

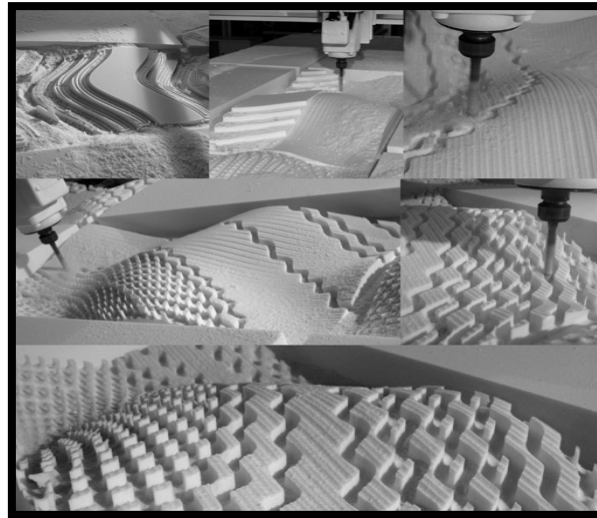


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

**Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων
& Εργαλείων - Αντίστροφου Σχεδιασμού**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΜΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑ ΦΡΕΖΑ CNC**

*Διπλωματική Εργασία
Χαράλαμπος Βάρελης*



Επίβλεψη: Σ. Διπλάρης

ΑΘΗΝΑ 2009

Ευχαριστίες

Καταρχήν θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Θεόδωρο Βάρελη, εκπαιδευτικό (Θεολόγο, Ψυχολόγο) , Δρ. Παιδαγωγικής Ψυχολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών και τη μητέρα μου Δέσποινα Παπακώστα Βάρελη, εκπαιδευτικό (Δασκάλα, Θεολόγο) καθώς και τις αδελφές μου για την αμέριστη και συνεχή συμπαράσταση τους, την ψυχολογική στήριξη και καθοδήγησή τους καθ' όλη τη διάρκεια της μαθητικής και πανεπιστημιακής μου εκπαίδευσης.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Στέφανο Διπλάρη, που με την επιστημονική του κατάρτιση και τον εύστοχο τρόπο διδασκαλίας του, με οδήγησε στο να αντιληφθώ τον τρόπο σκέψης που οφείλει να έχει ένας Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός. Τον ευχαριστώ επίσης και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο χειρισμό του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων της σχολής μας για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την εμπειριστατωμένη του καθοδήγηση, τις εύστοχες υποδείξεις και οδηγίες κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιθυμώ να εκφράσω την άπειρη εκτίμηση μου, στους καθηγητές μου και μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κυρίους κυρίους Ευάγγελο Παπαδόπουλο και Θεόδωρο Κωστόπουλο.

Θέλω να αναφερθώ και να ευχαριστήσω το Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π κύριο Γεώργιο Καϊσαρλή, ειδικό στη χρήση της μηχανής CMM DEA Mistral που έχει στη διάθεσή του το εργαστήριο Τ.Κ.Π & Εργαλείων του Ε.Μ.Π, για τη λήψη μετρήσεων και για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επίσης ευχαριστώ και το Διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π κύριο Θεόδωρο Βασιλόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του στη λήψη μετρήσεων με τη μηχανή FARO ARM PLATINUM και για τις τεχνικές συμβουλές του όσον αφορά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το Διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π κύριο Σταμάτη Πολύδωρα για την αμέριστη και διαρκή συμπαράστασή του κατά τη διάρκεια της παραμονής μου στο Εργαστήριο Τ.Κ.Π του Ε.Μ.Π, για τη μεστή και εμπειριστατωμένη επιστημονική και τεχνική καθοδήγησή του στην περιοχή της Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων (Τ.Κ.Π). Τον ευχαριστώ ιδιαίτερος τόσο για την σε εύρος όσο και δυσκολία επιμέλεια των κειμένων της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

Χαράλαμπος Βάρελης

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Κατασκευή πρωτοτύπων με 3-αξονική επιτραπέζια φρέζα CNC» εκπονήθηκε στο θεσμοθετημένο «Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων (ΤΚΠ & Ε)» της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του Μαθήματος «Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ».

Πέραν των συγκεκριμένων ειδικών στόχων της εργασίας που αναφέρονται παρακάτω στο σχετικό Κεφάλαιο, θα μπορούσε ευρύτερα να λεχθεί ότι η παρούσα εργασία συνεισέφερε στην περαιτέρω ενίσχυση των δυνατοτήτων του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε στο επίπεδο της κατασκευής πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού, στην καλύτερη κατανόηση και βέλτιστη αξιοποίηση του σχετικού εγκατεστημένου εξοπλισμού, αλλά και στην ομαλή ένταξη του εξοπλισμού αυτού στις εκπαιδευτικές, ερευνητικές και άλλες δραστηριότητες του Εργαστηρίου.

Η δομή της εργασίας έχει ως ακολούθως:

- Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή και εντοπίζονται οι στόχοι της εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 2, τίθεται ολοκληρωμένα το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η έννοια της Κατασκευής Πρωτοτύπων με επιτραπέζιο φρεζάρισμα ως μέρος της συνολικής διαδικασίας του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού και ως εναλλακτικής προσέγγισης στην ΤΚΠ.
- Στο Κεφάλαιο 3, ο αναγνώστης θα βρει τις απαραίτητες πληροφορίες για τις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC), με έμφαση στις φρεζομηχανές CNC επιτραπέζιας κλίμακας.
- Στο Κεφάλαιο 4, παρέχονται βασικές γνώσεις για τη μηχανική του φρεζαρίσματος, τα κοπτικά εργαλεία και τα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στην ΤΚΠ με αφαίρεση υλικού
- Στο Κεφάλαιο 5, εκτίθενται αναλυτικά οι διενεργηθείσες εφαρμογές, η μεθοδολογία προσέγγισης τους και τα χρησιμοποιηθέντα μέσα.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συνάγονται συμπεράσματα και προτείνονται χρήσιμες πρακτικές εφαρμογές και περιοχές μελλοντικών εργασιών.

Είναι σαφές ότι η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με θέματα που σχετίζονται άμεσα με το Σχεδιασμό Μηχανολογικών Προϊόντων και Κατασκευών σε σύγχρονο περιβάλλον λογισμικών CAD & CAM, αλλά και με την κατασκευή τους με εξοπλισμό CNC παρόμοιο με αυτόν που κάθε νέος μηχανικός, σε μικρότερη ή μεγαλύτερη κλίμακα, είναι πιθανό να συναντήσει στη σταδιοδρομία του, σε πείσμα ίσως των καιρών που οδηγούν στην γενικότερη αποβιομηχανοποίηση, εγχώρια αλλά και σε ολόκληρη την Ευρώπη, προς όφελος των τρίτων χωρών κυρίως της Άπω Ανατολής.

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι αυτή καθαυτή η τάση της αποβιομηχανοποίησης και ελαχιστοποίησης της κατασκευής, παραγωγής και γενικότερα πρωτογενούς-δευτερογενούς μεταποίησης, αναγνωρίζεται σήμερα, ανάμεσα σε άλλα, σε πληθώρα άρθρων και αναλύσεων από πολλούς οικονομικούς αναλυτές, ως ένα από τα κυριότερα αίτια της βαθιάς οικονομικής παγκόσμιας κρίσης που βίωσε ο πλανήτης μέσα στο 2008-2009, περίοδο που εκπονήθηκε και η παρούσα εργασία!

Ο γράφων θεωρεί ότι κάθε νέος, και ειδικά ο νέος Κατασκευαστής Μηχανολόγος Μηχανικός, πρέπει να είναι εστιασμένος στην προαγωγή της δημιουργίας και στη στήριξη της ανάπτυξης, αξιοποιώντας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα διατιθέμενα σε αυτόν μέσα και αναζητώντας διαρκώς νέους τρόπους για τη βελτίωση, συμπλήρωση και βέλτιστη αξιοποίησή τους, παρά τις όποιες δυσκολίες παρουσιασθούν, συγκυριακές ή μη . Με αυτό τον γνώμονα προσπάθησε να φέρει σε πέρας και την εργασία αυτή.

1.2 Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες και εφαρμογές:

- Εκπαίδευση και εκμάθηση των λογισμικών SolidWorks και SolidCAM
- Διασύνδεση του λογισμικού SolidCAM με την τριαξονική επιτραπέζια φρέζα Comagran Mt Profi , με κατάλληλη τροποποίηση αρχείου προ- ή μετά-επεξεργαστή (pre- , post- processor) και διενέργεια σχετικών δοκιμών.
- Κατασκευή δοκιμίων για την καταρχήν διαπίστωση και αποτίμηση της αποδιδόμενης ακρίβειας διαστάσεων από τη μηχανή Comagran Mt Profi.
- Κατασκευή πρωτοτύπου αντικειμένου-δοκιμίου για την διαπίστωση ποιότητας απόδοσης από τον εξοπλισμό Comagran Mt Profi.
- Τραχυμετρήσεις των δοκιμίων για την διαπίστωση της αποδιδόμενης ποιότητας επιφανειών.
- Καταγραφή δεδομένων χρόνου-κόστους από τις παραπάνω εφαρμογές.
- Απόπειρα κατεργασίας πλήρως τρισδιάστατων αντικειμένων
- Γενικότερη έρευνα και επισκόπηση της περιοχής των κοπτικών εργαλείων, πρώτων υλών ,ιδιοσυσκευών και υλικών και μεθόδους συντήρησης για τον εξοπλισμό Comagran Mt Profi.

Για όλα τα παραπάνω δίνονται εκτενείς πληροφορίες στις παραγράφους που ακολουθούν.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ

2.1 Το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον

Το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, όπως ήδη διαμορφώνεται από το τέλος του 20^{ου} αιώνα, χαρακτηρίζεται από την όλο και εντονότερη σύγκλιση και παγκοσμιοποίηση στα επίπεδα βιοτικού επιπέδου λαών & εθνών, νομοθεσίας, περιβαλλοντικών όρων, προδιαγραφών προϊόντων, των ίδιων των προϊόντων, υπηρεσιών κλπ.

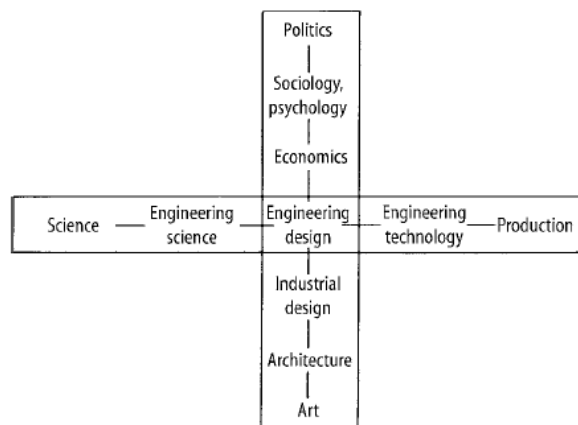
Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται διεύρυνση των αγορών, συγκέντρωση και ενοποίηση των παραγωγικών φορέων (π.χ. εταιριών, εργοστασίων) σε ευρύτερους πολυεθνικούς ομίλους και ο εντονότερος ανταγωνισμός ιδιαίτερα σε επίπεδο Μικρομεσαίων Επιχειρήσεων, πρώτα για τη βιωσιμότητα τους και μετέπειτα για την κερδοφορία τους. Για τα ίδια δε τα προϊόντα ο ανταγωνισμός οδηγεί τόσο σε αισθητά μικρότερους κύκλους ζωής τους, όσο και σε προσπάθεια ελαχιστοποίησης του χρόνου ανάπτυξης και παραγωγής τους, με το μικρότερο κάθε φορά δυνατό κόστος.

Οι μηχανικοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή, υφιστάμενοι και οι ίδιοι πίεση στο να βρουν τρόπους να αναπτύξουν και θέσουν σε παραγωγή νέα, ποιοτικότερα προϊόντα, φιλικά προς το περιβάλλον και προσιτά για το ευρύ κοινό σε λογικό κόστος. Τα οποία βέβαια, μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, να μπορούν σε υψηλό βαθμό να ανακυκλωθούν. Στο πλαίσιο αυτό έχουν τα τελευταία χρόνια αναπτυχθεί και τεθεί σε χρήση από τους μηχανικούς σύγχρονες μέθοδοι για τον Σχεδιασμό Μηχανολογικών Κατασκευών (Engineering Design) και την Ανάπτυξη Νέων Προϊόντων (Design & Development Process), υποστηριζόμενες τις περισσότερες φορές από τεχνολογίες πληροφορικής, ηλεκτρονικούς υπολογιστές και λογισμικό.

Ο κύριος στόχος των μηχανικών είναι η εφαρμογή επιστημονικών και τεχνολογικών γνώσεων ώστε να επιλύσουν τεχνικά προβλήματα και να βελτιστοποιήσουν τις λύσεις που δίδονται λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που σχετίζονται με τα υλικά, τις υπάρχουσες τεχνολογίες, οικονομικά κριτήρια, νομικά ζητήματα, το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Τα διάφορα τεχνολογικά προβλήματα που εμφανίζονται (π.χ. η δημιουργία νέων προϊόντων) γίνονται πιο συγκεκριμένα στους μηχανικούς όταν αυτά αποσαφηνίζονται και καθορίζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ατομικό και ομαδικό επίπεδο με κύριο στόχο να υπάρξει μια διεπιστημονική συνεργασία κατά τους κύκλους σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος.

Η κύρια σύλληψη ενός προϊόντος είναι αρμοδιότητα των μηχανικών σχεδιασμού και ανάπτυξης (design and development engineers), ενώ η φυσική υπόσχεση το υ προϊόντος είναι αρμοδιότητα των υπεύθυνων για την παραγωγή μηχανικών (production engineers).

Ο Dixon [2.1] και αργότερα ο Penny [2.2] οριοθέτησαν το πεδίο δράσης των υπεύθυνων για τον ολοκληρωμένο μηχανολογικό σχεδιασμό μηχανικών (engineering designers) στο κέντρο δυο διατετακμένων πολιτιστικών και τεχνικών ροών (βλέπε Σχήμα 2.1). Παρόλο αυτά, υπάρχουν και άλλα μοντέλα τα οποία καθορίζουν το πεδίο δράσης του μηχανικού σχεδιασμού και ανάπτυξης.



Σχήμα 2.1 Η κεντρική δραστηριότητα του ολοκληρωμένου μηχανολογικού σχεδιασμού κατά τους Dixon [2.1] και Penny [2.2]

Ο Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών (Engineering Design) ορίζεται κατά τον Ken Hurst [2.4] «ως η ολοκληρωμένη και συστηματική διαδικασία για την επίλυση προβλημάτων, η επίλυση των οποίων δεν έχει προέλθει νωρίτερα, ή ως η εύρεση νέων λύσεων σε προβλήματα, τα οποία προηγουμένως είχαν λυθεί με διαφορετικά κριτήρια». Ο μηχανικός σχεδιασμού και ανάπτυξης (engineering designer) χρησιμοποιεί τις νοητικές του ικανότητες με σκοπό να εφαρμόσει επιστημονική γνώση και να διαβεβαιώσει ότι το προϊόν που σχεδιάζει ανταποκρίνεται σε μια συγκεκριμένη ανάγκη της αγοράς και ότι θα παραχθεί με τον πλέον οικονομικό τρόπο. Η διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης δεν ολοκληρώνεται ωστόσο το τελικό προϊόν δοκιμαστεί και βρεθεί εντός των επιτρεπτών προδιαγραφών, οι οποίες καθορίζονται από συγκεκριμένους κανονισμούς.

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον ο Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών (engineering design) αποτελεί μια πολυδιάστατη ομαδική συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιστημών. Για παράδειγμα, οι επιστήμες των μηχανολόγων, ηλεκτρολόγων, ηλεκτρονικών, πολιτικών και χημικών μηχανικών συνδυάζονται μεταξύ τους με σκοπό την επίτευξη ενός στόχου. Επιπλέον νέοι κλάδοι ειδίκευσης, όπως για παράδειγμα η επιστήμη του αυτομάτου ελέγχου και της ανάπτυξης λογισμικού (control and software engineering), προστίθενται στην παραπάνω λίστα.

Ένα διαφωτιστικό παράδειγμα ολοκληρωμένου μηχανολογικού σχεδιασμού είναι το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών των σύγχρονων οχημάτων (ABS). Εξαιτίας του γεγονότος που θέλει ο σχεδιασμός οχημάτων να είναι κατά παράδοση υπόθεση της επιστήμης του μηχανολόγου μηχανικού, τα πρώτα συστήματα

αντιμπλοκαρίσματος των τροχών υπήρξαν αμιγώς μηχανολογικά. Παρόλο όπου η απόδοση των μηχανολογικών αυτών μηχανισμών υπήρξε επαρκής, δεν άργησε να ξεπεραστεί από συστήματα που συνδυάζουν τεχνολογίες λογισμικού (software), ηλεκτρονικών (electronics) και μηχανολογίας (mechanical).

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον είναι ουσιαστικά ένα πολύ-μεταβλητό περιβάλλον, στο οποίο συμμετέχουν πολλές επιστήμες και λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι όσο αφορά τη σύλληψη, το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την παραγωγή νέων προϊόντων και συστημάτων, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες και τεχνολογίες οι οποίες έχουν σκοπό να συγχρονίσουν και να συνδυάσουν όσο το δυνατόν καλύτερα τους ερευνητές μηχανικούς.

Η μέθοδος του Ολοκληρωμένου ή Σύγχρονου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (concurrent engineering), που είναι και η επικρατούσα τάση στις μέρες μας, είναι μια μεθοδολογία ή οποία βασίζεται στην ταυτόχρονη εξέλιξη των διαφόρων φάσεων σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος. Κατά την φάση σχεδιασμού και ανάπτυξης διάφοροι παράμετροι όπως είναι ο μηχανολογικός σχεδιασμός, η κατασκευή και παραγωγή ενός προϊόντος (manufacturing engineering) κ.τ.λ. ενοποιούνται με σκοπό να μειώσουν το χρόνο που χρειάζεται για διοχετευθεί στην αγορά ένα νέο προϊόν. Η μέθοδος του concurrent engineering είναι σχετικά ένα νέο σύστημα διαχείρισης (management system) των φάσεων σχεδιασμού και ανάπτυξης, αλλά με την πάροδο των ετών και υποστηριζόμενος από την ψηφιακή τεχνολογία γίνεται πιο ώριμο και μπορεί να οριστεί καλύτερα με σκοπό να βελτιστοποιηθούν οι διάφορες φάσεις των φάσεων σχεδιασμού και ανάπτυξης (engineering design cycles) [2.5]. Η μέθοδος του concurrent engineering έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και έχει εφαρμοστεί από πολλές εταιρείες, οργανισμούς, πανεπιστήμια και κυρίως από την αεροπορική βιομηχανία.

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του concurrent engineering ο σχεδιασμός των εργαλείων και των μητρώων ενός προϊόντος εξελίσσεται πριν ακόμα οριστικοποιηθούν και διαστασιοποιηθούν τα τελικά σχέδια. Ή ακόμα οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάζουν αναλυτικά στερεά μοντέλα (CAD) πριν ακόμα οριστικοποιηθούν τα μοντέλα επιφανειών (surfaces models) του τελικού προϊόντος. Παρόλο που με τη μεθοδολογία αυτή ουσιαστικά δεν μειώνονται οι εργατοώρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση μιας μεμονωμένης φάσης σχεδιασμού ενός προϊόντος, το ίδιο δεν ισχύει για το χρόνο λανσαρίσματος του προϊόντος στην αγορά, ο οποίος μειώνεται δραστικά. Σε αυτή την εξέλιξη συνέβαλαν τα μέγιστα οι Τεχνολογίες Συμπίεσης Χρόνου (Time Compression Technologies – TCTs) [2.10] και ειδικότερα οι τεχνολογίες CAD/CAM/CAE, στη μεμονωμένη ή τελευταία μέσω των συστημάτων Product Lifecycle Management (PLM), ενοποιημένη χρήση τους, [2.6].

2.2 Ανάγκες πρωτοτύπων – σύγχρονες προσεγγίσεις

2.2.1 Κατανοώντας τον όρο «πρωτότυπο» [2.7]

Τα πρωτότυπα γενικά ορίζονται ως προσεγγίσεις των αντίστοιχων τελικών προϊόντων για την εξέταση και διαπίστωση διαφορών υπό εξέταση παραμέτρων ή χαρακτηριστικών τους. Υπ' αυτήν την έννοια οποιαδήποτε οντότητα δια της οποίας είναι δυνατόν να ελεγχθεί τουλάχιστον μια από τις παραμέτρους τους προϊόντος που ενδιαφέρουν τη σχεδιαστική ομάδα μπορεί να θεωρηθεί ως πρωτότυπο. Ο ορισμός αυτός ξεφεύγει από τη στενή έννοια του όρου καθώς περιλαμβάνει ευρύτερα και άλλες μορφές πρωτοτύπων όπως σκίτσα, μαθηματικά μοντέλα, προσομοιώσεις, δοκιμαστικά αντικείμενα καθώς και πλήρως λειτουργικά τεμάχια προ-παραγωγής των προϊόντων. Γενικά τέλος ως πρωτοτυποποίηση ή κατασκευή/παραγωγή πρωτότυπου μπορεί να θεωρηθεί ή ορίζεται η ίδια διαδικασία για την ανάπτυξη μιας από αυτές τις προσεγγίσεις.

2.2.2 Είδη/κατηγορίες πρωτοτύπων

Έχει γενικά επικρατήσει [2.10] τα πρωτότυπα να κατατάσσονται και κατηγοριοποιούνται σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

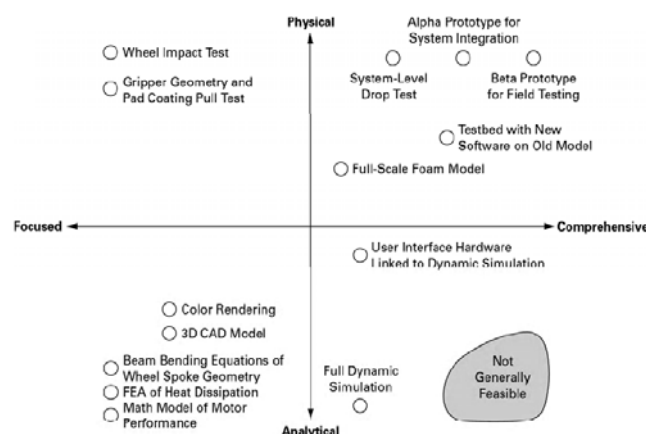
- Μορφής (Design Models)
- Γεωμετρικά
- Λειτουργικά
- Τεχνικά
- Τεμάχια Προ-παραγωγής

με βάση κυρίως τους σκοπούς στους οποίους χρησιμοποιούνται και τα χαρακτηριστικά που ενσωματώνουν.

