hole in a workpiece. The cutting speed is denoted as v_c and the rotation as n . The bottom diagram shows a double-flute drill bit cutting a hole. The cutting speed is v_f , rotation is n , axial force is F_x , and feed rate is f .

n	Speed	rpm
D_c	Drill diameter	mm
z	Number of teeth	
v_c	Cutting speed	m/min
v_f	Feed rate	mm/min
f_z	Feed per tooth	mm
f	Feed per revolution	mm
A	Chip cross section	mm ²
Q	Metal removal rate	cm ³ /min
P_{req}	Drill power	W
M_c	Torque	Nm
F_f	Axial force	N
h	Chip thickness	mm
k_c	Specific cutting force	N/mm ²
η	Efficiency of machine (0.7 – 0.85)	
α	Approach angle	-
$k_{c1.1}^*$	Specific cutting force for 1 mm ² chip cross section with $h = 1$ mm	N/mm ²
α_c^*	Increase in the k_c curve	

* $k_{c1.1}$ and α_c see table on page 117