Σύμφωνα με μια αρκετά ενδιαφέρουσα εναλλακτική θεώρησή τους [2.7], τα πρωτότυπα γενικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με δυο βασικές κατευθύνσεις. Σύμφωνα με την πρώτη, ένα πρωτότυπο μπορεί να είναι «φυσικό», δηλαδή να είναι «πραγματικό φυσικό αντικείμενο», ή «αναλυτικό», ήτοι προϊόν μιας ανάλυσης. Τα φυσικά πρωτότυπα είναι χειροπιαστά αντικείμενα που δημιουργούνται για να προσομοιάσουν ένα προϊόν. Χαρακτηριστικά του προϊόντος που ενδιαφέρει να ελεγχτούν από τη σχεδιαστική ομάδα ενσωματώνονται στο αντικείμενο αυτό για δοκιμές και πειράματα. Παραδείγματα φυσικών πρωτοτύπων συμπεριλαμβάνουν μοντέλα παρόμοια σε όψη και αίσθηση με το τελικό προϊόν (πρωτότυπα μορφής), πρωτότυπα αρχής λειτουργίας (conceptual prototypes), για τον γρήγορο έλεγχο μιας ιδέας και πειραματικές διατάξεις για έλεγχο της λειτουργικότητας ενός προϊόντος. Σύμφωνα με τη δεύτερη κατεύθυνση τα πρωτότυπα διαχωρίζονται ως «εκτενούς αντίληψης» (comprehensive) ή «εστιασμένα» (focused).

Ένα εκτενούς αντίληψης πρωτότυπο ενσωματώνει τις περισσότερες , αν όχι όλες, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και είναι σχεδόν ταυτόσημο με την καθιερωμένη έννοια του όρου πρωτότυπο καθώς αποτελεί μια σε πλήρη κλίμακα και πλήρης εκδοχή του τελικού προϊόντος. Παραδείγματα τέτοιων πρωτοτύπων είναι αυτά που δίνονται σε επιλεγμένους πελάτες για τον τελικό εντοπισμό ατελειών πριν την έναρξη της κανονικής παραγωγής. Σε αντιδιαστολή με τελικό εντοπισμό ατελειών πριν την έναρξη της κανονικής παραγωγής. Σε αντιδιαστολή με αυτά τα «εστιασμένα» πρωτότυπα επικεντρώνονται σε μια ή πολύ λίγες ιδιότητες και χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Παραδείγματα αποτελούν μοντέλα μορφής από αφρώδη υλικά ή χειροπιαστά ηλεκτρονικά κυκλώματα και πλακέτες. Μια κοινή πρακτική είναι να χρησιμοποιούνται δυο ή περισσότερα εστιασμένα πρωτότυπα για τη συνολική αξιολόγηση του υπό ανάπτυξη προϊόντος. Τότε ένα από αυτά είναι συχνά «αισθητικό-μορφής» και το άλλο προσομοιώνει τις αρχές λειτουργίας. Αυτό συχνά βοηθά τη σχεδιαστική ομάδα να βγάζει τα συμπεράσματά της νωρίτερα από ότι με τη χρήση ενός πλήρους και ολοκληρωμένου «εκτενούς πρωτοτύπου».

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ένα γράφημα με άξονα που αναπαριστά τις παραπάνω δύο κατευθύνσεις. Στο ίδιο σχήμα τοποθετούνται οι διάφορες εκδοχές του παραδείγματος PackBot της εταιρείας iRobot (Σχήμα 2.3). Σημειώνεται εδώ ότι , ενώ τα «εστιασμένα» πρωτότυπα μπορεί να είναι «φυσικά» ή «αναλυτικά», στην περίπτωση πραγματικών φυσικά κατασκευασμένων αντικειμένων απαιτούνται εκτενή πρωτότυπα πλήρους φυσικής υπόστασης. Τα πρωτότυπα γενικά κάποιες φορές αποτελούν συνδυασμό «αναλυτικών» και «φυσικών» στοιχείων π.χ. το σύστημα ελέγχου του παραδείγματος PackBot (Σχήμα 2.4) θα μπορούσε να συνδέεται με αντίστοιχη προσομοίωση της δυναμικής του κίνησης από λογισμικό ενίσχυσης



Σχήμα 2.2 Είδη/κατηγορίες πρωτοτύπων



(a)



(b)

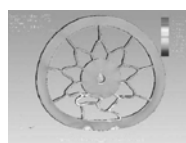


(c)

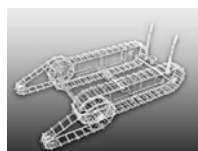
Σχήμα 2.3 Παραδείγματα φυσικών πρωτοτύπων του project PackBot (a) Πανομοιότυπο με το τελικό προϊόν μοντέλο , για λόγους εποπτείας (b) Πρωτότυπο του τροχού υπό δοκιμαστική φόρτιση για έλεγχο ερπυσμού (c) Έλεγχος σε άμμο ολόκληρου του συστήματος.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 2.4 Παραδείγματα αναλυτικών πρωτοτύπων του project PackBot (a) Μοντέλο φωτορεαλισμού τριών διαστάσεων για λόγους εποπτείας (b) Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία του τροχού για έλεγχο αντοχής (c) Κινηματική και δυναμική ανάλυση του μοντέλου.

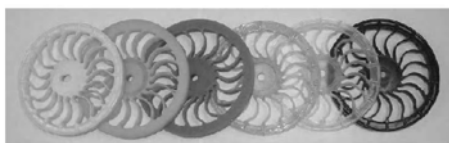
2.2.3 Κύριες χρήσεις και εφαρμογές των πρωτοτύπων

Κατά τον Eppinger [2.7], τα στάδια σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος πρωτότυπα χρησιμοποιούνται κυρίως για τέσσερεις σκοπούς : εκπαίδευση-εκμάθηση (learning), επικοινωνία (communication), διασύνδεση-ολοκλήρωση των μερών του προϊόντος (integration) και υλοποίηση σημείων προκαθορισμένου ελέγχου κατά τη φάση σχεδιασμού (milestones).

Έλεγχος – Αξιολόγηση (learning - assessment)

Τα πρωτότυπα χρησιμοποιούνται συνήθως για να αξιολογηθεί κατά πόσο μπορεί να εφαρμοστεί μια ιδέα και κατά πόσο ικανοποιούνται οι ανάγκες των πελατών. Όταν πρέπει να απαντηθούν τέτοιου τύπου ερωτήματα τα πρωτότυπα καθίστανται ως εκπαιδευτικά εργαλεία. Για τους τροχούς του PackBot του παραδείγματος που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω [2.7], η ομάδα ανάπτυξης δημιούργησε «εστιασμένα φυσικά» πρωτότυπα της καινοτόμου σπειροειδούς ακτίνας των τροχών. Οι τροχοί τοποθετήθηκαν σε μια πλατφόρμα υπό φορτίο και ρίφθηκαν από διάφορα ύψη για να ελεγχθεί η ιδιότητα στην απορρόφηση κραδασμών και η αντοχή των τροχών σε κόπωση. Το Σχήμα 2.5 παριστά ορισμένα από τα πρωτότυπα των τροχών και ένα από δοκιμή πρόσκρουσης.

Επίσης, κατά την ανάπτυξη του σχεδίου του τροχού , αναλύθηκαν μαθηματικά μοντέλα της ακτίνας του σπειροειδούς τροχού για να εκτιμηθεί η στιβαρότητα και η αντοχή του τροχού. Αυτό είναι παράδειγμα ενός «εστιασμένου αναλυτικού» πρωτοτύπου που χρησιμοποιείται ως εργαλείο ελέγχου-αξιολόγηση.



Courtesy of iRobot Corp.

Σχήμα 2.5 Πρωτότυπα των τροχών του PackBot (πάνω) και αποτέλεσμα των ελέγχων αντοχής (κάτω).

Επικοινωνία (communication)

Τα πρωτότυπα εμπλουτίζουν την επικοινωνία με τα ανώτερα κλιμάκια της διοίκησης , τους προμηθευτές, τους συνεργάτες, τα εξωτερικά μέλη της ομάδας, πελάτες και επενδυτές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα φυσικά πρωτότυπα: μια ορατή (visual) , χειροπιαστή (tangible) , τρισδιάστατη αναπαράσταση του προϊόντος γίνεται πολύ ευκολότερα αντιληπτή από μια προφορική περιγραφή , ακόμα και από ένα σκαρίφημα. Όταν επιλέγονταν τα ωφέλιμα φορτία του PackBot, η επικοινωνία μεταξύ των μηχανικών , των διευθυντών , των προμηθευτών και των πελατών βελτιωνόταν με τη χρήση πρωτοτύπων «μορφής και αίσθησης» (look and feel prototypes).

Διασύνδεση-ολοκλήρωση των μερών και χαρακτηριστικών του προϊόντος (integration)

Τα πρωτότυπα συχνά χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί ότι τα επιμέρους υποσύνολα και μέρη του προϊόντος συνεργάζονται μεταξύ τους ορθά. Τα «εκτενή φυσικά» πρωτότυπα είναι τα πιο αποτελεσματικά εργαλεία κατά την ανάπτυξη προϊόντων διότι απαιτούν την ίδια συναρμολόγηση και φυσική αλληλεπίδραση όλων των υποσυστημάτων και των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το τελικό προϊόν. Με αυτό τον τρόπο, τα πρωτότυπα υπαγορεύουν συντονισμό της ομάδας σχεδίασης και ανάπτυξης. Εάν ο συνδυασμός οποιουδήποτε εξαρτήματος διαταράσσει τη λειτουργικότητα του προϊόντος , το πρόβλημα αυτό μπορεί να εντοπιστεί μέσω της λειτουργικότητας ενός «φυσικού» πρωτοτύπου.

Συνήθεις επιμέρους κατηγοριοποιήσεις που απαντώνται για τα «φυσικά» πρωτότυπα είναι οι ακόλουθες : δοκιμαστικά (tested) , (αρχικά) alpha , (δευτερογενή) beta, ή τεμάχια προ-παραγωγής (preproduction).



Courtesy of iRobot Corp.

Σχήμα 2.6 Έκδοση Alpha (αριστερά) και Έκδοση Beta (δεξιά) του PackBot

Στην έκδοση Alpha , τα συστήματα επικοινωνίας είναι ορατά στο κέντρο του robot , ενώ στην έκδοση Beta έχουν ενσωματωθεί εντός robot για προστασία. Εκτεταμένες δοκιμές της Alpha έκδοσης βοήθησε στο να υπάρξουν ποικίλες βελτιώσεις στο σύστημα διεύθυνσης (tracking system) , το οποίο ανασχεδιάστηκε πριν ακόμα κατασκευαστεί η Beta έκδοση του PackBot. Στη συνέχεια η Beta έκδοση του PackBot υποβλήθηκε σε ένα πλήθος δοκιμασιών σε λάσπη , άμμο και νερό.

«Τα πρωτότυπα επιπλέον βοηθούν στην ολοκλήρωση διαφόρων προσεγγίσεων των διαφορετικών λειτουργιών που αντιπαρατάσσονται από τα μέλη της ομάδας σχεδίασης και ανάπτυξης» (Leonard-Barton, 1991). Ένα απλό φυσικό μοντέλο της μορφής του προϊόντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο δια του οποίου οι λειτουργίες marketing ,σχεδιασμού και κατασκευής να συμφωνούν σε μια βασική απόφαση που αφορά το σχεδιασμό.

Υλοποίηση σημείων προκαθορισμένου ελέγχου κατά τη φάση σχεδιασμού (milestones)

Ιδιαίτερα στα τελευταία στάδια του σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος , τα πρωτότυπα χρησιμοποιούνται για να καταδείξουν ότι το προϊόν έχει ικανοποιήσει τα επιθυμητά επίπεδα λειτουργικότητας. Η υλοποίηση σημείων προκαθορισμένου ελέγχου κατά τη φάση σχεδιασμού μας δίνει χειροπιαστούς στόχους , καταδεικνύει την πρόοδο του σχεδιασμού και ισχυροποιεί την τήρηση του χρονοδιαγράμματος. Και ενώ όλοι οι τύποι πρωτοτύπων χρησιμοποιούνται για τους στόχους που αναφέρθηκαν παραπάνω , κάποιιοι από αυτούς είναι καταλληλότεροι για διαφορετικές κάθε φορά εφαρμογές.

	Learning	Communication	Integration	Milestones
Focused analytical	●	○	○	○
Focused physical	●	●	○	○
Comprehensive physical	●	●	●	●

Σχήμα 2.7 Καταλληλότητα διαφορετικών τύπων πρωτοτύπων για διαφορετικές κάθε φορά εφαρμογές. (● = περισσότερο κατάλληλο , ○ = λιγότερο κατάλληλο)

2.2.4 Βασικές αρχές για την επιλογή και κατασκευή πρωτοτύπων στη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης

Υπάρχουν ορισμένες βασικές αρχές οι οποίες καθοδηγούν τους μηχανικούς στο να επιλέξουν τον καταλληλότερο τύπο πρωτοτύπων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος. Αυτές οι αρχές μας καθοδηγούν στην επιλογή των καταλληλότερων τύπων πρωτοτύπων και τον τρόπο με τον οποίο αυτά θα ενσωματωθούν στην εκάστοτε σχεδιασμό.

Τα «αναλυτικά πρωτότυπα» είναι γενικά πιο ευέλικτα από τα «φυσικά πρωτότυπα»

Τα αναλυτικά πρωτότυπα είναι μαθηματικές προσεγγίσεις ενός προϊόντος, τα οποία περιλαμβάνουν πλήθος στον αριθμό ανεξάρτητων παραμέτρων με σκοπό να παρουσιάζεται ένα εύρος από εναλλακτικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια παράμετρος σε ένα αναλυτικό πρωτότυπο αλλάζει ευκολότερα από ότι σε ένα φυσικό πρωτότυπο . Στο παράδειγμα του PackBot, το αναλυτικό πρωτότυπο του συστήματος μετάδοσης ισχύος αποτελείται πλήθος εξισώσεων που ουσιαστικά αναπαριστούν τον ηλεκτρικό κινητήρα. Μια από τις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα είναι η ροπή παύσης (stall torque). Μεταβάλλοντας αυτήν την παράμετρο και λύνοντας τα νέα συστήματα εξισώσεων που προκύπτουν , σε ένα «αναλυτικό πρωτότυπο» είναι πολύ πιο εύκολο

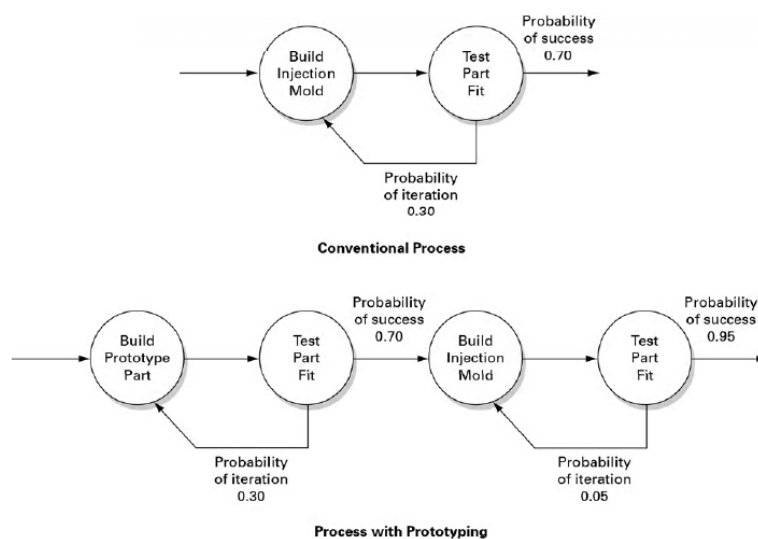
να γίνει αντικατάσταση του υπάρχοντος κινητήρα από ότι σε ένα «φυσικό πρωτότυπο». Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα «αναλυτικό πρωτότυπο» τροποποιείται πιο εύκολα από ότι ένα φυσικό πρωτότυπο, αλλά απαιτεί περισσότερες τροποποιήσεις από ότι το «φυσικό πρωτότυπο». Γι' αυτό το λόγο ένα «αναλυτικό πρωτότυπο» συνήθως προηγείται ενός φυσικού. Τα «αναλυτικά πρωτότυπα» χρησιμοποιούνται για να εξαλείψουν όσο το δυνατόν περισσότερο ανεπιθύμητα φαινόμενα, ενώ τα «φυσικά πρωτότυπα» για να βελτιστοποιήσουν ή να επιβεβαιώσουν μια σχεδιαστική προσέγγιση.

Τα «φυσικά πρωτότυπα» είναι απαραίτητα για να εντοπιστούν ανεπιθύμητα φαινόμενα

Πολύ συχνά τα φυσικά πρωτότυπα παρουσιάζουν ανεπιθύμητα φαινόμενα , τα οποία δεν συμβαδίζουν καθόλου με τους αντικειμενικούς σκοπούς του πρωτοτύπου. Επίσης εκπλήσσει το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των δοκιμών στα «φυσικά πρωτότυπα» εμφανίζονται όλοι οι φυσικοί νόμοι. Με τα «φυσικά πρωτότυπα» ελέγχεται εάν υπάρχουν στο προϊόν γεωμετρικά χαρακτηριστικά , τα οποία προκαλούν θερμικές ή οπτικές διαταραχές. Κάποιες τέτοιες συμπτωματικές ιδιότητες των «φυσικών πρωτοτύπων» είναι άσχετες με το τελικό προϊόν και ως αποτέλεσμα μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Παρόλα αυτά, κάποιες συμπτωματικές ιδιότητες των φυσικών πρωτοτύπων εμφανίζονται και στο τελικό προϊόν. Σε αυτές τις περιπτώσεις , τα φυσικά πρωτότυπα εξυπηρετούν το ρόλο τους ως εργαλεία για ανίχνευση και αποφυγή μη προβλέψιμων επιζήμιων φαινομένων που μπορούν να εμφανιστούν στο τελικό προϊόν.

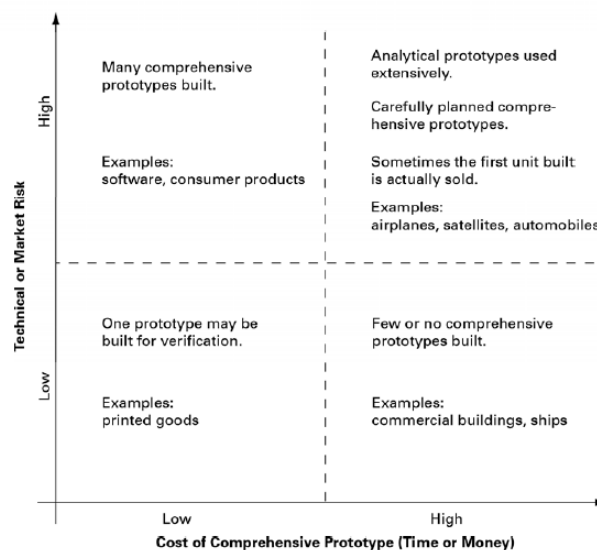
Ένα πρωτότυπο είναι ικανό να μειώσει τον κίνδυνο πολυδάπανων ανασχεδιασμών

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ο κίνδυνος πολλαπλών και ενδεχομένως δαπανηρών ανασχεδιασμών στη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων. Σε πολλές περιπτώσεις , το αποτελέσματα μιας δοκιμής είναι αυτά που καθορίζουν το κατά πόσο θα προβεί μια ομάδα σχεδιασμού και ανάπτυξης σε περαιτέρω έρευνα.

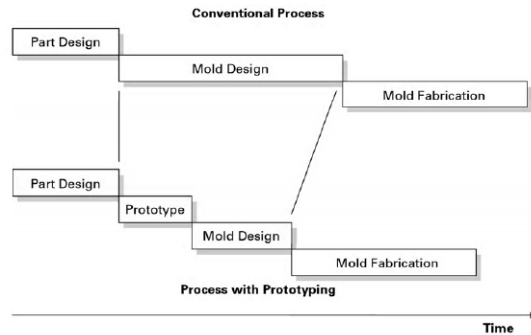


Σχήμα 2.7 Ένα πρωτότυπο μπορεί να μειώσει το κόστος ανασχεδιασμού ενός προϊόντος. Ο χρόνος που απαιτείται για να σχεδιαστεί και να δοκιμαστεί ένα πρωτότυπο επιτρέπει στην ομάδα σχεδιασμού και ανάπτυξης (R&D team) να εντοπίσει διάφορα προβλήματα, τα οποία ενδεχομένως θα εμφανίζονταν σε μεθεπόμενες διαδικασίες.

Για παράδειγμα, εάν οι συναρμογές ενός χυτού δεν είναι οι επιθυμητές, θα πρέπει το καλούπι χύτευσης από το οποίο προήλθε το χυτό να χρειάζεται ανασχεδιασμό και ανακατασκευή. Στο Σχήμα 2.7 παρατηρούμε ότι μετά τον έλεγχο των συναρμογών του τεμαχίου υπάρχει 30% κίνδυνος να χρειάζεται το καλούπι να επιστραφεί. Η πιθανότητα αυτή είναι 0.30 και αναγράφεται στα βέλη του διαγράμματος. Ουσιαστικά, εάν η κατασκευή και ο έλεγχος ενός πρωτότυπου αυξάνει την πιθανότητα να μην χρειάζεται το προϊόν περαιτέρω ανασχεδιασμό (π.χ. το προϊόν γίνεται από 70% σε 95% αποδεκτό), η κατασκευή πρωτοτύπων είναι απόλυτα δικαιολογημένη και αναγκαία. Τα πλεονεκτήματα ενός πρωτότυπου όσο αφορά τη μείωση του κινδύνου για πολλαπλούς ανασχεδιασμούς, θα πρέπει να συμβαδίζουν με το κόστος και το χρόνο που απαιτείται για να παραχθεί ένα πρωτότυπο. Αυτό είναι ιδιαίτερα απαραίτητο για τα «εκτενούς αντίληψης πρωτότυπα» (comprehensive). Προϊόντα στα οποία εμφανίζεται υψηλός κίνδυνος και αβεβαιότητα για ανασχεδιασμό, λόγω πιθανών αστοχιών που μπορεί να εμφανιστούν και που αυξάνουν το συνολικό κόστος της κατασκευής του προϊόντος, εξαιτίας μιας νέας τεχνολογίας ή της επαναστατικής φύσης του προϊόντος, ωφελούνται από την ύπαρξη πρωτοτύπων.



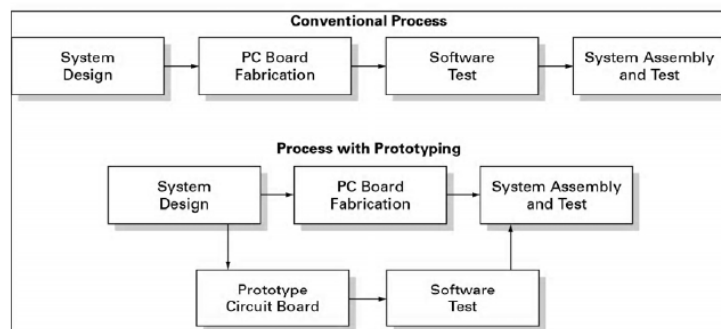
Σχήμα 2.8 Η χρήση εκτενών πρωτοτύπων (comprehensive) εξαρτάται από τους αντίστοιχους τεχνικούς κινδύνους, τους κινδύνους της αγοράς και το κόστος κατασκευής των πρωτοτύπων



Σχήμα 2.9 Η δημιουργία πρωτοτύπων έχει ως αποτέλεσμα τη γρηγορότερη ολοκλήρωση των κύκλων σχεδιασμού και ανάπτυξης.

Ένα πρωτότυπο έχει την ικανότητα να επισπεύσει τα υπόλοιπα στάδια ανάπτυξης

Σε αρκετές περιπτώσεις η προσθήκη ενός σύντομου κύκλου για την ανάπτυξη και κατασκευή πρωτοτύπων μπορεί να μειώσει τη χρονική διάρκεια των μεταγενέστερων κύκλων σχεδιασμού και ανάπτυξης ακόμα περισσότερο και από το να μην είχε δαπανηθεί χρόνος για την δημιουργία αυτών των πρωτοτύπων. Εάν ο χρόνος που απαιτείται για να κατασκευαστεί ένα πρωτότυπο είναι μικρότερος από το χρόνο που απαιτείται για να διεξαχθεί ένας κύκλος σχεδιασμού και ανάπτυξης, τότε η στρατηγική κατασκευής πρωτοτύπων ενδείκνυται. Για παράδειγμα στο Σχήμα 2.9 η ύπαρξη «φυσικών πρωτοτύπων» σύνθετων χυτών τεμαχίων επιτρέπει στο σχεδιαστή καλουπιών να αναπτύσσει και να σχεδιάζει γρηγορότερα τα εργαλεία χύτευσης (mold tooling).



Σχήμα 2.10 Χρήση των πρωτοτύπων για μείωση των κύκλων σχεδιασμού και ανάπτυξης

Ένα πρωτότυπο αναδιαρθρώνει τους κύκλους σχεδιασμού και ανάπτυξης

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται μια σειρά από κύκλους σχεδιασμού και ανάπτυξης όπου κρίνονται εντελώς απαραίτητοι για τη δημιουργία της τελικής μορφής ενός λογισμικού. Πολύ συχνά η δημιουργία πρωτοτύπων επιφέρει την ταυτόχρονη ολοκλήρωση των κύκλων σχεδιασμού και ανάπτυξης.

2.3 Ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων (TKΠ)

2.3.1 Γενικά

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 την κατασκευή των πρωτοτύπων πραγματοποιούσαν , κατά τρόπο σχεδόν αποκλειστικό ,ειδικευμένοι τεχνικοί χρησιμοποιώντας συμβατικές κατά κύριο λόγο εργαλειομηχανές και πολλή χειρονακτική εργασία και επιδεξιότητα. Ο απαιτούμενος χρόνος για αυτά ήταν αρκετά μεγάλος (από ημέρες έως μήνες) και ,συνακόλουθα ,το κόστος τους υψηλό. Για δύσκολες περιπτώσεις ο χρόνος κατασκευής μέχρι και το 50% του συνολικού χρόνου και κόστους σχεδιασμού/ανάπτυξης του προϊόντος αντίστοιχα. Για τους λόγους αυτούς ο αριθμός των πρωτοτύπων ήταν κατά κανόνα περιορισμένος και, προφανώς οι δυνατότητες επανασχεδιασμού ή τροποποιήσεων ήταν και αυτές κατ' ανάγκη περιορισμένες.

Έκτοτε και μέχρι σήμερα έχει σημειωθεί στην κατασκευή πρωτοτύπων αξιοσημείωτη πρόοδος, ειδικά στο επίπεδο του απαιτούμενου χρόνου και κόστους, ώστε πλέον να χρησιμοποιείται ο όρος Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (TKΠ).

2.3.2 Διάκριση σε TKΠ αφαίρεσης και εναπόθεσης υλικού

Οι τεχνολογίες που εντάσσονται στα πλαίσια της TKΠ εκτείνονται σε δύο κύριες κατευθύνσεις. Την κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού και την κατασκευή πρωτοτύπων με εναπόθεση υλικού, ευρύτερα γνωστή και σαν Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (Rapid Prototyping).

Οι τεχνολογίες αφαίρεσης υλικού αποτελούν εξέλιξη των μηχανουργικών κατεργασιών κοπής, συνιστάμενες κυρίως σε εξειδικευμένες – σχετικά περιορισμένων δυνατοτήτων και μικρής κλίμακας CNC μηχανές (π.χ. Desktop CNC Milling Machines) και σε μεγαλύτερης κλίμακας, αλλά ιδιαιτέρως υψηλής ταχύτητας κοπής και πρόωσης CNC μηχανές (π.χ. HSC High Speed Cutting). Με τη χρήση εργαλειομηχανών CNC είναι εφικτό να παραχθεί γρήγορα ένα πρωτότυπο, επομένως η συγκεκριμένη οικογένεια μεθόδων δεν μπορεί να αποκλειστεί από το γενικό πλαίσιο των μεθόδων ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες TKΠ εναπόθεσης υλικού, το έτος 1987 εμφανίστηκε το πρώτο σχετικό σύστημα SLA (Στερεολιθογραφία), της εταιρίας 3D Systems, με το οποίο κατασκευάζονταν με αυτόματη διαδικασία γεωμετρικά πρωτότυπα αντικειμένων με βάση το τρισδιάστατο ηλεκτρονικό μοντέλο τους (3D-CAD). Η μέθοδος δημιούργησε αμέσως και σε συνδυασμό με την καθιέρωση των συστημάτων CAD ένα νέο και δυναμικό περιβάλλον για μια πολύ ταχύτερη και πολύ καλύτερη ανάπτυξη νέων μηχανολογικών προϊόντων και κατασκευών, και μια ολόκληρη τάση εξέλιξης νέων σχετικών τεχνολογιών και μηχανών. Έκτοτε και μέχρι σήμερα συνεχίζουν να εμφανίζονται τεχνολογίες αυτοματοποιημένης κατασκευής γεωμετρικών κατά βάση πρωτοτύπων, που όλες τους έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό με τη μέθοδο SLA την αυτοματοποιημένη και διαστρωματική κατασκευή των

αντικειμένων, εκκινώντας από δεδομένα προερχόμενα από στερεά μοντέλα 3D-CAD. Ως δοκιμότερος και γενικότερα αποδεκτός όρος για όλες αυτές τις τεχνολογίες έχει σε διεθνές επίπεδο υιοθετηθεί ο όρος *Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων* (ΤΚΠ , συνοπτικότερα και *Ταχεία Πρωτοτυποποίηση*) – Rapid Prototype (RP) . Αναφέρονται όμως και όροι όπως RPT – Rapid Prototyping Technologies (Techniques) , SFF – Solid Freedom Fabrication , FFF – Fast Freedom Fabrication, GPP - Generative Production Process , LMT – Layer Manufacturing Techniques.

Συγκρίνοντας τις υπάρχουσες μεθόδους ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού και με εναπόθεση υλικού, οι απόψεις για το ποια είναι καλύτερη δίστανται . Και οι δυο μέθοδοι έχουν θετικούς υποστηρικτές, οι οποίοι τονίζουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς. Ωστόσο, αυτοί που είναι εξοικειωμένοι και με τις δυο τεχνολογίες συμφωνούν ότι και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.. Οι περισσότερες μέθοδοι RP αρχικά προσέφεραν ένα πρωτοφανές πλεονέκτημα λόγω ταχύτητας , αλλά υστερούσαν στην ακρίβεια και σε θέματα που σχετίζονται με τα διατιθέμενα υλικά τους. Μέχρι την εμφάνιση των μεθόδων RP, οι τεχνολογίες CNC είχαν ήδη αναπτυχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό και προσέφεραν πολλά και αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα.

Με τον καιρό όμως οι μέθοδοι RP παρουσίασαν και αυτές πρόοδο στην ακρίβεια των τεμαχίων που παρήγαγαν, στα διατιθέμενα υλικά, καθώς και σε θέματα που έχουν να κάνουν με την πιστότητα επιφανείας και το τελικό φινίρισμα των επιθυμητών τεμαχίων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τελικά με τα χρόνια και οι δυο μέθοδοι να προσφέρουν παραπλήσιες δυνατότητες και να δυσκολεύουν τους χρήστες για το ποια μέθοδος πρέπει να επιλεγεί. Σήμερα, η γνώση τουλάχιστον των βασικών δυνατοτήτων και των δυο μεθόδων είναι απαραίτητη ώστε να προσαρμόζονται οι επιλογές των μηχανικών σε επίπεδο κατασκευής πρωτοτύπων στην καταλληλότερη κάθε φορά κατεύθυνση, πράγμα που αποτελεί και έναν από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας.

2.3.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας CAD – ΤΚΠ με εναπόθεση υλικού

Οι τεχνολογίες εναπόθεσης υλικού στην πλειοψηφία τους προσθέτουν υλικό διαδοχικά κατά στρώσεις συγκεκριμένου πάχους. Σε κάθε μια από τις στρώσεις αυτές αποδίδονται η μορφή και οι εσωτερικές λεπτομέρειες του αντικειμένου. Απαιτείται συνεπώς, τόσο η μεταφορά της γεωμετρικής πληροφορίας από το CAD μοντέλο 3 διαστάσεων, όσο και ο χωρισμός-κατάτμηση της γεωμετρίας του μοντέλου σε επίπεδες τομές αντίστοιχου πάχους.

Κατά σύμβαση το επίπεδο X-Y θεωρείται ως το επίπεδο των τομών (στρώσεων) που κατασκευάζονται διαδοχικά και άξονας Z ως ο άξονας οικοδόμησης /ανάπτυξης του αντικειμένου. Η επικοινωνία λογισμικού 3D-CAD με το σύστημα ΤΚΠ συντελείται με αρχεία κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας , μέσω των οποίων προσεγγίζεται-περιγράφεται η γεωμετρική μορφή του CAD μοντέλου 3 διαστάσεων και υλοποιείται επίσης η επεξεργασία χωρισμού σε επίπεδες τομές.

Ευρύτερα διαδεδομένο είναι το πρωτόκολλο Στερεολιθογραφίας – STL Format (Stereo Lithography File Format) που καθιέρωσε ο οίκος 3D Systems. Τα αρχεία STL θεωρούνται σήμερα τα τυπικά αρχεία για εφαρμογές ΤΚΠ. Για τη μετατροπή ουδέτερων πρωτοκόλλων περιγραφής τρισδιάστατου μοντέλου (DXF , IGES, VDA κ.α.) σε αρχείο STL είναι διαθέσιμες πολλές εφαρμογές λογισμικού. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί και άλλα πρωτότυπα (SLC, CLI–Common Layer Interface), ενώ προωθείται η ενσωμάτωση των απαιτήσεων ΤΚΠ και στο πρωτόκολλο STEP.

Τα αρχεία STL αναπαριστούν γεωμετρικά στο χώρο ολόκληρο το κλειστό σύνολο επιφανειών που απαρτίζουν ένα τρισδιάστατο στερεό μοντέλο σε H/Y, διαχωρίζοντας τις σε προσανατολισμένες στο χώρο (ύπαρξη κανονικού διανύσματος) τριγωνικές έδρες. Οι έδρες αυτές διασυνδέονται μεταξύ τους με προκαθορισμένο τρόπο, έτσι ώστε η κάθε μια να μοιράζεται υποχρεωτικά μία κοινή πλευρά και δύο κοινές κορυφές με κάποια γειτονική της. *.STL files.

Επιπλέον, αλλάζοντας χαρακτηριστικές παραμέτρους του αρχείου όπως είναι Chord Tolerance, Surface Deviation , ή Angular Control μπορούμε να αλλάξουμε την ανάλυση (resolution) του αρχείου *.STL .Όσο μεγαλύτερης χωρητικότητας είναι το αρχείο *.STL , τόσο μεγαλύτερος είναι ο τριγωνισμός του μοντέλου. Τυπικά ένα σύνθετο CAD μοντέλο που εξάγεται σε *.STL format έχει χωρητικότητα μεταξύ 1-1.5 MB.

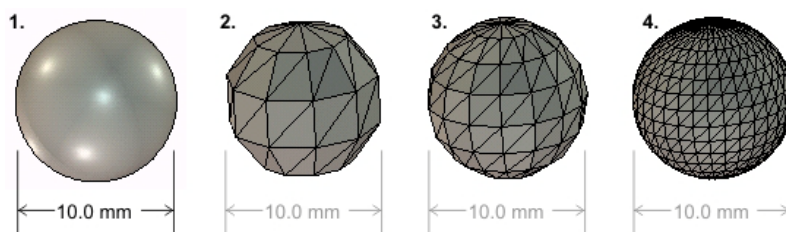


Fig. 1 shows the original 10mm CAD sphere

Fig. 2 displays a triangulated STL sphere with 0.5mm surface deviation

Fig. 4 shows the same sphere with a 0.1mm surface deviation

Τα *.STL αρχεία εξάγονται από τις περισσότερες 3D εφαρμογές της αγοράς Έτσι μέσα στο αρχείο STL κωδικοποιείται πλήρως η γεωμετρική περιγραφή του αντικειμένου ως πλέγμα αλληλοσυνδεδεμένων τριγωνικών εδρών. Για τη συγκρότηση του αρχείου χρησιμοποιείται η ακόλουθη ομάδα εντολών :

- **solid**: Δίνει το όνομα του στερεού.
- **facet normal**: Δίνει την κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος τριγωνικής έδρας.
- **outer loop**: Ξεκινά την αλληλουχία κορυφών της τριγωνικής έδρας.
- **vertex endloop**: Τελειώνει την αλληλουχία κορυφών της έδρας.
- **endfacet**: Τελειώνει την περιγραφή της τριγωνικής έδρας.
- **end solid**: Τελειώνει την περιγραφή του στερεού

Η απλότητα του *.STL format, έχει ως αποτέλεσμα η μετατροπή ενός 3D CAD μοντέλου στο εν λόγω πρότυπο να γίνεται εξαιρετικά εύκολα. Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι τριγωνισμού επιφανειών, οι οποίοι συμβάλλουν στο να αναπτυχθούν ρουτίνες μετατροπής αρχείων σε *.STL format. Αναφορικά με την ακρίβεια, αυτή σχετίζεται με τον αριθμό των τριγώνων που εμείς ορίζουμε. Κάθε 3D μορφή μπορεί να απεικονιστεί στο πρότυπο *.STL, και ένας απλός slicing αλγόριθμος είναι ικανός να μετατρέπει το πλέγμα τριγώνων σε cross-sectional slices.

2.3.4 Κυριότερες Τεχνολογίες Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων με εναπόθεση υλικού

Οι τεχνολογίες ΤΚΠ εναπόθεσης υλικού κατηγοριοποιούνται με δύο κυρίως τρόπους:

- Με βάση τη φύση της πρώτης ύλης (υγρή, στερεά, κονιοποιημένη)
- Με βάση το μέσο/φυσική αρχή που χρησιμοποιείται για την κατασκευή (π.χ. Laser – ακτινοβολία, laser – θερμότητα, κεφαλή ψεκασμού – εναπόθεση υλικού, μηχανική κοπή κλπ.)

Με βάση τον πρώτο τρόπο και εντοπίζοντας αυτές που εμπορικά διατίθενται ως ολοκληρωμένο προϊόν διακρίνονται σε:

Τεχνολογίες ΤΚΠ - Τήγματος

Η μέθοδος Fused Deposition Modeling (FDM) χρησιμοποιεί μια κινητή κατά X-Y θερμαινόμενη κεφαλή που εναποθέτει στην τράπεζα κατασκευής τήγμα θερμοπλαστικού νήματος (θερμοκρασίας ~ 240° C) σε μορφή πολύ λεπτής ρευστής ίνας. Το υλικό στερεοποιείται καθώς η θερμοκρασία του πέφτει. Με την ολοκλήρωση ενός στρώματος, η τράπεζα χαμηλώνει και εναποτίθεται το επόμενο στρώμα επάνω από το προηγούμενο. Για την υποστήριξη των ευαίσθητων θέσεων του αντικειμένου κατασκευάζονται ομοίως από μια δεύτερη κεφαλή υποστηρίγματα διαφορετικού υλικού που αφαιρούνται εύκολα από το τελικό πρωτότυπο. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Stratasys, Dimension Printing.

Η μέθοδος Drop on Demand Inkjet Plotting (DDIP). Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο κεφαλές ψεκασμού του υλικού. Η μια κεφαλή ψεκάζει τήγμα θερμοπλαστικού υλικού χαμηλού σημείου τήξεως, ενώ η δεύτερη ψεκάζει κερί για τη στήριξη του αντικειμένου. Μετά την περάτωση κάθε στρώσης, γίνεται επιπεδοποίηση (milling) της επιφάνειας για ομοιομορφία ύψους. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει καλή ακρίβεια, βρίσκοντας εφαρμογές στη βιομηχανία κοσμημάτων. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Sanders Prototyping, 3D Systems.

Τεχνολογίες ΤΚΠ – Υγρού

Η στερεολιθογραφική μέθοδος (SLA) χρησιμοποιεί τη διαστρωματική κατασκευή αντικειμένων, με στερεοποίηση φωτοπολυμεριζόμενης υγρής ρητίνης με την επένεργεια UV (υπεριώδους) δέσμης laser. Η διαδικασία είναι επαναληπτική: Η ακτίνα laser στερεοποιεί ένα πυκνό πλέγμα καθόλη την επιφάνεια του σχήματος της εκάστοτε κατασκευαζόμενης δισδιάστατης τομής.

Μετά την ολοκλήρωση της τομής η στερεοποιηθείσα επιφάνεια υποχωρεί κατά συγκεκριμένο βάθος , ενώ ταυτόχρονα επικαλύπτεται με υγρή ρητίνη για τη στερεοποίηση του στρώματος της αμέσως επόμενης τομής. Λόγω της φύσης της εφαρμοζόμενης τεχνικής είναι απαραίτητη η δημιουργία υποστηριγμάτων σε ευαίσθητες θέσεις του πρωτότυπου (προεξοχές, αναρτήσεις κλπ.). Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: 3D Systems, Sony, Aaroflex, Nextfactory κλπ.

Η μέθοδος στερεοποίησης ρητινών με υπεριώδη ακτινοβολία (UV Curing) . Έχει αρκετά κοινά σημεία με τη στερεολιθογραφία καθώς χρησιμοποιεί και αυτή υπεριώδη ακτινοβολία – αλλά χωρίς χρήση laser – για τη στερεοποίηση φωτοευαίσθητου υγρού πολυμερούς. Αντίθετα με την SLA , η μέθοδος με τη χρήση φωτεινής πηγής UV διαμορφώνει κάθε φορά ένα ολόκληρο επίπεδο ταυτόχρονα χωρίς δηλ. σημειακή χάραξη/σάρωση. Με την ολοκλήρωση της στερεοποίησης του επιπέδου της τομής, αναρροφάται η περίσσεια υγρής ρητίνης και στη θέση της σε κάποιες μεθόδους ψεκάζεται κερί για τη στήριξη του δημιουργημένου αντικειμένου. Μετά την κατεργασία επιπεδοποίησης της στρώσης που κατασκευάστηκε η στρώση συνεχίζεται. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία , το κερί αφαιρείται με εμβάπτιση σε διαλυτικό υγρό και αποδίδεται έτοιμο το πρωτότυπο. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Envisiontec, Objet, 3D Systems, Huntsman.

Τεχνολογίες TKΠ - Σωματιδίων

Η μέθοδος selective laser sintering (SLS) χρησιμοποιεί και αυτή laser για να τήξει και επιλεκτικά να συνενώσει σωματίδια σκόνης – διαφόρων υλικών (πλαστικά , μέταλλα, άμμος κ.α.) – κατά επίπεδες στρώσεις του προς κατασκευή αντικειμένου. Χρησιμοποιείται και εδώ τράπεζα επί της οποίας επιστρώνεται λεπτό στρώμα σκόνης. Η περίσσεια σκόνης έξω από την στερεοποιημένη επιφάνεια του αντικειμένου υποστηρίζει στατικά το πρωτότυπο. Κατά παραλλαγή της μεθόδου χρησιμοποιείται μίγμα σκόνης και συγκολλητικής ύλης την οποία και τήκει ακτίνα laser. Μετά την ολοκλήρωση του κύκλου κατασκευής το καταρχήν στερεοποιημένο αντικείμενο εισάγεται σε κλίβανο όπου τήκεται περεταίρω η συγκολλητική ύλη και συνενώνονται μεταξύ τους τα σωματίδια του υλικού, προσδίδοντας στο τελικό αντικείμενο ενισχυμένη αντοχή. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: 3D System, Phoenix.

Η μέθοδος Electron Beam Melting (EBM) μοιάζοντας αρκετά με την SLS, χρησιμοποιεί αντί δέσμης laser δέσμη ηλεκτρονίων (Παρόμοια με τη δέσμη οθονών και τηλεοράσεων CRT) με μεγαλύτερη ισχύ, σε περιβάλλον αδρανούς αερίου. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν ο οίκος Arcam.

Η μέθοδος 3D Printing (3DP) . Η μέθοδος μοιάζει ως προς την αρχή λειτουργίας της με την λειτουργία ενός εκτυπωτή με ψεκασμό μελάνης (ink-jet printer) . Αντί για μελάνη ψεκάζεται συγκολλητική ύλη σε καθορισμένες θέσεις της επιφάνειας στρώματος σκόνης υλικού (θερμοπλαστικού , κεραμικού , μεταλλικού) . Με τον ψεκασμό της συνδετικής ύλης στερεοποιείται μέρος του υλικού και η κατασκευή προχωρά επαναληπτικά , όπως και στην SLS. Για την επίτευξη μεγαλύτερης συνοχής και αντοχής του πρωτοτύπου ακολουθεί συχνά όπως και στην SLS μετεπεξεργασία σε κλίβανο όπου συντελείται σύντηξη των κόκκων της συνδετικής ύλης και της πρώτης ύλης. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Z-Corp, Soligen.

Τεχνολογίες ΤΚΠ – Στερεού

Η μέθοδος Laminated Object Manufacturing (LOM) χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη ρολά φύλλου χαρτιού. Τα υλικά αυτά είναι επικαλυμμένα με θερμοευαίσθητη συγκολλητική ύλη. Βασικές συνιστώσες του συστήματος LOM είναι η μηχανή κατασκευής των πρωτοτύπων και ένας H/Y για την επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων του υπό κατασκευή αντικειμένου (προετοιμασία μορφής στρώσεων) και το συντονισμό της όλης λειτουργίας. Η μηχανή LOM συγκροτείται από μία κατακόρυφα κινούμενη (κατά τον Z-άξονα) τράπεζα επάνω στην οποία κτίζεται το πρωτότυπο , ένα θερμαινόμενο και οριζοντίως κυλιόμενο (κατά τον Y-άξονα) κύλινδρο για τη συγκόλληση των επίπεδων φύλλων των στρώσεων μεταξύ τους, μία διάταξη περιστρεφόμενων κυλίνδρων για την τροφοδοσία πρώτης ύλης και την αποκομιδή της περίσσειας της , μία μονάδα laser CO₂ με την οποία επιτελείται η κοπή των φύλλων πρώτης ύλης και τέλος μια CNC διάταξη κατόπτρων και φακούς εστίασης. Η τελευταία μετακινεί κατά X-Y επίπεδο το ίχνος της ακτίνας laser επί της επιφάνειας της εκάστοτε αποδιδόμενης στρώσης. Με τον τρόπο αυτό η ακτίνα περικόπτει το πλήρες (εξωτερικό – εσωτερικό) περίγραμμα της τομής του αντικειμένου στο εκάστοτε επίπεδο κατασκευής. Το πλεονάζον υλικό του φύλλου της πρώτης ύλης (φύρα) κόπτεται από την ακτίνα σε τετραγωνικό πλέγμα δημιουργώντας προοδευτικά κύβους που θα αφαιρεθούν μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Ενδιάμεσα οι κύβοι χρησιμεύουν για την υποστήριξη του διαστρωματικά κατασκευαζόμενου πρωτοτύπου. Με την ολοκλήρωση μιας επιπέδου τομής τροφοδοτείται νέα στρώση πρώτης ύλης , που συγκολλείται με τη βοήθεια θερμού κυλίνδρου επάνω στην αμέσως προηγούμενη της και ο κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του αντικειμένου. Για την παραλαβή του πρωτοτύπου απαιτείται αφαίρεση των κύβων του άχρηστου υλικού. Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Cubic Technologies (πρώην Helisys), Toyoda (διάθεση μόνο στην Ιαπωνία).

Η μέθοδος *Paper Laminating Technology (PLT)* . Αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου LOM . Η διαφορά έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί απ' ευθείας φύλλα χαρτιού ή πολυμερούς τυποποιημένης διάστασης , όπως ένα φωτοαντιγραφικό μηχάνημα. Το τρέχον επίπεδο συγκολλείται με τα προηγούμενα με τη βοήθεια θερμής πλάκας ή κόλλας (αναλόγως μηχανών) και οι επίπεδες τομές αποδίδονται από κατάλληλα (CNC) κατευθυνόμενο κοπτικό εργαλείο (μαχαίρι). Σε εμπορική μορφή τέτοια συστήματα παράγουν οι οίκοι: Kira, Solido.

2.4 Λογισμικά CAD/CAM/CAE

Έχει ήδη αναφερθεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την κατασκευή πρωτοτύπων, τόσο με ΤΚΠ, όσο και με CNC εξοπλισμό, είναι η ύπαρξη γεωμετρικών μοντέλων των υπό κατασκευή αντικειμένων, και μάλιστα σε τρισδιάστατη μορφή. Αυτό επιτυγχάνεται σήμερα με χρήση τεχνολογιών σχεδίασης σε 3 διαστάσεις με τη βοήθεια H-Y (CAD 3D). Παράλληλα με τη σχεδίαση , άλλα βασικά «κλειδιά» στον κύκλο σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος είναι οι μέθοδοι παραγωγής (manufacturing) και η ανάλυση κατασκευών (engineering analysis) . Σε επίπεδο διατιθέμενων υπολογιστικών εργαλείων σε περιβάλλον H-Y για αυτά, ο όρος computer aided manufacturing (CAM) σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο θα κατασκευαστεί και θα παραχθεί μαζικά ένα προϊόν , ενώ ο όρος computer aided engineering (CAE) σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα αναλυθεί/μελετηθεί . Παρόλο ότι οι τεχνολογίες CAM/CAE/CAD αναπτύσσονται μεμονωμένα , είναι όλες τους τεχνολογίες που βασίζονται σε υπολογιστικά μοντέλα και εστιάζουν στην ανάπτυξη και παραγωγή ενός προϊόντος. Τα δε τελευταία χρόνια είναι δυνατόν να υφίστανται σε ενοποιημένο περιβάλλον (συστήματα PLM). Είναι κατανοητό ότι η μεταξύ τους ενοποίηση και η ομαλή ενσωμάτωση αυτών των υποστηρικτικών τεχνολογιών με τη χρήση H-Y στην ανάπτυξη και παραγωγή νέων προϊόντων είναι ένας βασικός στόχος για πολλές εταιρείες που ασχολούνται με την δημιουργία συναφούς λογισμικού. Συνοπτικές πληροφορίες για τα λογισμικά αυτά εργαλεία δίνονται παρακάτω.

Computer Aided Design (CAD)

Ο όροι **CAD** (Computer Aided Design) και **CADD** (Computer Aided Design and Drafting), δηλαδή η σχεδίαση με τη βοήθεια H/Y , αποτελούν τις πιο σύγχρονες μεθόδους σχεδίασης. Είναι οι αντικαταστάτες των συμβατικών μέσων και οργάνων σχεδίασης, όπως μολύβια, κανόνες, τρίγωνα, διαβήτες κ.λπ. Ο όρος **CAD** έχει επικρατήσει διεθνώς ως αντιπροσωπευτικός τόσο της κυρίως σχεδίασης με H/Y (**drafting**) , όσο και των μεθόδων σχεδιασμού που υποστηρίζονται από H/Y (**design**). Οι τεχνολογίες CAD χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό , την ανάπτυξη και την βελτιστοποίηση προϊόντων , τα οποία πωλούνται άμεσα στους τελικούς χρήστες ή αποτελούν τμήμα άλλων προϊόντων.

Η χρήση τεχνολογιών CAD είναι πολύ διαδεδομένες επίσης στο σχεδιασμό εργαλείων παραγωγής και τη σχεδίαση/κατασκευή εξαρτημάτων μηχανισμών (**design**), όπως επίσης στη σχεδίαση κατοικιών , βιομηχανικών μονάδων κ.λπ. (**drafting**). Οι τεχνολογίες CAD είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες, λόγω του ότι μειώνουν το χρόνο σχεδίασης και μελέτης ενός προϊόντος και προσδίδουν ευκολία και ευελιξία στις αλλαγές και τροποποιήσεις, κάτι το οποίο τελικά συνεπάγεται τη συνολική μείωση του συνολικού κόστους σχεδιασμού.

Computer Aided Manufacturing (CAM)

Είναι η τεχνολογία λογισμικών, που εκτελούνται από υπολογιστικά συστήματα και καταστρώνουν (plan) , διαχειρίζονται (manage) και ελέγχουν παραγωγικές (manufacturing) διαδικασίες. Οι πιο βασικές εφαρμογές της τεχνολογίας CAM περιλαμβάνουν αριθμητικό έλεγχο NC (Numeric Control) , ρομποτικό έλεγχο και computer-aided process planning (CAPP). Η τεχνολογία NC είναι αυτή η οποία χρησιμοποιεί προγραμματιστικά εργαλεία , για να ελέγξει λειαντικές , κοπτικές , διατρητικές κ.α. εργαλειομηχανές. Ο ρομποτικός έλεγχος αναφέρεται στη χρήση ρομπότ , τα οποία επιλέγουν και τοποθετούν τα εργαλεία και τα προς κατεργασία τεμάχια στις μηχανές NC. Λαμβάνοντας δεδομένα από το κατασκευαστικό σχέδιο, το process planning είναι η διαδικασία με την οποία περιγράφονται αναλυτικά οδηγίες που σχετίζονται με τον τύπο και την αλληλουχία των παραγωγικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα , ώστε να παραχθεί ένα τελικό προϊόν σε μια βιομηχανία. Τα CAPP συστήματα περιλαμβάνουν λογισμικά που αυτοματοποιούν την ανάπτυξη των παραγωγικών διαδικασιών μιας βιομηχανίας.

Computer Aided Engineering (CAE)

Είναι η τεχνολογία που απαρτίζεται από λογισμικά που προβαίνουν σε υπολογιστική ανάλυση ενός προϊόντος ή μιας κατασκευής βασιζόμενα στην υφιστάμενη στον H-Y γεωμετρία τους και σε καθιερωμένες επιστημονικές μεθόδους και επιτρέπουν στο σχεδιαστή να προσομοιώνει και να μελετά τη συμπεριφορά ενός προϊόντος , με σκοπό να το βελτιστοποιήσει σχεδιαστικά πριν αυτό παραχθεί. Οι τεχνολογίες CAE υποδιαιρούνται στους παρακάτω τομείς :

- Ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEA (Finite Element Analysis) – για κατασκευαστική και θερμική ανάλυση μεμονωμένων εξαρτημάτων και συναρμολογούμενων συνόλων.
- Υπολογιστική μηχανική ρευστών CFD (Computational Fluid Dynamics) – για θερμική και ροϊκή ανάλυση ρευστών.
- Κινηματική ανάλυση (Kinematics) – για καθορισμό τροχιών κίνησης και εύρεσης ταχυτήτων συνδέσμων μηχανισμών.
- Λογισμικά ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων (Large Displacement Analysis) – για την εύρεση φορτίων και μετατοπίσεων σε σύνθετα συναρμολογούμενα σύνολα , π.χ. οχήματα, αεροσκάφη κλπ.

- Προγραμματιστικά εργαλεία αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης και σχεδίασης.
- Εργαλεία παραγωγικής και κατασκευαστικής ανάλυσης (manufacturing tools) – για προσομοίωση διαφόρων κατεργασιών (π.χ. χύτευση, molding, die press forming).

Ενοποιημένα Περιβάλλοντα σχεδιασμού PDM/PLM

Κατά την τρέχουσα δεκαετία αναπτύχθηκαν κάποιες πολύ σημαντικές τάσεις για συγχώνευση των τεχνολογιών CAD/CAE και αντίστοιχων εταιριών παραγωγής λογισμικού. Είναι πολλά τα παραδείγματα των εταιριών που ακολουθούν αυτή την τάση. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εταιρείες Dassault Systèmes που αναπτύσσει τα SRAC (Structural Research & Analysis Corporation) και COSMOS από το 2001 και Autodesk που αναπτύσσει το Solid Dynamics από το 2005. Μια άλλη τάση είναι η ύπαρξη και διάθεση αυτόνομων λογισμικών CAE, τα οποία λειτουργούν με ανεξάρτητες άδειες (licensing). Για παράδειγμα το Ansys Workbench, το Dynamic Designer της MSC Software, το CFDesign της Blue Ridge Numerics. Και σε αυτές όμως τις περιπτώσεις ο χρήστης προμηθεύεται μια άδεια για λογισμικό CAE και ταυτόχρονα λαμβάνει και μια βασική CAD εφαρμογή για τη δημιουργία μοντέλων σε περίπτωση που δεν διαθέτει ήδη συναφές λογισμικό CAD. Τα CAD αρχεία αλληλεπιδρούν αυτόματα με την ανεξάρτητη εφαρμογή CAE.

Με τη διάδοση χρήσης τεχνολογιών τύπου CAD/CAM/CAE ανέκυψε παράλληλα και το ζήτημα της διαχείρισης του όγκου των δεδομένων που προέκυψε, ως ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Παράλληλα δε, και μέσα στα πλαίσια του Σύγχρονου Ολοκληρωμένου Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών, έπρεπε να αντιμετωπισθεί και το ζήτημα της ταυτόχρονης ενασχόλησης σε ενιαίο επίπεδο πολυπληθών σχεδιαστικών ομάδων που απασχολούνταν σε ένα έργο (project), με αναφορά όλων σε κοινή ενημερωμένη βάση. Σαν λύση σε αυτό το θέμα οι εταιρείες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν λογισμικά PDM (Product Data Management), τα οποία οργανώνουν τα δεδομένα των υπό μελέτη προϊόντων σε βάσεις δεδομένων. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται μπορεί είναι αρχεία CAD ή σχέδια μαζί και με σχετικά έγγραφα (documents). Οι βασικές δυνατότητες των λογισμικών PDM περιλαμβάνουν:

- Ασφαλή αποθήκευση των δεδομένων σε ένα κεντρικό αρχείο (vault) , το οποίο αποτελείται από :
 - Αρχεία CAD
 - Αρχεία CAD τρίτων
 - Non-CAD αρχεία
- Τη δυνατότητα εντοπισμού και ελέγχου των αποθηκευμένων δεδομένα.
- Εργαλεία ταχείας αναζήτησης και προεπισκόπησης των δεδομένων.

- Εργαλεία διαχείρισης, δικαιωμάτων χρήσης και διανομής των αρχείων μέσα στις ομάδες εργασίας.
- Εργαλεία διαχείρισης και ελέγχου των εκδόσεων των αρχείων.
- Εργαλεία προεπισκόπησης (viewing tools) και επισημάνσεων (markup tools).

Στην αναζήτηση για περαιτέρω ενοποίηση των τεχνολογιών CAD/CAM/CAE και PDM και παράλληλα με την πλήρη υιοθέτηση των εννοιών του Σύγχρονου και Ολοκληρωμένου Σχεδιασμού (Concurrent Engineering) παγκοσμίως, χρησιμοποιείται πλέον και ο όρος Product Lifestyle Management (PLM). Τα λογισμικά PLM μπορούν να γίνουν αντιληπτά ως η καθολική συγχώνευση όλων των παραπάνω εργαλείων με μεθόδους, εμπλεκόμενα πρόσωπα και διαδικασίες από όλα τα στάδια της ανάπτυξης, παραγωγής, κύκλου ζωής, τέλους ζωής και απόρριψης-ανακύκλωσης ενός προϊόντος (product life). Στην πραγματικότητα είναι ένα γενικό πλαίσιο (framework), το οποίο περιλαμβάνει τον σχεδιασμό (design), την παραγωγική διαδικασία (manufacturing), μαζί με τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες επικοινωνίας ανταλλαγής και διαμοιρασμού πληροφοριών (communication technologies).

2.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

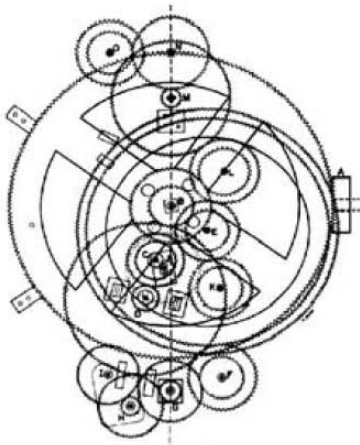
- [2.1] Dixon, J.R.: Design Engineering: Inventiveness, Analysis, and Decision Making. New York: McGraw-Hill 1966
- [2.2] Penny, R.K.: Principles of Engineering Design. Postgraduate 46 (1970) [σελ. 344–349]
- [2.3] G.Pahl, W.Beitz, J.Feldhusen, and K.H. Grote: Engineering Design: A Systematic approach, third Edition. Springer Verlag London Limited 2007
- [2.4] Ken Hurst: Engineering design: Principles. Elsevier Science & Technology Books (May 1999) [σελ.1-12]
- [2.5] Ma, Y., Chen, G., Thimm, G., "Paradigm Shift: Unified and Associative Feature-based Concurrent Engineering and Collaborative Engineering", Journal of Intelligent Manufacturing, DOI 10.1007/s10845-008-0128-y
- [2.6] James Leake, Jacob Borgerson: Engineering design graphics: Sketching, modeling, and visualization. John Wiley & Sons, Inc 2008
- [2.7] Karl T.Ulrich – Steven D.Eppinger: Product Design and Development 4th Edition. McGraw Hill international edition 2008 [σελ.245-265]
- [2.8] James Leake, Jacob Borgerson: Engineering design graphics: Sketching, modeling, and visualization. John Wiley & Sons, Inc 2008 [208-212]

- [2.9] Chua C.K., Leong K.F. and LIM C.S.: Rapid prototyping: Principles and Applications. World Scientific Publishing Company; 2nd edition (March 2003) [σελ.1-7]
- [2.10] Μ.Μ Σφαντζικόπουλου: Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ. Εκδόσεις Ε.Μ.Π Αθήνα 2003 [σελ.185-196]
- [2.11] Frank W.Liou: Rapid Prototyping and Engineering Applications. A Toolbox for Prototype Development. CRC Press September 26, 2007 [σελ.223-239]
- [2.12] Emad Abouel Nasr, Ali K. Kamrani: Computer-Based Design and Manufacturing: Springer Verlag 2007 [σελ.284-285]
- [2.13] James Leake, Jacob Borgerson: Engineering design graphics: Sketching, modeling, and visualization. John Wiley & Sons, Inc 2008 [σελ.208-212]
- [2.14] User Guide to Rapid Prototyping. Society of Manufacturing Engineers; illustrated edition (February 2004) [σελ.139-140]
- [2.15] Grimm Todd and Wohlers Terry 2003: Is CNC Machining Really Better than RP? Time-Compression Technologies [σελ. 33-34]
- [2.16] Frank W.Liou: Rapid Prototyping and Engineering Applications: A toolbox for prototype development. CRC; 1 edition (September 26, 2007) [σελ.178-179]
- [2.17] Ali K. Kamrani, Emad Abouel Nasr: Rapid Prototyping: Theory and Practice. Springer; 1 edition (January 26, 2006) [σελ.165-166]

ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ (ΦΡΕΖΕΣ) CNC & ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

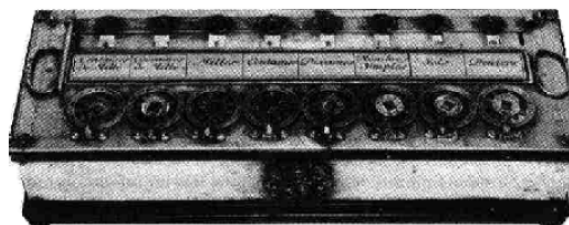
3.1 Ιστορική αναδρομή αριθμητικού ελέγχου εργαλειομηχανών

Η εξέλιξη του αριθμητικού ελέγχου στη μηχανουργική τεχνολογία, στηρίζεται σε βασικές αρχές, που αναπτύχθηκαν πολλούς αιώνες πριν. Αρχικές προσπάθειες έχουν καταγραφεί στην Κίνα και στην Ελλάδα, με αντιπροσωπευτικότερη τον «Μηχανισμό των Αντικυθήρων», ο οποίος χρησιμοποιούνταν πιθανώς για αστρονομικούς και ημερολογιακούς υπολογισμούς. Βρέθηκε το 1900-1901 σε αρχαίο ναυάγιο κοντά στα Αντικύθηρα από σφουγγαράδες της Σύμης. Ο μηχανισμός του ήταν ιδιαίτερα σύνθετος, έχοντας εσωτερικά 32 οδοντωτούς τροχούς ενώ είχε επιγραφές για το ζωδιακό κύκλο και τους μήνες.



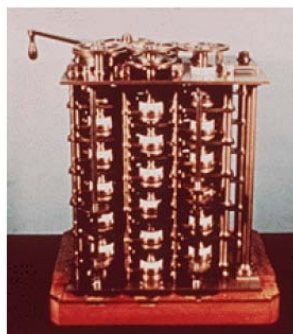
Σχήμα 3.1 Ο μηχανισμός των Αντικυθήρων (Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο)

Πολύ αργότερα, τον 14ο αιώνα μ.Χ, η ιδέα του ελέγχου μηχανικών διατάξεων μέσω ακολουθίας πληροφοριών, όπως είναι και ο αριθμητικός έλεγχος, εμφανίζεται στην κίνηση διακοσμητικών μορφών σε ρολόγια μεγάλων εκκλησιών. Το 1642 ο Blaise Pascal (1623-1662), κατασκεύασε τον πρώτο μηχανικό υπολογιστή, χρησιμοποιώντας ένα περίπλοκο σύστημα οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 3.2 Ο Blaise Pascal και ο πρώτος μηχανικός υπολογιστής

Σχεδόν δύο αιώνες μετά, το 1808, ένας Γάλλος κλωστοϋφαντουργός και εφευρέτης, ο Joseph Jacquard, χρησιμοποίησε διάτρητες μεταλλικές κάρτες σε υφαντικές μηχανές και κατόρθωσε να αναπαράγει με ταχύτητα πολύπλοκα σχέδια σε υφάσματα. Περίπου 55 χρόνια αργότερα ανακαλύφθηκε το μηχανικό πιάνο. Η λειτουργία του βασιζόταν στη διέλευση αέρα μέσα από ένα κατάλληλα τρυπημένο και κινούμενο ρολό χαρτιού, που ενεργοποιούσε την κίνηση των πλήκτρων. Το 1834 ολοκληρώθηκε από τον Charles Babbage (1792-1871) ένας μηχανικός υπολογιστής, που μπορούσε να κάνει αριθμητικές πράξεις, με ακρίβεια έξι δεκαδικών ψηφίων.



Σχήμα 3.3 Ο Charles Babbage και ο υπολογιστής του

Πάνω από εκατό χρόνια πέρασαν έως το 1940, χρονιά κατά την οποία ο Aiken στις Ηνωμένες Πολιτείες και ο Zuse στη Γερμανία έφτιαξαν την πρώτη ηλεκτρονική υπολογιστική διάταξη με χρήση ρελέ. Τρία χρόνια αργότερα, το 1943, κατασκευάστηκε από τους John Mauchly και Presper Eckert ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής. Πρόκειται για το θρυλικό **ENIAC**, ένα δημιούργημα μεγάλων διαστάσεων και βάρους τριάντα τόνων, που περιείχε 18 km καλώδια, 500.000 συνδέσεις και απορροφούσε ισχύ 174 kWatt. Ο προγραμματισμός του ήταν μια πολύπλοκη εργασία, σχεδόν ιεροτελεστία, και απαιτούσε τη συνδυασμένη ρύθμιση 6000 διακοπών. Η εξωπραγματική για την εποχή εκείνη υπολογιστική ισχύς είναι σήμερα σχεδόν αστεία, αφού σε μια κοινή αριθμομηχανή (calculator) είναι πολλαπλάσιες φορές μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.4 Ο John Mauchly, ο Peter Eckert και ο ENIAC

Χρειάστηκε να περάσουν ακόμα δεκαπέντε χρόνια και να μεσολαβήσει η ανακάλυψη των ημιαγωγών το 1948, για να αναπτυχθούν εμπορικοί επαναπρογραμματιζόμενοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές στην αυγή του 1960. Από τότε, η αλματώδης ανάπτυξη στην ηλεκτρονική (ολοκληρωμένα κυκλώματα μικρής και μεγάλης κλίμακας, μικροεπεξεργαστές, συστήματα μαζικής αποθήκευσης και γραφικής απεικόνισης κ.λπ.) οδήγησε στη σημερινή εικόνα των υπολογιστών και επέβαλε τη σύγχρονη τεχνολογική επανάσταση.

Ο σύγχρονος αριθμητικός έλεγχος των εργαλειομηχανών ξεκίνησε, όταν, κατά τη διάρκεια του πολέμου με τους Ιάπωνες στον Ειρηνικό Ωκεανό, η Αμερικανική πολεμική αεροπορία είχε εξαιρετικά μεγάλες απώλειες. Η ταχεία παραγωγή και επισκευή αεροσκαφών και ανταλλακτικών στάθηκε πραγματικός πονοκέφαλος για τους μηχανικούς της αεροπορικής βιομηχανίας. Έτσι, πέρα από τη μειωμένη παραγωγική ικανότητα των συμβατικών εργαλειομηχανών, η συνεχής παραγωγή χωρίς συντήρηση και η κόπωση των τεχνιτών οδηγούσε, συχνά, σε ελαττωματικά και επικίνδυνα τεμάχια. Ακόμα, οι απαιτήσεις της βιομηχανίας για ακόμα πιο σύνθετα τεμάχια, δεν μπορούσαν να καλυφθούν από τα συμβατικά μηχανουργεία. Έως το 1949 η εξέλιξη ήταν αργή, αφού η τεχνολογία ήταν σε πρώιμο στάδιο. Αυτήν ακριβώς τη χρονιά, ανατέθηκε στον John Pearson και στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT) η αποστολή της ανάπτυξης αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών.

Ο μηχανικός αυτός και οι συνεργάτες του πρώτοι προσδιόρισαν τις αρχές λειτουργίας των μηχανών αυτών. Σκέφτηκαν, λοιπόν, ότι χρειάζεται ηλεκτρονικός υπολογιστής, για να προσδιορίζει τις **διαδρομές του κοπτικού εργαλείου**. Αυτές οι κινήσεις έπρεπε να αποθηκεύονται στο μόνο μέσο εκείνης της εποχής, δηλαδή στις **διάτρητες κάρτες**. Επίσης, η μηχανή θα έπρεπε να διαθέτει ένα **μέσο ανάγνωσης**, ώστε να διαβάσει αυτόματα τις κάρτες αυτές. Τέλος, κρίθηκε απαραίτητη η ύπαρξη μίας **κεντρικής μονάδας ελέγχου**, ώστε να καθοδηγεί τους **σερβοκινητήρες**, που θα κινούσαν τους κοχλίες κίνησης των μηχανών. Το 1952 η πρώτη ψηφιακή εργαλειομηχανή, μια κατακόρυφη φρεζομηχανή, επιδείχτηκε με επιτυχία στο MIT. Η ογκώδης αυτή φρεζομηχανή είχε όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και εκτελούσε ταυτόχρονες και ανεξάρτητες μεταξύ τους κινήσεις σε τρεις άξονες κατεργασίας. Αυτή η μέρα, ήταν η αυγή μιας πενήντάχρονης εκρηκτικής εξέλιξης, της οποίας τα αποτελέσματα περιγράφονται στο βιβλίο αυτό. Το 1954, άρχισε να χτίζεται η πρώτη συμβολική γλώσσα προγραμματισμού. Ονομάστηκε “Αυτόματος Προγραμματισμός Εργαλείων” (Automatically Programmed Tool, **APT**) και περιέγραφε με σχετική ευκολία τη μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τις οδηγίες προς τη μηχανή, για να το κατασκευάσει. Ένα χαρακτηριστικό κομμάτι που φτιάχτηκε με την τεχνολογία εκείνης της εποχής, είναι το τασάκι του Σχήματος 3.5 που μοιράστηκε σε όλους τους παρευρισκόμενους στα πλαίσια επίδειξης της APT που έκανε το Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του MIT το 1959.



Σχήμα 3.5 Διάτρητη κάρτα και τασάκι κατασκευασμένο από την πρώτη ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή με τη βοήθεια της APT

Το 1958, η εταιρία Bendix, αγόρασε την πατέντα από τον Pearson και κατασκεύασε την πρώτη εμπορική ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή. Από εκείνα τα χρόνια, η βιομηχανία κατάλαβε τη σημασία της χρήσης των μηχανών αυτών. Έτσι, άρχισε η προσπάθεια αυτοματοποίησης όλων των μηχανουργικών κατεργασιών και η ανάπτυξη αντιστοιχών NC εργαλειομηχανών. Η εξέλιξη των μικροϋπολογιστών οδήγησε στη μετάβαση από τις NC στις CNC εργαλειομηχανές και η ανάπτυξη των αισθητήρων και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στις αντίστοιχες DNC. Έτσι σήμερα, από την απλή διάτρηση, έως την πολύπλοκη επεξεργασία ανάγλυφων επιφανειών, χρησιμοποιούνται απλές και φθηνές ή σύνθετες και ακριβές εργαλειομηχανές. Με την εξέλιξη αυτή, οι παραδοσιακές δομές των μηχανουργείων δε συμβαδίζουν με τις δυνατότητες και τις απαιτήσεις των νέων μηχανών αλλά και τις παραγωγικές ανάγκες του σημερινού κόσμου.

Η συνεργασία των μηχανουργικών κατεργασιών με NC, CNC και DNC μηχανές με άλλες λειτουργίες που υποστηρίζονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή, οδήγησαν στη δημιουργία των ολοκληρωμένων με υπολογιστή συστημάτων παραγωγής (CIM). Έτσι, από τη σύλληψη ενός νέου προϊόντος, αυτό σχεδιάζεται, εξελίσσεται και βελτιστοποιείται μέσω των **συστημάτων ανάπτυξης** (Computer Aided Engineering - **CAE**), που περιλαμβάνουν συστήματα σχεδίασης (CAD) και προγράμματα υπολογισμών αντοχής με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM – υπολογιστική μέθοδος στατικής και δυναμικής αντοχής κατασκευών και όχι μόνο). Κατόπιν, ο προγραμματισμός των κατεργασιών γίνεται σε συστήματα CAM, λαμβάνοντας υπόψη τεχνολογικές παραμέτρους των κατεργασιών αυτών.

Τα σύγχρονα μηχανουργεία εντάσσουν τις NC, CNC και DNC εργαλειομηχανές σε ακόμα πιο σύνθετες δομές, που ονομάζονται ευέλικτα συστήματα παραγωγής (**FMS**). Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν ηλεκτρονικό σχεδιασμό της παραγωγής, αυτόματες μεταφορικές διατάξεις και αποθήκες, βιομηχανικά ρομπότ και διατάξεις ποιοτικού ελέγχου. Όλα αυτά καθοδηγούνται και εποπτεύονται από έμπειρους μηχανικούς και τεχνικούς, με τη βοήθεια δικτύου ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με τον τρόπο αυτό, η σύγχρονη παραγωγή μετατρέπεται από σπαζοκεφαλιά σε ελεγχόμενη και απλοποιημένη διαδικασία. Η χρήση της τεχνολογίας λογισμικού και υπολογιστών, με στοιχεία **τεχνητής νοημοσύνης** (artificial intelligence), οδηγεί στην πρώιμη έννοια του **αυτόματου εργοστασίου**, στο οποίο η συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα στη λήψη αποφάσεων και στην καθοδήγηση μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Σημειώνεται ότι η κύρια και τεχνικά πιο απαιτητική εφαρμογή του αριθμητικού ελέγχου γίνεται σε εργαλειομηχανές κοπής, όπου τυπικά ένα εργαλείο ακολουθεί μια γεωμετρική τροχιά. Αυτό δε σημαίνει ότι δε χρησιμοποιείται αριθμητικός έλεγχος και σε εργαλειομηχανές διαμόρφωσης (ελασμάτων, σωλήνων κλπ.), αλλά και σε μη συμβατικές μηχανές κατεργασιών, όπως η ηλεκτροδιάβρωση.

3.2 Αρχιτεκτονική, δομικά μέρη και έλεγχος επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου (Computer Numerical Control Milling Machines)

3.2.1 Γενικές αρχές

Ορισμός του Αριθμητικού Ελέγχου [3.1]

Αριθμητικός έλεγχος εργαλειομηχανών είναι ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές για την αναφορά στη θέση και την κίνηση των αξόνων της μηχανής, για τον ορισμό εργαλείων, στροφών ατράκτου κλπ. Η έννοια «άξονας κίνησης μηχανής» αναφέρεται σε ένα κινηματικό άξονα που αντιστοιχεί συνήθως σε γραμμική κίνηση, όπως η πρόωση του τραπέζιού μιας φρέζας, ή σε περιστροφική κίνηση, όπως η περιστροφή του διαιρέτη της φρέζας. Μία σειρά τέτοιων αριθμητικών τιμών αποτελεί ουσιαστικά το πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου. Τα σημερινά συστήματα ελέγχου CNC (αριθμητικός έλεγχος με H/Y) χρησιμοποιούν επιπρόσθετα αριθμητικές τιμές και για λειτουργίες όπως ο μετασχηματισμός συστημάτων συντεταγμένων, η διαχείριση πινάκων δεδομένων, η αντιστάθμιση διαμέτρου και μήκους εργαλείου κλπ. Αυτές καθώς και επιπρόσθετες λειτουργίες γραφικών, επικοινωνίας με άλλους H/Y και περιφερειακά αντιδιαστέλλουν τον απλό αριθμητικό έλεγχο (NC) με αυτόν που βασίζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (CNC). Σήμερα πλέον δεν υφίσταται NC με την αρχική του έννοια, απλά CNC και αυτό εννοούμε πλέον με τον όρο «αριθμητικός έλεγχος».

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του Αριθμητικού Ελέγχου [3.2]

Σε αντίθεση με τον παλαιότερο μηχανικό, πνευματικό ή υδραυλικό έλεγχο μηχανών και συσκευών, όπου ο ανά-προγραμματισμός ήταν εξαιρετικά χρονοβόρος διότι γινόταν με μετατόπιση οριακών διακοπών, βυσμάτων καλωδίων κλπ., αλλά και με τις πρώτες μονάδες αριθμητικού ελέγχου όπου η κύρια λειτουργία ήταν η μετατροπή αριθμητικών τιμών σε ηλεκτρικά σήματα, οι σημερινές μονάδες CNC εκτελούν σχετικά μεγάλης έκτασης επεξεργασία των δεδομένων, κάτι που τους προσθέτει λειτουργικότητα αλλά και πολυπλοκότητα. Το βασικότερο κίνητρο στην ανάπτυξη των εργαλειομηχανών με σύστημα αριθμητικού ελέγχου, αποτέλεσε η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια στις κατασκευές εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, σε συνδυασμό τόσο με την επαναληψιμότητα του αποτελέσματος όσο και με τη μείωση του χρόνου κατεργασίας. Η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων των εργαλειομηχανών CNC μπορεί να γίνει συγκρίνοντας τις δυνατότητες τους με αυτές των συμβατικών εργαλειομηχανών.

Κατασκευές υψηλής ακρίβειας, της τάξης του 0.01mm ή μικρότερο, απαιτούν στις συμβατικές εργαλειομηχανές εξαιρετικά χρονοβόρες κατεργασίες, αφού ο χειριστής είναι υποχρεωμένος να διακόπτει συχνά την κοπή για να μετρά τις διαστάσεις του κομματιού, έτσι ώστε να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι εργαλειομηχανές CNC εξοικονομούν αυτό το χρόνο, αφού η ακρίβεια κοπής – συνήθως ίση προς τη διακριτική ικανότητα της εργαλειομηχανής – είναι δεδομένη από το σύστημα.

Περαιτέρω εξοικονόμηση χρόνου επιτυγχάνεται με CNC και κατά την αλλαγή της φάσης κατεργασίας, όπου ο χειριστής συμβατικής μηχανής θα ήταν υποχρεωμένος να σταματήσει, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της επόμενης φάσης.

Η παραγωγική διαδικασία και το αποτέλεσμά της θα εξαρτάτο ακόμα και από την κόπωση του χειριστή. Στα συστήματα CNC, παρακάμπτονται αυτά τα προβλήματα και επιπλέον, επειδή η επαναληψιμότητα του αποτελέσματος είναι σε υψηλά επίπεδα, ο έλεγχος της ποιότητας περιορίζεται στο πρώτο μόνο κομμάτι.

Στις συμβατικές εργαλειομηχανές, η δυνατότητα κοπής περιγραμμάτων τα οποία απαιτούν κίνηση του κοπτικού εργαλείου ταυτόχρονα σε δύο άξονες, βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από την εμπειρία και δεξιοτεχνία του χειριστή και αυτό μόνο για απλά κομμάτια, ενώ η κοπή περιγραμμάτων σε τρεις διαστάσεις είναι εντελώς αδύνατη. Αντίθετα στις εργαλειομηχανές CNC, οι δυνατότητες αυτές είναι χαρακτηριστικές.

Σε αντιστάθμισμα αυτών των πλεονεκτημάτων, οι εργαλειομηχανές CNC έχουν υψηλότερο κόστος αγοράς και συντήρησης και απαιτούν έμπειρους προγραμματιστές εξοικειωμένους με τις μηχανουργικές κατεργασίες, τον προγραμματισμό και τη λειτουργία τους.

3.2.2 Βασικές χρήσεις και κύρια μέρη στις επιτραπέζιες φρέζες αριθμητικού ελέγχου

Μια επιτραπέζια φρέζα αριθμητικού ελέγχου CNC εν συγκρίσει με τα πολύ μεγαλύτερα βιομηχανικά κέντρα κατεργασιών αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων, λόγω του μικρού μεγέθους και του χαμηλού κόστους απόκτησής της. Επίσης οι επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC εξυπηρετούν τις ανάγκες πολλών επαγγελματιών, όπως των κατασκευαστών κοσμημάτων, αναμνηστικών (μετάλλια), ανάγλυφων εικόνων και άλλων που ασχολούνται με τη χάραξη ή την παραγωγή μικρών ή μεσαίων εξαρτημάτων για καθημερινή χρήση, και όχι μόνο.

Κύρια μέρη σε επιτραπέζιες φρέζες αριθμητικού ελέγχου αποτελούν:

- I. Οι άξονες της εργαλειομηχανής: Με αυτούς επιτελείται συνδυασμός γραμμικών και περιστροφικών κινήσεων. Κάθε άξονας νοείται τόσο με την κινηματική του έννοια, όσο και σαν σύστημα μετάδοσης κίνησης και ισχύος ή μέτρησης επί αυτού των στοιχείων κίνησης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση). Οι άξονες, η κίνησή τους και ο έλεγχός τους είναι αποφασιστικής σημασίας για την κατάταξη, το χαρακτηρισμό και τις δυνατότητες των επιτραπέζιων CNC φρεζομηχανών, για αυτό και αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

- II. Ο κινητήρας κύριας ατράκτου δια του οποίου συντελείται η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου.
- III. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει συνήθως ένα αριθμό μικροεπεξεργαστών, μνήμης (RAM & ROM) και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την επεξεργασία και διαχείριση του προγράμματος κοπής καθώς και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο των αξόνων.
- IV. Η/Υ και λειτουργικό λογισμικό για την διαχείριση του προγράμματος κοπής στη μηχανή (με ενσωματωμένο CAM ή μέσω post-processor από εξωτερικό CAM), την εκτύπωση αρχείων και ενδεχομένως την παρακολούθηση της λειτουργίας της εργαλειομηχανής.

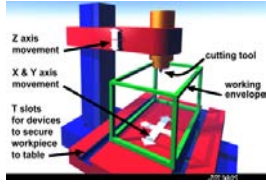
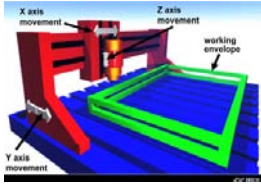
3.2.3 Κριτήρια με τα οποία ορίζεται μια φρέζα CNC ως «επιτραπέζια» και πεδία εφαρμογής

Κριτήρια για τον χαρακτηρισμό μιας CNC φρέζας ως επιτραπέζιας αποτελούν:

- I. Καταρχήν το μικρό μέγεθος μιας επιτραπέζιας CNC μηχανής, που την καθιστά ικανή να τοποθετηθεί/εδραστεί σε μια τράπεζα, αυτός εξάλλου είναι και ο λόγος που οι μηχανές αυτές ονομάζονται «επιτραπέζιες» (Desktop).
- II. Οι επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC είναι συνήθως εξοπλισμένες με βηματικούς κινητήρες (stepper motors) και δεν έχουν μηχανισμούς αυτόματης αλλαγής εργαλείων. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις επιτραπέζιων CNC εργαλειομηχανών, οι οποίες κοστίζουν σχετικά ακριβά (Τάξη ορισμένων δεκάδων χιλιάδων ΕΥΡΩ) και είναι εφοδιασμένες με servo κινητήρες ή/και μύλο αλλαγής κοπτικών εργαλείων.
- III. Διάκριση πρέπει να γίνει και μεταξύ επιτραπέζιων φρεζών CNC και των λεγόμενων routers. Οι δεύτεροι χρησιμοποιούνται κατά κανόνα κυρίως σε εφαρμογές επιγραφοποιίας και γενικότερα 2D εφαρμογών (Πίνακας 3.1).

Πεδία εφαρμογής των επιτραπέζιων εργαλειομηχανών CNC κυρίως είναι:

- Κοπή 2D μορφών, χαρακτική (engraving)
- Κοπές σε μαλακά υλικά (Κερί, αφρώδη κλπ)
- Κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού
- Κατασκευή πρότυπων μορφών (master patterns) για δευτερεύουσες παραγωγικές διαδικασίες και βοηθητικά εργαλεία και μήτρες.
- Κατασκευή διάτρητων ηλεκτρονικών πλακετών
- Για εκπαιδευτικούς σκοπούς

Milling machine	Router
	
<p><u>Υλικά :</u></p> <p>Οι φρεζομηχανές είναι ικανές να κατεργαστούν ένα μεγάλο πλήθος υλικών (από ξύλο μέχρι χάλυβες).</p> <p><u>Working area/Work envelope:</u></p> <p>Οι επιτραπέζιες φρεζομηχανές έχουν παραπλήσιες ή γενικά συγκρίσιμες ωφέλιμες διαδρομές σε όλους τους άξονες τους X, Y και Z.</p>	<p><u>Υλικά:</u></p> <p>Οι routing μηχανές μπορούν να κατεργαστούν κυρίως μαλακά υλικά, όπως ξύλο και μπορούν απλά να χαράσσουν μαλακά μέταλλα, όπως αλουμίνιο και μπρούτζο.</p> <p><u>Working area/Work envelope:</u></p> <p>Τα routers έχουν συνήθως πολύ μεγαλύτερες διαδρομές κατά τους άξονες X και Y και πολύ μικρότερη στον άξονα Z.</p>

Πίνακας 3.1 Διαφορές desktop milling machines με desktop routers

3.2.4 Άξονες και έλεγχος κίνησης και θέσης τους στις επιτραπέζιες CNC φρέζες [3.2]

Βασικές έννοιες αξόνων στις CNC εργαλειομηχανές

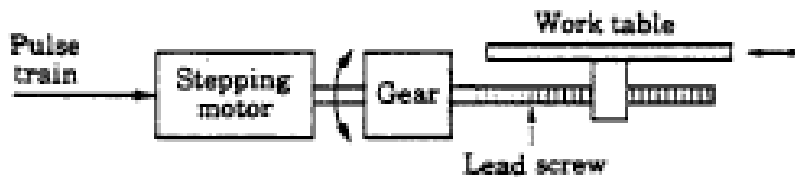
Σε κάθε εργαλειομηχανή και εν προκειμένω στις CNC επιτραπέζιες ή μη εργαλειομηχανές-φρέζες, διακρίνονται οι άξονες κίνησης τους. Ως τέτοιοι νοούνται όλοι οι ανεξάρτητα κινούμενοι ευθύγραμμοι ή περιστροφικοί μηχανισμοί, δια των οποίων επιτυγχάνεται η κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου της κατεργασίας. Μπορούν να κινούν την τράπεζα πρόσδεσης του κατεργαζόμενου αντικειμένου, το κοπτικό εργαλείο ή και τα δύο.

Με βάση τους άξονες που ενσωματώνουν οι περισσότερες CNC εργαλειομηχανές γενικά χαρακτηρίζονται ως τριών (3), τεσσάρων (4) ή και πέντε (5) αξόνων. Σε επιτραπέζια κλίμακα όμως συναντώνται κυρίως μηχανές τριών (3) αξόνων, σε κάποιες από τις οποίες υπάρχει η δυνατότητα εναλλαγής ενός εκ των ευθυγράμμων αξόνων με περιστροφικό μηχανισμό (διαίρετης). Σε σπανιότερες περιπτώσεις υπάρχουν και επιτραπέζιες μηχανές τεσσάρων αξόνων με δυνατότητα ταυτόχρονης κίνησης τριών ευθυγράμμων αξόνων και ενός περιστροφικού.

Στις επιτραπέζιες εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC), όσον αφορά την μετάδοση κίνησης στους άξονές τους έχουν επικρατήσει κυρίως δύο συστήματα ελέγχου κίνησης και θέσης, τα συστήματα ανοικτού βρόγχου (open-loop control systems) και τα συστήματα κλειστού βρόγχου (closed-loop control systems).

Συστήματα Ελέγχου Ανοικτού Βρόγχου (Open-loop Control Systems)

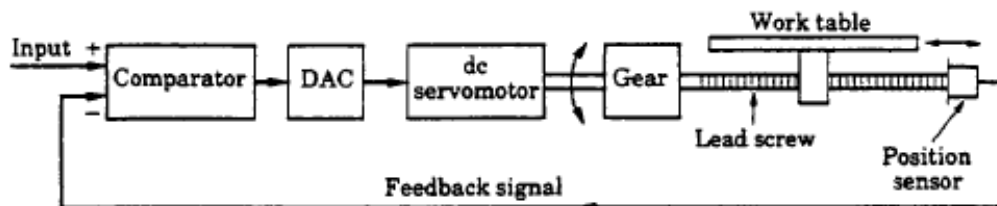
Ως σύστημα ανοικτού βρόγχου ορίζεται αυτό στο οποίο δεν υπάρχει ανάδραση. Για την οδήγηση του κοχλία κίνησης (lead screw) του κάθε άξονα της εργαλειομηχανής χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες (stepping motors). Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα αν αυτή δεν επαρκεί για να κινεί τον κοχλία κίνησης άνετα μέχρι το επιθυμητό σημείο. Η συχνότητα του βηματικού κινητήρα συνδέεται άμεσα με την μέγιστη αναπτυσσόμενη στρεπτική ροπή αντίστασης που ασκείται υπό φόρτιση. Όσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι η στρεπτική αυτή ροπή τόσο χαμηλότερη θα πρέπει να επιλέγεται και η συχνότητα του κινητήρα που οδηγεί τον άξονα. Στην περίπτωση εμφάνισης πολύ μεγάλων δυνάμεων κατά την κοπή θα μπορούσαν να σημειώνονται στρεπτικές ροπές στον κινητήρα κάποιου άξονα που θα ξεπερνούσαν τα όρια του. Συνεπώς οι βηματικοί κινητήρες είναι περισσότερο κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου δεν σημειώνονται πολύ μεγάλες δυνάμεις κοπής (π.χ. κατάλληλοι για εργαλειομηχανές επιτραπέζιας διάταξης για κατεργασία μαλακών υλικών).



Σχήμα 3.1 Σύστημα Ανοικτού Βρόγχου

Συστήματα Ελέγχου Κλειστού Βρόγχου (Closed-loop Control Systems)

Στα συστήματα κλειστού βρόγχου γίνεται κυρίως χρήση σερβοκινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC) με διατάξεις ανάδρασης, για να διασφαλιστεί ότι δε θα υπάρχει απόκλιση από την επιθυμητή θέση. Ο αισθητήρας ανάδρασης που χρησιμοποιείται είναι ένας οπτικός κωδικοποιητής (optical encoder).



Σχήμα 3.2 Σύστημα ανοικτού βρόγχου

Κινητήρες πρόωσης αξόνων (drive system motors)

Στους κινητήρες για άξονες πρόωσης το κύριο ζητούμενο είναι η δυναμική συμπεριφορά των κινούμενων μαζών. Δηλαδή κάθε αλλαγή των στροφών του κινητήρα πρέπει να γίνεται κατά το δυνατόν ταχύτερα και χωρίς ταλαντώσεις. Επίσης η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της κίνησης πρέπει να είναι υψηλές ανεξάρτητα από τις υπερνικούμενες δυνάμεις και οι ταχύτητες κίνησης εν κενώ (χωρίς φορτίο) κατά το δυνατό υψηλότερες. Οι κινήσεις προώσεως των αξόνων μίας εργαλειομηχανής πρέπει γενικά να είναι μεγάλης ακρίβειας και να έχουν μικρές επιβραδύνσεις, λόγω τριβών. Οι μετατοπίσεις των αξόνων πρέπει να είναι να μην επηρεάζονται σημαντικά από τα φορτία αντίδρασης, δηλαδή από δυνάμεις τριβής και αδρανειακές δυνάμεις. Επίσης, οι κινήσεις προώσεως πρέπει να είναι σταθερές, καθώς απότομες αλλαγές και ταλαντωτικές κινήσεις είναι μη αποδεκτές, μιας και επιδρούν δραστικά στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Οι κύριες απαιτήσεις για τους κινητήρες των αξόνων είναι [3.1]:

- Σταθερή ροπή στρέψης σε όλο το εύρος των στροφών λειτουργίας των κινητήρων.
- Μέγιστη αποδιδόμενη ροπή σε συνθήκες αιχμής (peak) τουλάχιστον τετραπλάσια από την ονομαστική του κινητήρα.

Στις κινήσεις προώσεων αξόνων των επιτραπέζιων εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι κινητήρων :

- Σύγχρονοι κινητήρες (servo motors) εναλλασσόμενου ρεύματος (AC – Servo Motors)

Εδώ η ροπή είναι σταθερή, άρα η ισχύς αυξάνεται ανάλογα με τις στροφές. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου κινητήρα σε σύγκριση με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι η έλλειψη συλλέκτη και ψηκτρών (άρα ελαχιστοποιείται η συντήρηση , δεν υπάρχουν όρια μεταγωγής και οι απώλειες είναι μειωμένες), οι μειωμένες απώλειες σε θερμότητα, άρα υψηλότερη διαθέσιμη ισχύς και οι μεγαλύτερες δυνατότητες επιτάχυνσης λόγω συγκριτικά χαμηλότερης ροπής αδράνειας.

- Βηματικοί κινητήρες (stepping motors)

Περιστρέφονται κατά ένα βήμα για κάθε παλμό που δέχονται και άρα, θεωρητικά τουλάχιστον, δεν απαιτείται ταχύμετρο και ανάδραση για τον έλεγχο τους , με αποτέλεσμα ο έλεγχος της θέσης αλλά και της ταχύτητας να απλοποιείται σημαντικά σε επίπεδο ελέγχου αριθμού και ρυθμού παλμών. Επίσης δεν χρειάζονται συντήρηση και είναι σχετικά οικονομικοί. Παρόλο αυτά η συχνότητα απόκρισης στους παλμούς οδήγησης έχει κάποιο όριο και έτσι και οι επιτευξίμες μέγιστες προώσεις έχουν αντίστοιχο όριο. Επίσης η μέγιστη ροπή και οι επιταχύνσεις είναι σχετικές χαμηλές. Μία ακόμη δυσκολία είναι η επάρκεια της ανάλυσης σε αριθμό βημάτων ανά περιστροφή οπότε είναι πιθανόν να απαιτηθεί κιβώτιο ταχυτήτων ή αναστροφέας συχνότητας (inverter) .

Μια σύγκριση μεταξύ servo και stepping motors γίνεται στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί

STEPPER TECHNOLOGY	SERVO TECHNOLOGY
Αξιοπιστία και συντήρηση	
Οι βηματικοί κινητήρες δεν περιλαμβάνουν ψήκτρες (brushless). Παρουσιάζουν μικρές ή ελάχιστες φθορές και ουσιαστικά δε χρειάζονται συντήρηση.	Οι κινητήρες servo με ψήκτρες απαιτούν αλλαγή αυτών , τυπικά, έπειτα από έντονο φόρτο εργασίας 5000 ωρών. Στην περίπτωση μικρού φόρτου εργασίας μπορούν και αυτοί να θεωρηθούν ότι απαλλάσσονται από τη διαδικασία της συντήρησης.
Κόστος	
Οι βηματικοί κινητήρες τείνουν να είναι ελαφρώς πιο οικονομικοί από τους αντίστοιχους servo και μάλιστα αυτή η διαφορά κόστους ολοένα και μικραίνει.	Οι κινητήρες servo με πλαίσιο τύπου NEMA23 τείνουν να κοστίζουν 5% - 15% περισσότερο της τιμής των αντίστοιχων βηματικών κινητήρων του ίδιου μεγέθους.
Ευκρίνεια και ακρίβεια	
Για δεδομένο βήμα του ατέρμονα κοχλία , ένας τυπικός βηματικός κινητήρας τεσσάρων φάσεων μπορεί να αποδώσει 200 πλήρη βήματα (full steps), 200 μισά βήματα (half steps) και μέχρι 25000 μικρό-βήματα ανά περιστροφή. Είναι βασικό επίσης να αναφερθεί ότι από τη στιγμή που ο βηματικός κινητήρας αποτελεί σύστημα ανοικτού βρόγχου, δε χρειάζεται απαραίτητα να επιτυγχάνει την ακριβή επιθυμητή θέση που έχει οριστεί , ιδιαίτερα επί την επίδραση φορτίου. Ειδικότερα η μικρή ακρίβεια θέσης εμφανίζεται στην περίπτωση μικρό-βημάτων (micro stepping), που είναι κυρίως χρήσιμα στην περίπτωση που θέλουμε να ομαλοποιήσουμε την κίνηση.	Η ευκρίνεια των κινητήρων servo εξαρτάται από την παλμογεννήτρια (encoder) που χρησιμοποιείται. Τυπικές παλμογεννήτριες παράγουν 2000 με 4000 παλμούς ανά περιστροφή , καθώς επίσης υπάρχουν παλμογεννήτριες που αποδίδουν 10000 παλμούς ανά περιστροφή. Επιπλέον , εφόσον οι κινητήρες servo είναι κλειστού βρόγχου , αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να επιτύχουν τη διαθέσιμη ευκρίνεια και είναι ικανοί να αποδώσουν τη θεσική ακρίβεια που απαιτείται .
Υψηλή ταχύτητα και ισχύς	
Οι βηματικοί κινητήρες στις υψηλές ταχύτητες παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές στρεπτικής ροπής. Η κατάσταση αυτή βελτιώνεται ελαφρώς με τη διαδικασία των μικρό-βημάτων (micro stepping) , παρόλο αυτά , εάν ο βηματικός κινητήρας δε χρησιμοποιείται σε σύστημα κλειστού βρόγχου , συνήθως δεν αποδίδει τόσο καλά όσο ένας κινητήρας servo. Στην περίπτωση που ο βηματικός κινητήρας χρησιμοποιηθεί με τη μορφή συστήματος κλειστού βρόγχου , το κόστος που προκύπτει είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της αγοράς ενός κινητήρα servo του ίδιου μεγέθους.	Συγκριτικά με τους βηματικούς κινητήρες , οι κινητήρες servo μπορούν να παράγουν διπλάσια ή τετραπλάσια ταχύτητα και ισχύ. Αυτή η δυνατότητα απορρέει από τη χρήση και την εξέλιξη των συστημάτων κλειστού βρόγχου (σταθερή ανάδραση θέσης) , κάτι το οποίο επιτρέπει την συνύπαρξη υψηλών ταχυτήτων και εξαιρετική αξιοπιστία. Η φύση των συστημάτων κλειστού βρόγχου και η εφαρμογή τους σε συστήματα με κινητήρες servo επιτρέπει στα αντίστοιχα συστήματα να εμφανίζουν υψηλές τιμές στρεπτικής ροπής.

Ανοικτός βρόγχος (open loop) vs Κλειστός βρόγχος (closed loop)	
<p>Οι βηματικοί κινητήρες σχεδόν πάντοτε χρησιμοποιούνται σε ανοικτά συστήματα βρόγχου. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας ελέγχεται στο να κινήσει μια συγκεκριμένη ποσότητα, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται, ότι ο υπολογιστής που τον ελέγχει, γνωρίζει εάν αυτό έχει λάβει χώρα. Σε μερικές περιπτώσεις, φαινόμενα όπως ο είναι συντονισμός και η δημιουργία κραδασμών, έχει ως αποτέλεσμα ο βηματικός κινητήρας να χάνει βήματα ή και να μην ανταποκρίνεται πριν ακόμα τελειώσει η κίνηση. Αυτή είναι μια πολύ πιθανή κατάσταση στους εν λόγω κινητήρες.</p>	<p>Από τη φύση της κατασκευής τους, οι κινητήρες servo έχουν σταθερή ανάδραση θέσης, λόγω της οπτικής παλμογεννήτριας (optical encoder), με την οποία είναι εφοδιασμένοι. Η συγκεκριμένη συσκευή είναι τοποθετημένη στο πίσω μέρος του κινητήρα και κρατά τον ελεγκτή ενημερωμένο για το πόσο πραγματικά έχει περιστραφεί ο άξονας του κινητήρα. Η ανάδραση θέσης χρησιμοποιείται για να διορθώσει κάθε διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θέσης. Η σταθερή διορθωτική αυτή διεργασία επιτυγχάνεται σε υψηλές ταχύτητες (μέχρι και τρεις φορές το συνολικό έργο) καθώς και σε περιπτώσεις αυξημένης ισχύος (μέχρι και τρεις φορές τη στρεπτική ροπή) σε υψηλές ταχύτητες. Το σύστημα κλειστού βρόγχου των κινητήρων servo διασφαλίζει επίσης ότι δεν πρόκειται να εμφανιστεί κάποια καθυστέρηση στην κίνηση, εκτός και αν κάποιο αμετακίνητο αντικείμενο εμποδίσει την τροχιά κίνησης.</p>
3D εγχάραξη (curving) & κατεργασίες περιγράμματος (contouring)	
<p>Οι βηματικοί κινητήρες είναι ικανοί για εφαρμογές που απαιτούν 3D εγχάραξη, αλλά λόγω της μείωσης της στρεπτικής ροπής σε υψηλές ταχύτητες, θα πρέπει να κινούνται πιο αργά από ότι οι κινητήρες servo για να υπάρχει βεβαιότητα ότι ο κινητήρας δε θα σταματήσει ή θα χάσει βήματα.</p>	<p>Οι κινητήρες servo μπορούν να αποδώσουν συνεχή κινήσεις υψηλών ταχυτήτων, καθιστώντας τους με αυτό τον τρόπο πολύ καλύτερους από τους αντίστοιχους βηματικούς σε εφαρμογές που σχετίζονται με διαστασιολογική εγχάραξη. Σύμφωνα με την εταιρεία Techno, διαπιστώθηκε ότι η χρήση servo κινητήρων μείωσε σε ορισμένες περιπτώσεις τον χρόνο κατεργασίας ακόμα και κατά 80%. Η συνεχή κίνηση έχει επίσης ως αποτέλεσμα καλύτερες τελικές επιφάνειες. Επιπλέον, η αξιόπιστη συνεχή και υψηλή ταχύτητα κίνησης των κινητήρων servo μπορεί να μειώσει την πιθανότητα να εμφανιστούν σημάδια καυαλίσματος (scorching) και τήξης (melting) σε τεμάχια που έχουν σαν πρώτη ύλη το ξύλο ή το πλαστικό.</p>

Πίνακας 3.2 Σύγκριση stepping motor με servo για χρήση σε επιτραπέζιες φρέζες αριθμητικού ελέγχου [3.6]

3.2.5 Κινητήρες Κύριας Ατράκτου (Spindles)

Εξίσου σημαντικό ρόλο με τους κύριους άξονες κίνησης μιας CNC επιτραπέζιας φρέζας παίζει και ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος κινεί το ίδιο το κοπτικό εργαλείο. Αυτός δεν συνδέεται και δεν προσμετρείται στους άξονες της εργαλειομηχανής, αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα και ονομάζεται Κινητήρας Κύριας Ατράκτου (Spindle Motor). Κατά κανόνα είναι πάντα πολύ πιο ισχυρός από τους κινητήρες κίνησης των αξόνων, καθώς αυτός κυρίως αντιμετωπίζει και υπερνικά τα φορτία της κοπής (αναπτυσσόμενες στρεπτικές ροπές).

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία κατηγοριοποίησης και επιλογής των κινητήρων κύριας ατράκτου, παρατίθενται παρακάτω κάποιες βασικές έννοιες για τους κινητήρες.

Χαρακτηριστικά στοιχεία και μέγεθος κινητήρων κύριας ατράκτου

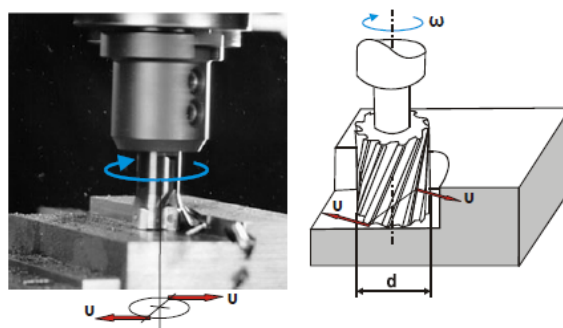
Η βασικότερη παράμετρος που επηρεάζει τις **ταχύτητες κοπής και μετατόπισης** σε μια κατεργασία (ορίζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο) και συσχετίζεται με τον κινητήρα που κινεί το κοπτικό εργαλείο είναι η **γωνιακή ταχύτητα ω** (σε **ακτίνια /sec**) η οποία διαφορετικά εκφράζεται και σαν **ταχύτητα περιστροφής n** του κινητήρα (σε **στροφές ανά λεπτό - rpm**) συνδεόμενες μεταξύ τους με τη σχέση :

$$\omega = 2 \times \pi \times n / 60 \text{ (rpm)} \quad (3.1)$$

Η ταχύτητα κοπής v , εκτός από τη γωνιακή ταχύτητα ή την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα κύριας ατράκτου που καθοριστικά επηρεάζονται από την απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη της κοπής, εξαρτάται επίσης και από την τοπική γεωμετρία της θέσης κοπής. Η μαθηματική σχέση που δίνει την ταχύτητα κοπής είναι :

$$v = \pi \times d \times n / 1000 \text{ (m/min)} , n(\text{rpm}) , d(\text{mm}) \quad (3.2)$$

όπου d η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

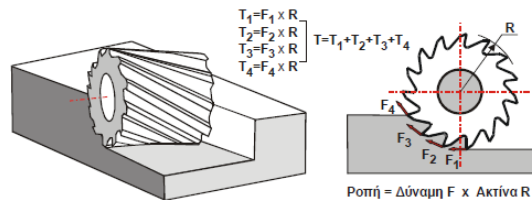


Σχήμα 3.3 Ταχύτητα κοπής σε κατεργασίες φρεζαρίσματος

Σημαντική επίσης παράμετρος των ηλεκτρικών κινητήρων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η **αποδιδόμενη ισχύς P**, η οποία μετριέται σε kWatt και σε Hp. Σε όλες τις περιπτώσεις των κινητήρων δεν ενδιαφέρει τόσο η ισχύς τους ως απόλυτο μέγεθος, όσο η συσχετίσή της ισχύος με τις στροφές λειτουργίας, στις οποίες αποδίδεται αυτή. Για τη συσχέτιση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αναπτυσσόμενη **ροπή στρέψεως T** που μετριέται σε N.m και εκφράζεται από τη σχέση:

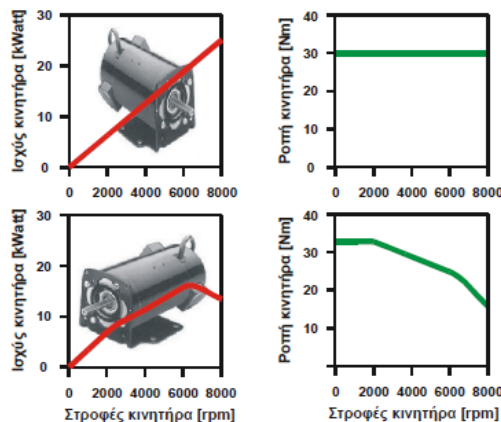
$$T = P / \omega \text{ (N.m)} \quad (3.3)$$

Η ροπή στρέψεως ενός κινητήρα εκφράζει τη δυνατότητα υπερνίκησης μιας αντίστοιχης ανθιστάμενης ροπής. Στην περίπτωση του κινητήρα κύριας ατράκτου μιας εργαλειομηχανής, η ροπή που πρέπει να υπερνικηθεί, οφείλεται στην αντίσταση κοπής, δηλαδή στην κάθετη δύναμη κοπής. Η ροπή αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 3.4 για το φρεζάρισμα, ως η συνολική ροπή, που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ροπών, που οφείλονται στις αντίστοιχες δυνάμεις κοπής (ανά δόντι κοπτικού).



Σχήμα 3.4 Χρησιμοποίηση της ροπής για την υπερνίκηση της αντίστασης κοπής

Όλα τα παραπάνω βασικά μεγέθη n , T , P μπορούν να παρασταθούν διαγραμματικά σε όλο το φάσμα στροφών λειτουργίας του κινητήρα, στη λεγόμενη **χαρακτηριστική καμπύλη** του κινητήρα, η οποία τελικά αποτελεί και την «ταυτότητά του». Οι βέλτιστοι σε απόδοση κινητήρες είναι αυτοί που εμφανίζουν σταθερή στρεπτική ροπή, σε όλο το εύρος των στροφών λειτουργίας τους. Για να συμβεί αυτό, πρέπει η παραγόμενη ισχύς του κινητήρα να αυξάνεται, ανάλογα με τις στροφές λειτουργίας (γραμμικά). Στην περίπτωση αυτή, η αποδιδόμενη ροπή στρέψεως είναι σταθερή, σε σχέση με τις στροφές και το γεγονός αυτό συχνά ονομάζεται **επίπεδη απόδοση ροπής**.



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος και ροπή

Επιλογή Κινητήρων Κύριας Ατράκτου (spindle motors)

Στους κινητήρες για κύριες ατράκτους το κύριο ζητούμενο είναι η εξασφάλιση αρκετής ισχύος και ικανού εύρους στροφών για την εκτέλεση της κατεργασίας αλλά και η κατά το δυνατόν μικρότερη μεταβολή των στροφών του κινητήρα με τη μεταβολή του φορτίου. Η μεταβολή του φορτίου πρέπει να είναι συνεχής. Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι κινητήρων, συνεχούς ρεύματος με εξωτερική διέγερση και ασύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η επιλογή κινητήρα εξαρτάται από τις εφαρμογές και την ποσότητα των τεμαχίων που θέλουμε να παράγουμε.

Έτσι, ανάλογα με τη εκάστοτε κατεργασία, επιλέγεται και ο αντίστοιχος κινητήρας κύριας ατράκτου, σε σχέση με τα χαρακτηριστικά ροπής και ισχύος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση λειαντικής μηχανής που απαιτεί μεγάλη ταχύτητα και εμφανίζει μικρές δυνάμεις κοπής και ροπή αντίστασης, θα χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας, που αποδίδει τη μέγιστη ισχύ του σε υψηλές στροφές. Σε αντίθετη περίπτωση, θα απαιτηθεί η προσθήκη πολλαπλασιαστή στροφών, που όμως αυξάνει το κόστος.

Τέτοια περίπτωση φαίνεται στο πάνω μέρος του Σχήματος 3.5 . Για παράδειγμα, ο συγκεκριμένος κινητήρας μπορεί να διπλασιάσει τις στροφές του, άρα και την ταχύτητα κοπής, χωρίς να χάσει σε ικανότητα υπερνίκησης της ροπής αντίστασης. Υπάρχουν όμως και κινητήρες που δεν έχουν τη συμπεριφορά αυτή, όπως φαίνεται στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος. Στην περίπτωση αυτή, η ροπή του κινητήρα δεν είναι σταθερή σε όλο το εύρος των στροφών, γεγονός που δε βοηθάει τον ακριβή έλεγχο της κινητήριας ατράκτου.

Οι κινητήρες κύριας ατράκτου πρέπει να μπορούν να λειτουργούν σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος στροφών, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν όλες τις εναλλαγές στις συνθήκες κατεργασίας. Οι κύριες απαιτήσεις από τους κινητήρες αυτούς είναι [3.1]:

- Η δυνατότητα παραγωγής επίπεδων καμπυλών ροπής για ένα μεγάλο εύρος στροφών.
- Μέγιστη αποδιδόμενη ροπή σε συνθήκες αιχμής (peak) , τουλάχιστον διπλάσια από την ονομαστική τιμή του κινητήρα.
- Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη περιστροφική ταχύτητα να κυμαίνεται για φρέζες από 30 έως 50.
- Για επιτραπέζιες CNC φρέζες μέγιστη κυρίως ταχύτητα περιστροφής 12000-24000 rpm.

Στις κινητήριες ατράκτους εργαλειομηχανών χρησιμοποιούνται κυρίως οι παρακάτω τύποι κινητήρων :

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC drives). Πρόκειται για κινητήρες εξωτερικής διέγερσης με αναστρεφόμενους πόλους και εξωτερικό κύκλωμα ψύξης, που χρησιμοποιούνται πολύ στις ατράκτους των εργαλειομηχανών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα τους είναι ο σχετικά απλός έλεγχος και το μικρό κόστος των ηλεκτρονικών τους. Αντίθετα, η χρήση ψηκτρών (brushes) έχει ως συνέπεια την ανάγκη συχνής συντήρησής τους, ενώ σε πολύ χαμηλές ταχύτητες εμφανίζουν αστάθεια (stall) και σε πολύ υψηλές υπάρχει ο περιορισμός των εναλλαγών των ψηκτρών του κινητήρα. Ένα επιπλέον μειονέκτημα αυτών των κινητήρων είναι ο αυξημένος θόρυβος που παράγεται από τις ψήκτρες. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των κινητήρων είναι το χαμηλό κόστος, το οποίο όμως τους καθιστά λιγότερο ακριβής.

Τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες (Three phase asynchronous motors). Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη κατηγορία κινητήρων για ατράκτους εργαλειομηχανών. Επειδή η μεταφορά ισχύος γίνεται μέσω του φαινομένου της επαγωγής, οι κινητήρες αυτοί δε χρειάζονται συλλέκτες (brushless). Με τον τρόπο αυτό, περιορίζονται οι ανάγκες συντήρησης των κινητήρων αυτών. Οι αρχικές δυσκολίες ελέγχου των κινητήρων αυτών και, ιδίως, της ρύθμισης των στροφών τους έχει σήμερα λυθεί με ηλεκτρονικές συσκευές μετατροπών συχνότητας. Υπάρχουν τρεις τύποι κινητήρων AC κυρίας ατράκτου : κινητήρες με σταθερό κώνο συγκράτησης του κοπτικού εργαλείου (fixed collet spindles) , κινητήρες με διατάξεις γρήγορης αλλαγής του κοπτικού εργαλείου (manual quick change) και κινητήρες αυτόματης αλλαγής του κοπτικού εργαλείου (με εργαλειοδέτη).

<i>Χαρακτηριστικά</i>	<i>AC spindle</i>	<i>Brush spindle</i>
Ψήκτρες	Όχι	Ναι
Θόρυβος	Σε χαμηλά επίπεδα	Σε υψηλά επίπεδα
Απαιτήσεις για συντήρηση	Καθόλου – οι εδράσεις συνήθως είναι καλυμμένες και έχουν λιπανθεί	Οι ψήκτρες πρέπει να αντικαθιστούνται συχνά
Έλεγχος ταχύτητας	Συνήθως ελέγχεται από τον αναγκαίο AC inverter	Ελάχιστος, όχι ακριβής, εάν υπάρχει χειροκίνητος
Πεδίο ισχύος	Κλασματικά , από 1HP μέχρι 20HP και παραπάνω	Σε εύρος από 0-3HP
Αλλαγή κοπτικού εργαλείου	Αυτόματη ή χειροκίνητη	Χειροκίνητη
Κόστος	Μεγάλο	Μικρό έως μέσο
Ακρίβεια TIR	Συνήθως < 0.002”	Συνήθως σε εύρος 0.002”-0.004”
Απαιτήσεις σε τάση	220-440V , 1Φ ή 3Φ	τυπικά 120V AC, 220V AC 1Φ
Current used for 3HP	220V AC 1Φ - 16A 220V 3Φ – 10A	Για 3HP – απαιτείται κύκλωμα 15A
Μέγιστο μέγεθος κώνου	1.5” και μεγαλύτερο	τυπικά 0.5”

Πίνακας 3.3 Σύγκριση κινητήρων με ή χωρίς ψήκτρες για χρήση σε επιτραπέζιες φρέζες αριθμητικού ελέγχου [3.6]

Στις επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC υπάρχει πληθώρα κινητήρων όπου μπορούν να επιλεγθούν για την κύρια άτρακτο όπου φέρει το κοπτικό εργαλείο. Η σωστή επιλογή κινητήρα είναι επιβεβλημένη ώστε να υπάρχει στο σύστημα βέλτιστη απόδοση. Ο κινητήρας της κυρίας ατράκτου είναι η «καρδιά» του συστήματος. Κατά την επιλογή κινητήρα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι όπως : το υλικό που κατεργαζόμαστε , ο όγκος εργασίας (production volume) , τα κοπτικά εργαλεία , η μέγιστη πρόωση της μηχανής και ο μέγιστος αριθμός στροφών (rpm) της μηχανής. Γενικά , κάθε τύπος υλικού κόβεται με ένα συγκεκριμένο τύπο κοπτικών εργαλείων και συγκεκριμένες ταχύτητες κοπής. Τα κοπτικά εργαλεία με μεγάλες διαμέτρους απαιτούν χαμηλές ταχύτητες κοπής. Κοπτικά εργαλεία με μικρές διαμέτρους απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες. Η ταχύτητα του κινητήρα κυρίας ατράκτου και οι ταχύτητες πρόωσης θα πρέπει να επιλεγθούν ορθά ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη απόδοση και να μειωθούν οι φθορές τόσο στον κινητήρα όσο και στο κοπτικό εργαλείο. Η πρόωση και η ταχύτητα του άξονα κοπής σχετίζονται στενά μεταξύ τους. Περισσότερες στροφές (rpm) καθιστούν μια κατεργασία πιο γρήγορη. Το φορτίο αποβλήτου είναι ο παράγοντας μέσω του οποίου υπολογίζεται ο ρυθμός πρόωσης.

Σχέση υπολογισμού : (φορτίο αποβλήτου) x (# των κοπτικών αιχμών του ΚΕ) = ρυθμός πρόωσης

Πολλοί κατασκευαστές κοπτικών εργαλείων χρησιμοποιούν την παραπάνω σχέση για υπολογισμούς και χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τη χρήση των κοπτικών εργαλείων. Μέσω των καταλόγων των κατασκευαστών ΚΕ μπορούμε να υπολογίσουμε το βέλτιστο ρυθμό πρόωσης. Γενικά , οι χαμηλοί ρυθμοί πρόωσης, εξαιτίας των υψηλών τριβών που εμφανίζονται, αυξάνουν τη φθορά των κοπτικών εργαλείων. Οι υψηλές τριβές όχι μόνο φθείρουν το κοπτικό εργαλείο, αλλά θερμαίνουν και «καίνε» το υλικό που κατεργαζόμαστε. Άλλος ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη είναι ο τρόπος με τον οποίο το ΚΕ διεισδύει εντός του τεμαχίου. Η ιδανική γωνία εισχώρησης (ramp angle) πρέπει να είναι μεταξύ 0-20° από την επιφάνεια της τραπέζης της εργαλειομηχανής. Αυτή η γωνία μας επιτρέπει να εισχωρήσουμε στο υλικό με το μέγιστο ρυθμό πρόωσης. Για μεγαλύτερες γωνίες ο ρυθμός πρόωσης θα πρέπει να ελαττωθεί αναλόγως. Εισχωρώντας στο υπό κατεργασία τεμάχιο κεκλιμένα , αυξάνουμε τη διάρκεια ζωής των εδράσεων του κινητήρα κυρίας ατράκτου και του κοπτικού εργαλείου.

Κώνοι συγκράτησης Κοπτικού Εργαλείου (ΚΕ) στον κινητήρα κυρίας ατράκτου (spindle collet)

Οι κώνοι συγκράτησης των κοπτικών εργαλείων είναι από τα πιο βασικά μέρη του κινητήρα της κυρίας ατράκτου. Συσφίγγονται και συγκρατούν το κοπτικό εργαλείο με κατάλληλο τύπο περικοχλίου που εφαρμόζει στην περιφέρεια του εργαλειοδέτη. Κατασκευάζονται από χάλυβα, μπρούντζο κτλ. Οι κώνοι συγκράτησης κοπτικών εργαλείων τυποποιούνται. Οι πιο διαδεδομένοι κώνοι συγκράτησης κοπτικών εργαλείων τυποποιούνται κατά το πρότυπο DIN 6499, που τους τυποποιεί ανάλογα με τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου που μπορούν να συγκρατήσουν. Η τυποποίηση αυτή φαίνεται και στο Σχήμα 3.6 [3.13] που ακολουθεί.

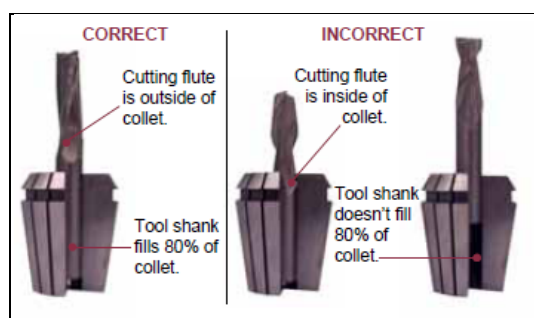
ER 8 (Range 0.5 -5 mm)
 ER11 (Range 0.5-7 mm)
 ER16 (Range 1-10 mm)
 ER20 (Range 1-13 mm)
 ER25 (Range 2- 16 mm)
 ER32 (Range 3-20 mm)
 ER40 (Range 4-26 mm)



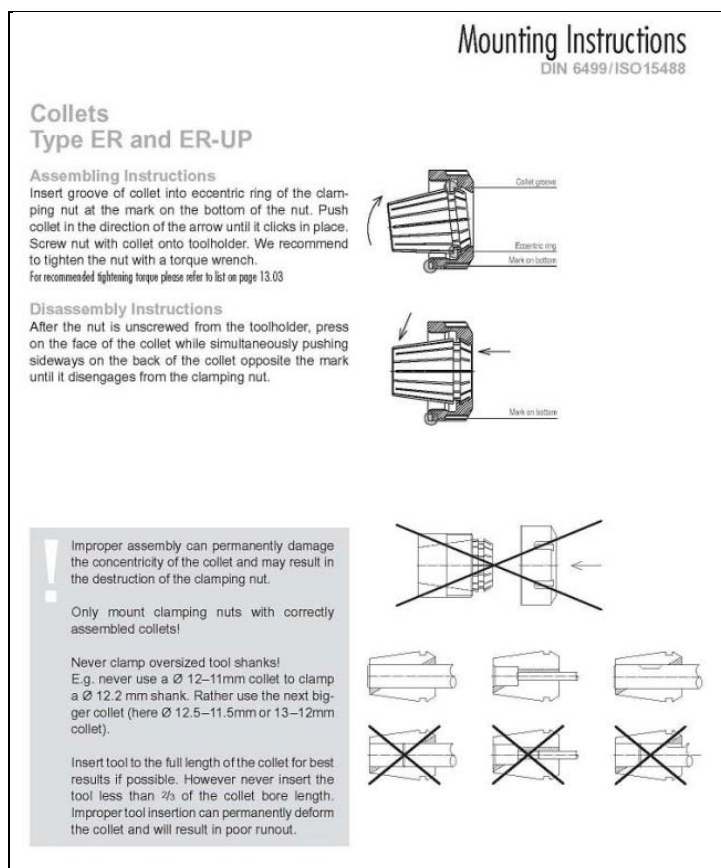
Σχήμα 3.6 Collets κατά το πρότυπο DIN 6499

Η συντήρηση του κώνου συγκράτησης των κοπτικών εργαλείων είναι επιβεβλημένη, ώστε να αξιοποιούμε στο μέγιστο την απόδοση ενός κοπτικού εργαλείου. Οι κώνοι συγκράτησης των κοπτικών εργαλείων επηρεάζουν στο έπακρο την ποιότητα και την στιβαρότητα που αποδίδονται από έναν κινητήρα κυρίας ατράκτου. Ένας καθαρός κώνος συγκράτησης συγκρατεί καλύτερα το κοπτικό εργαλείο και αποτρέπει στο να εμφανιστούν ταλαντώσεις, όταν το εργαλείο και ο κινητήρας δεν έχουν το ίδιο κέντρο περιστροφής. Είναι πολύ βασικό οι κώνοι συγκράτησης να καθαρίζονται σε κάθε αλλαγή κοπτικού εργαλείου. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής, απόβλητα και σκόνη συσσωρεύονται στις σχισμές του κώνου συγκράτησης. Λόγω αυτής της συσσώρευσης, το κοπτικό εργαλείο πιθανότατα δεν συγκρατείται ικανοποιητικά στον κώνο. Ο απαραίτητος καθαρισμός του κώνου συγκράτησης μιας εργαλειομηχανής και γενικότερα ο καθαρισμός και η συντήρηση του κινητήρα της κυρίας ατράκτου είναι απαραίτητα στοιχεία για να αποδώσει η μηχανή το μέγιστο.

Επίσης η ορθή και ευθυγραμμισμένη τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στον κώνο συγκράτησης (collet) είναι πολύ σημαντική. Θα πρέπει να επιλέγεται και κοπτικά εργαλεία με διαμέτρους που ταιριάζουν στους κατάλληλους κάθε φορά κώνους συγκράτησης, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες τάσεις στο κοπτικό εργαλείο και στον κινητήρα. Οι κοπτικές ακμές του κοπτικού δε θα πρέπει να εισέρχονται εντός του κώνου συγκράτησης ώστε να μην συσσωρεύονται εντός αυτού απόβλητα προκαλώντας αστάθεια στο όλο σύστημα συγκράτησης και κατά συνέπεια καταπόνηση του κινητήρα.



Σχήμα 3.7 Σωστή τοποθέτηση κοπτικού εργαλείου



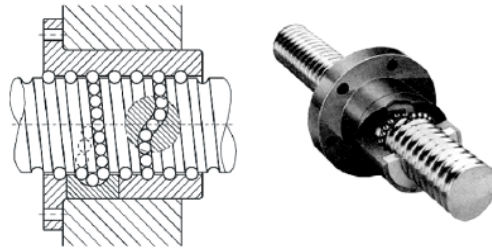
Σχήμα 3.8 Οδηγίες συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης κώνων τύπου ER και ER-UP κατά DIN 6499/ISO 15448 (ER : standard , ER-UP: ultra precision)

3.2.6 Μηχανισμοί Μετάδοσης Κίνησης στους Άξονες

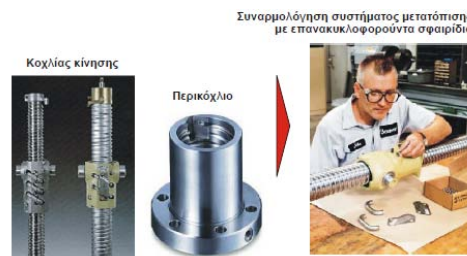
Οι μετακινήσεις κατά μήκος και γύρω από τους άξονες κατεργασίας εκτελούνται από τους αντίστοιχους κινητήρες προώσεων για τους οποίους έχει γίνει λόγος παραπάνω. Οι κινήσεις των κινητήρων αυτών ενεργοποιούνται από παλμούς, που ξεκινούν από τη μονάδα κεντρικού ελέγχου και μετατρέπονται σε κινήσεις του τεμαχίου ή του κοπτικού εργαλείου. Ο τρόπος, που μηχανικά μετατρέπεται η περιστροφική κίνηση των κινητήρων προώσεως σε γραμμικές μετατοπίσεις πρέπει να καλύπτει ένα σύνολο απαιτήσεων με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Οι κυριότερες από αυτές τις απαιτήσεις είναι η ελάχιστη δυνατή χάρη (backlash) και οι ελάχιστες δυνατές τριβές. Αυτό γιατί η μεν πρώτη επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια τοποθέτησης και κατά συνέπεια τη συνολική ακρίβεια των συστημάτων κίνησης, οι δε δεύτερες σε περιπτώσεις ειδικά όπου αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις κοπής, αδρανειακές και άλλες, επιβαρύνουν την λειτουργία των κινητήρων.

Ένας διαδεδομένος τρόπος μετατροπής περιστροφικής κίνησης σε γραμμική είναι ο μηχανισμός κοχλία κίνησης με **επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια (ballscrews)**. Ο κινητήρας προώσεως είναι συνδεδεμένος με τον κοχλία κίνησης. Το σπείρωμα αυτού του κοχλία είναι σφαιρικό αντί για τριγωνικό, που χρησιμοποιείται στους κοινούς κοχλίες. Στη θέση σύνδεσης του κοχλία κίνησης με την τράπεζα ή το εργαλειοφορείο της μηχανής, υπάρχει ένα ειδικό περικόχλιο (παξιμάδι), που έχει το ίδιο σπείρωμα με τον κοχλία κίνησης, αλλά εσωτερικό.

Ανάμεσα στον κοχλία και το περικόχλιο υπάρχουν σφαίρες κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό, με το οποίο κατασκευάζονται οι σφαίρες των ρουλεμάν, δηλαδή από βαμμένο χάλυβα. Οι σφαίρες συμπιέζονται μια την άλλη, ώστε να μην υπάρχουν διάκενα (τζόγος), που επηρεάζουν την ακρίβεια της μετατόπισης. Καθώς περιστρέφεται ο κοχλίας κίνησης, οι σφαίρες κυλινδρουν έξω από το περικόχλιο και μπαίνουν σε ένα ειδικό κανάλι που τις μεταφέρει στο άλλο άκρο του περικόχλιου. Έτσι, υπάρχει μία επανακυκλοφορία των σφαιρών, που αναγκάζει το περικόχλιο και, άρα, και την τράπεζα ή το εργαλειοφορείο να μετακινηθούν. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες μεταφοράς πάνω από 20 m/min με ακρίβεια της τάξης των 5 μm, σε όλο το μήκος μετατόπισης της τράπεζας.

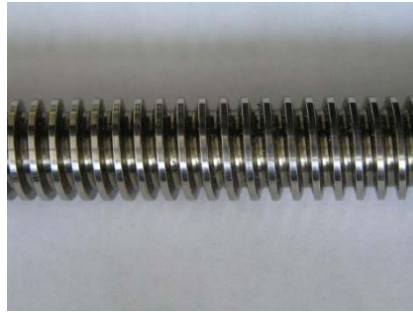


Σχήμα 3.9 Μηχανισμός επανακυκλοφορούντων σφαιρών που χρησιμοποιείται στην κίνηση των γραμμικών αξόνων κατεργασίας



Σχήμα 3.10 Τα μέρη και η συναρμολόγηση του μηχανισμού επανακυκλοφορούντων σφαιρών

Ένας άλλος, απλούστερος τρόπος μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική είναι με σύστημα **απλού κοχλία κίνησης-περικόχλιου** (lead-screw). Εδώ έχουμε και πάλι κοχλία, σε απλή επαφή με κατάλληλου υλικού τριβής περικόχλιο (Nut). Εξαιτίας των επιφανειών τριβής του ένα το σύστημα κοχλία κίνησης-περικόχλιου, εν συγκρίσει με άλλα στοιχεία μηχανών τα οποία βασίζονται σε κυλιόμενες επιφάνειες (rolling surfaces), αναπτύσσει υψηλότερες τριβές (στατικές και ολίσθησης). Ο βαθμός απόδοσης των κοχλιών κίνησης κυμαίνεται μεταξύ 25% και 70%, ενώ κοχλίες με μεγαλύτερο βήμα (higher pitch) τείνουν να είναι πιο αποδοτικοί. Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση από τα αντίστοιχα ballscrews. Οι υψηλές τιμές των τριβών που αναπτύσσονται περιορίζουν τα συστήματα με κοχλία κίνησης σε μικρότερες εφαρμογές, λόγω του ότι σε συνεχή λειτουργία και υψηλές ταχύτητες υπερθερμαίνονται. Οι κοχλιωτοί ράβδοι πρέπει συνήθως να λιπαίνονται (greased) πολύ καλά, αλλά αν χρησιμοποιούν κατάλληλο αυτολιπανόμενο περικόχλιο μπορούν ακόμα και να οδηγηθούν στεγνές (dry) με κάπως υψηλότερες όμως τιμές τριβών. Συνήθως υπάρχει δυνατότητα επιλογής του περικόχλιου.



Σχήμα 3.11 Κοχλιωτή ράβδος τύπου ACME

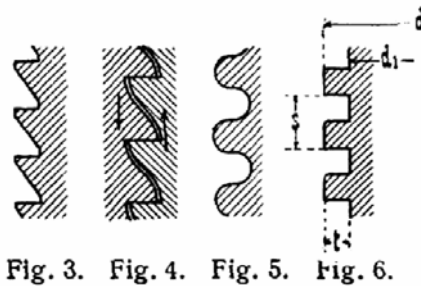


Fig. 3. Fig. 4. Fig. 5. Fig. 6.

Σχήμα 3.12 Three types of leadscrews: 3 & 4: buttress thread 6: square thread

3.2.7 Συστήματα Τροφοδοσίας Υγρού Κοπής & Πεπιεσμένου Αέρα

Όπως και στις κατεργασίες με συμβατικές μηχανές, έτσι και στην περίπτωση κοπής με εργαλειομηχανές ψηφιακής καθοδήγησης για κοπή κυρίως κάποιων μεταλλικών υλικών προτείνεται ή ακόμα και απαιτείται η χρήση υγρού κοπής ή αέρα για την τοπική ψύξη του κοπτικού και των αποβλήτων κοπής. Μάλιστα, επειδή οι κατεργασίες στις σύγχρονες μηχανές γίνονται με πολύ μεγάλες ταχύτητες κοπής, η χρήση υγρού κοπής για την προστασία του κοπτικού εργαλείου από πρόωρη φθορά είναι πολύ σημαντική. Ανάλογα με την περίπτωση κατεργασίας, χρησιμοποιείται έλαιο κοπής ή σαπουνέλαιο. Για το λόγο αυτό, σχεδόν όλες οι εργαλειομηχανές CNC είναι εξοπλισμένες με ακροφύσια, που πετούν με πίεση το ψυκτικό υγρό στη θέση κοπής.



Σχήμα 3.12 Φρεζάρισμα με υγρό κοπής

Πρέπει να σημειωθεί ότι, με την πάροδο του χρόνου, η τάση στη μηχανουργική τεχνολογία είναι να μειωθεί ή και να καταργηθεί η χρήση του υγρού κοπής. Η πρόβλεψη, ο σχεδιασμός και η έρευνα στην περιοχή αυτή εκτιμάται ότι θα περιορίσει τη χρήση των υγρών κοπής από το σημερινό επίπεδο σε ποσοστό κάτω του 30% έως το έτος 2015[3.1]. Αυτή η προσπάθεια οφείλεται στους παρακάτω λόγους :

- Τα υγρά κοπής περιέχουν διάφορα πρόσθετα, τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και για τους εργαζόμενους. Έτσι, στα πλαίσια της νέας αντιμετώπισης της μόλυνσης του περιβάλλοντος, οι διάφοροι οργανισμοί επενδύουν μεγάλα ποσά στην εξέλιξη υλικών κοπτικών εργαλείων, που δε χρειάζονται υγρό κοπής. Αντί αυτού, χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας, που δεν προκαλεί καμία επιπλέον μόλυνση.
- Τα απόβλητα που παράγονται με κατεργασίες, που χρησιμοποιούν υγρά κοπής, είναι ακάθαρτα και λαδωμένα. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην ανακύκλωση τους σε χυτήρια παραγωγής πρώτης ύλης και μειώνει την ποιότητα του νέου χάλυβα. Για τους λόγους αυτούς τα λαδωμένα απόβλητα πωλούνται από τα μηχανουργεία στα χυτήρια δυσκολότερα και πολύ φθηνότερα.

Ειδικά τώρα για τις επιτραπέζιες CNC φρέζες, οι απαιτήσεις ψύξης με υγρό κοπής είναι γενικά περιορισμένες και αφορούν μόνο σε περιπτώσεις κατεργασίας ιδιαίτερων υλικών και συγκεκριμένων μεταλλικών κραμάτων. Ένας ακόμα περιορισμός που πηγάζει από τον ίδιο τον επιτραπέζιο χαρακτήρα τους, είναι η απουσία λεκάνης συλλογής υγρού κοπής, αντλίας, φίλτρου κλπ. Έτσι στην πλειονότητα των επιτραπέζιων CNC φρεζομηχανών το ζήτημα της ψύξης αντιμετωπίζεται είτε με απλό πεπιεσμένο αέρα, είτε με αεριοποιημένο μείγμα λιπαντικού μέσου (χαμηλής περιεκτικότητας) που ψεκάζεται στην επιφάνεια κοπής με χρήση διάταξης πεπιεσμένου αέρα και αξιοποίηση του φαινομένου Venturi (mist cooling), όπως δείχνει παρακάτω και το Σχήμα 3.13 (Comagrav).



Σχήμα 3.13 Mist cooling system της εταιρείας Comagrav

3.3 Βασικές οδηγίες χρήσης και προγραμματισμού επιτραπέζιων φρεζών ψηφιακού ελέγχου (CNC)

3.3.1 Γενικές οδηγίες - πληροφορίες

Στην πορεία εκμάθησης της λειτουργίας και ορθής αξιοποίησης μιας επιτραπέζιας φρέζας CNC θα πρέπει ο χρήστης να εστιάζει στις πιο βασικές έννοιες που απαρτίζουν τη λειτουργία της. Αρχικά θα πρέπει να κατανοήσει τα βασικά τμήματα της. Εν συνεχεία θα πρέπει να έχει πλήρη αντίληψη για το πώς ορίζονται οι κύριοι άξονες της. Επίσης θα πρέπει έχει εξοικειωθεί με τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν. Και τέλος θα πρέπει να γνωρίσει τις προγραμματιστικές της δυνατότητες.

Η ακριβής γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών μιας CNC εργαλειομηχανής είναι πάρα πολύ σημαντική, έτσι ώστε οι χρήστες να αξιοποιήσουν στο έπακρο τις δυνατότητες της προγραμματιστικά σε επίπεδο δημιουργίας κώδικα κοπής σε περιβάλλον CAM. Τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να γνωρίζει κανείς για μια εργαλειομηχανή CNC που θα προγραμματίσει είναι τα εξής :

- Πόσους άξονες κίνησης έχει η μηχανή ;
- Ποιες είναι οι μέγιστες στροφές (RPM) της κύριας ατράκτου της μηχανής ;
- Ποια είναι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα κύριας ατράκτου της μηχανής ;
- Πόσες αυτόματες αλλαγές εργαλείου μπορούν να συμβούν αν υπάρχει αυτή η δυνατότητα;
- Πόση είναι η μέγιστη διαδρομή κάθε άξονα ;
- Ποια είναι η μέγιστη ταχύτητα πρόωσης της μηχανής (rapid rate);
- Ποια είναι η μέγιστη ταχύτητα κοπής της μηχανής (cutting feedrate);

Τα παραπάνω αποτελούν μόνο τα βασικά χαρακτηριστικά μιας εργαλειομηχανής CNC. Ωστόσο, όσο περισσότερα γνωρίζει κανείς για τη μηχανή που χρησιμοποιεί, τόσο πιο εύκολη είναι η χρήση και η συντήρησή της.

Φορά των αξόνων κίνησης

Ο προγραμματιστής μια εργαλειομηχανής CNC πρέπει οπωσδήποτε να γνωρίζει τους προγραμματιζόμενους άξονες που είναι διαθέσιμοι. Ο τρόπος ονομασίας των αξόνων των εργαλειομηχανών ποικίλλουν από μηχανή σε μηχανή και εκτός από τους γενικούς κανόνες αναγνώρισής τους που τυποποιούνται κατά ISO-841, ο χρήστης της μηχανής θα πρέπει να εμπιστευθεί το βιβλίο οδηγιών του κατασκευαστή της.

Αποθήκευση αρχής των αξόνων προγράμματος και στοιχείων των εργαλείων

Η αρχή αξόνων του προγράμματος είναι σημαντικό να αποθηκεύεται διότι αποφεύγεται η εκ νέου μέτρηση , «γώνιασμα» κτλ του τεμαχίου. Κάτι τέτοιο όμως έχει νόημα μόνο εάν χρησιμοποιείται ιδιοσυσκευή με την οποία εξασφαλίζεται η ακριβής θέση του τεμαχίου στην ίδια πάντα θέση ως προς την εργαλειομηχανή. Η αποθήκευση των στοιχείων των εργαλείων, όπως π.χ. μήκος και διάμετρος για εργαλεία φρεζαρίσματος, αριθμός φτερών (ενεργών επιφανειών κοπής – flutes) κ.α., είναι πολύ πρακτική διότι κάθε φορά που φορτώνεται ένα νέο εργαλείο στη μηχανή δεν χρειάζεται να εισάγονται από την αρχή τα στοιχεία του.

Προσομοίωση κατεργασίας

Πριν την εκτέλεση της κατεργασίας για πρώτη φορά βάσει του προγράμματος στη μηχανή CNC είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ορθότητας του προγράμματος. Ένας τρόπος να γίνει αυτό είναι στο ίδιο το σύστημα ελέγχου της μηχανής, δια μέσου του λειτουργικού λογισμικού της. Γίνεται προσομοίωση των κινήσεων της μηχανής με το λογισμικό αυτό σε γραφικό περιβάλλον και με τους άξονες της μηχανής ακινητοποιημένους (machine lock-offline) . Η προσομοίωση βασίζεται συνήθως σε επίπεδες προβολές του τεμαχίου και της τροχιάς του εργαλείου , αλλά στα πιο ισχυρά συστήματα βασίζεται και σε τρισδιάστατα μοντέλα στερεών. Αντίστοιχη δυνατότητα για off-line προσομοίωση του προγράμματος κοπής υπάρχει και στα ίδια τα αυτόνομα προγράμματα CAM στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου τρέχουν. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν διαπιστώνεται το ίδιο καλά η ορθότητα εκτέλεσης του προγράμματος στην ίδια την εργαλειομηχανή, που μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους παράγοντες, όπως π.χ. η αξιοπιστία του post-processor της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής.

Εκτέλεση προγράμματος

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος κοπής σε μια εργαλειομηχανή CNC, αυτό εκτελείται αυτόματα, χωρίς παρέμβαση του χειριστή, εκτός από κάποιες δυνατότητες που δίνονται σε πολλές μηχανές για αυξομείωση προώσεων και ταχυτήτων ατράκτου.

3.3.2 Δυνατές ρυθμίσεις επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου (CNC)

Στις περισσότερες επιτραπέζιες φρεζομηχανές CNC ο χρήστης είναι δυνατόν να συναντήσει τις παρακάτω δυνατές ρυθμίσεις παραμέτρων λειτουργίας της.

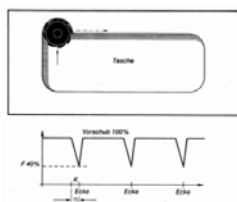
Προγραμματιζόμενα όρια διαδρομής αξόνων

Για λόγους ασφαλείας είναι δυνατόν να προγραμματιστούν τα ανώτατα όρια κίνησης των αξόνων της εργαλειομηχανής . Αυτά βέβαια δε χρησιμοποιούνται πολύ συχνά διότι τα κύρια πιθανά προβλήματα συγκρούσεων παρουσιάζονται κοντά στα τεμάχια, δηλαδή εκεί που εξ' ορισμού είναι αδύνατος ο περιορισμός της διαδρομής των αξόνων.

Προγραμματιζόμενο όριο πρόωσης και ταχύτητας της ατράκτου

Χρήση αυτής της δυνατότητας διασφαλίζει ότι δεν πρόκειται από λάθος ή από κακό υπολογισμό να χρησιμοποιηθούν προώσεις υπερβολικά υψηλές ή (δευτερευόντως) υπερβολικά χαμηλές. Τυπικό και συνηθισμένο τέτοιο λάθος είναι η παράληψη του διαχωριστικού δεκαδικού μέρους (τελείας ή κόμματος) ή η προσθήκη ενός επιπλέον μηδενικού κατά τον ορισμό της πρόωσης ή στροφών.

Προγραμματιζόμενη επιβράδυνση

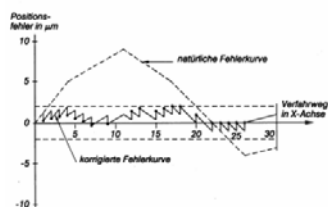


Τυπικό παράδειγμα όπου αυτή η λειτουργία είναι αναγκαία αποτελεί το φρεζάρισμα εσωτερικών γωνιών, βλ. Σχήμα . Σε τέτοιες περιπτώσεις το κοπτικό εργαλείο φορτίζεται περισσότερο λόγω αύξησης του πλάτους κοπής. Είναι λοιπόν αναγκαία η προοδευτική μείωση της πρόωσης έτσι ώστε να διατηρείται η δύναμη κοπής κατά το δυνατό σταθερή.

Επαναφορά στο σημείο διακοπής προγράμματος

Εάν διακοπεί η εκτέλεση του προγράμματος στη μηχανή υπάρχει η δυνατότητα να επαναφερθεί η εκτέλεση στο σημείο προ της διακοπής . Αυτή η επαναφορά αναφέρεται στις συντεταγμένες των αξόνων και στην κατάσταση των επενεργητών, αισθητήρων κλπ.

Προγραμματιζόμενη αντιστάθμιση σφάλματος αξόνων



Σε όλες τις μηχανές CNC όσο ακριβείς και να είναι κατά τις προδιαγραφές τους, θα υπάρχουν σφάλματα θέσης αξόνων , δηλαδή αποκλίσεις μεταξύ πραγματικών και ιδανικών τιμών , κυρίως τοπικού χαρακτήρα. Όταν αυτά είναι συστηματικά, οφειλόμενα σε κατασκευαστικές ατέλειες , σε θερμική αστάθεια κλπ., τότε είναι μετρήσιμα με εξωτερικές διατάξεις ακριβείας π.χ. συμβολόμετρα laser , και υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης τους έτσι ώστε να αντισταθμίζονται από το σύστημα ελέγχου της μηχανής.

3.3.3 Στοιχεία προγραμματισμού επιτραπέζιων φρεζών CNC και δυνατοτήτων των ελεγκτών τους (controllers)

Γενικές αρχές:

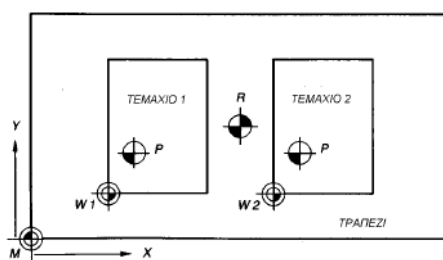
Ο προγραμματισμός επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου έχει σκοπό τη δημιουργία ενός προγράμματος τεμαχίου (part program) το οποίο, είτε εισάγεται στη μονάδα αριθμητικού ελέγχου με σειρά εντολών ISO (κοινά αποδεκτές από όλους τους κατασκευαστές μονάδων ελέγχου), είτε πλήρως αυτοματοποιημένα από λογισμικό CAM με χρήση λογισμικού προσαρμογής στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μηχανής, που είναι γνωστό ως «μετά-επεξεργαστής» (post-processor).

Συστήματα συντεταγμένων της μηχανής:

Πρόκειται για ένα ή περισσότερα συστήματα συντεταγμένων που ορίζονται στη μηχανή και δεν μπορούν να αλλάξουν μέσω προγράμματος. Σε όποιο από αυτά επιλεγεί για χρήση, σε αυτό μεταφέρεται τελικά κάθε συντεταγμένη που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα CNC. Συνήθως η αρχή των συντεταγμένων αυτού του συστήματος βρίσκεται σε σημείο προσπελάσιμο. Εάν το σημείο δεν ήταν φυσικά ή πρακτικά προσπελάσιμο, τότε στη θέση του χρησιμοποιείται άλλο σημείο.

Σύστημα συντεταγμένων προγράμματος:

Πρόκειται για σύστημα συντεταγμένων στο οποίο αναφέρονται άμεσα όλες οι συντεταγμένες του προγράμματος CNC. Επιλέγεται ελεύθερα από τον προγραμματιστή με γνώμονα την διευκόλυνση των υπολογισμών. Επίσης μπορεί να μετασχηματισθεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί το ίδιο πρόγραμμα για διαφορετικό προσανατολισμό του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή.



Σχήμα 3.14 Συστήματα συντεταγμένων κέντρου κατεργασιών
(αρχή: M= μηχανής ,R=αναφοράς, μηχανής , W=τεμαχίου , P=προγράμματος)

Συστήματα συντεταγμένων τεμαχίου:

Αυτό είναι παράλληλο με το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και η αρχή του επιλέγεται ελεύθερα από τον προγραμματιστή. Είναι χρήσιμο όταν υφίστανται κατεργασία πολλά τεμάχια ταυτόχρονα στερεωμένα στο τραπέζι της ίδιας της εργαλειομηχανής.

Παρεμβολή (Interpolation):

Οι τύποι παρεμβολής που υπάρχουν ουσιαστικά καθορίζουν τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να κινηθεί το εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο. Οι συνηθέστεροι τύποι παρεμβολής είναι η γραμμική και η κυκλική. Στη γραμμική παρεμβολή αρκεί να δοθούν τα άκρα ευθύγραμμου τμήματος. Στην κυκλική παρεμβολή αρκεί να δοθεί το κέντρο του τόξου ή η ακτίνα και τα δύο άκρα του τόξου. Γραμμική παρεμβολή εκτελείται στο χώρο, αλλά κυκλική παρεμβολή εκτελείται σε επίπεδο συνηθέστατα παράλληλο σε ένα από τα τρία καρτεσιανά επίπεδα. Λιγότερο συνηθισμένοι τύποι παρεμβολής είναι η ελικοειδής και η παρεμβολή splines. Η ελικοειδής παρεμβολή συνδυάζει συγχρονισμένη κυκλική κίνηση (δύο άξονες) και γραμμική κίνηση κάθετα στο κέντρο του κύκλου (τρίτος άξονας). Τέτοια κίνηση είναι απαραίτητη πολλές φορές για τη διάνοιξη οπής πριν την έναρξη της κατεργασίας «ποκέτας» (pocket) σε κέντρο κατεργασιών. Η παρεμβολή splines συνδέει δύο σημεία με καμπύλη τρίτου βαθμού τύπου B-spline. Επειδή αρκούν τέσσερις συντελεστές για τον ορισμό μιας τέτοιας καμπύλης ο τρόπος αυτός είναι από τους πλέον ενδεδειγμένους (ακριβείς και συγχρόνως σύντομους) για την περιγραφή εργαλείου για γλυπτές επιφάνειες.

Αντιστάθμιση (Compensation):

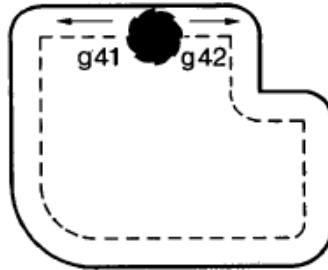
Η έννοια της αντιστάθμισης αναφέρεται στην εξιδανίκευση του εργαλείου ως σημειακού με στόχο την ανεξαρτητοποίηση του προγράμματος από τις εκάστοτε διαστάσεις του εργαλείου. Οι πραγματικές διαστάσεις του εργαλείου είναι αποθηκευμένες εκτός του προγράμματος σε ειδικές θέσεις μνήμης της μονάδας ελέγχου. Με την εφαρμογή της αντιστάθμισης γίνεται κατά μια έννοια «διόρθωση» της τροχιάς του εργαλείου έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές του διαστάσεις. Στις επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC και γενικότερα στα κέντρα κατεργασιών υπάρχουν δυο είδη αντιστάθμισης, η αντιστάθμιση μήκους και διαμέτρου. Επιμέρους η αντιστάθμιση διακρίνεται σε :

Αντιστάθμιση μήκους (Length Compensation):

Σε ένα κέντρο κατεργασιών χρησιμοποιούνται πολλά εργαλεία που έχουν το καθένα διαφορετικό μήκος. Χρήση αντιστάθμισης μήκους σημαίνει ότι όλα τα εργαλεία θεωρούνται κατ' αρχήν ότι έχουν μήκος ίσο με ένα μήκος εργαλείου αναφοράς και στη συνέχεια δίνεται ένας αριθμός που αντιστοιχεί στη διαφορά του μήκους τους από αυτό το μήκος αναφοράς. Η μέτρηση μήκους μπορεί να γίνει στην ίδια την εργαλειομηχανή φέρνοντας σε επαφή το εργαλείο με το τεμάχιο κατά την αξονική διεύθυνση και χρησιμοποιώντας για τη μέτρηση την μονάδα ελέγχου. Επίσης μπορεί να γίνει και off-line σε ειδικές συσκευές ακριβείας.

Αντιστάθμιση διαμέτρου (Diameter Compensation):

Τα κοπτικά εργαλεία κέντρου κατεργασιών που εκτελούν φρεζάρισμα έχουν διαφορετική διάμετρο. Χρήση αντιστάθμισης για αυτά σημαίνει ότι όλα θεωρούνται κατ' αρχήν ότι έχουν μηδενική διάμετρο και έτσι η τροχιά του κέντρου τους συμπίπτει με τη τροχιά του σημείου επαφής με το τεμάχιο, δηλαδή με την καμπύλη που περιγράφει το τεμάχιο. Ο προγραμματισμός, λοιπόν, δεν απαιτεί έτσι τον υπολογισμό συντεταγμένων των μετατοπισμένων γραμμών κατά την ακτίνα του εργαλείου, γιατί αυτή είναι μηδέν.



Σχήμα 3.15 Εντολές αντιστάθμισης διαμέτρου φρεζοκεφαλής (G41 αντιστάθμιση ακτίνας εργαλείου αριστερά, G42 αντιστάθμιση ακτίνας εργαλείου δεξιά)

Κύκλοι:

Πρόκειται για συνδυασμό συχνά χρησιμοποιούμενων εντολών που έχει κάποια φυσική έννοια, π.χ. διάτρηση βαθέων οπών. Στην ουσία κάθε κύκλος αποτελεί ένα υπό-πρόγραμμα απλής μορφής το οποίο είτε είναι προτυποποιημένο είτε μπορεί να προτυποποιηθεί. Συνεπώς κάθε κύκλος έχει μια σειρά παραμέτρων συνδεδεμένων με αυτόν. Στο λογισμικό κάθε μονάδας ελέγχου CNC υπάρχει ένας αριθμός κωδικών G που φυλάσσονται έτσι ώστε ο προγραμματιστής να ορίσει τις δικές του ρουτίνες κύκλους και να τις αντιστοιχήσει σε αυτούς τους κωδικούς. Προτυποποιημένοι είναι οι κύκλοι διάτρησης που αντιστοιχούν σε διάφορους τρόπους κατεργασίας οπών με διαφορετικά εργαλεία και αντίστοιχη ακρίβεια καθώς και με διάφορα βάθη οπών.

Συντεταγμένες:

Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι απόλυτες ή σχετικές. Στην πρώτη περίπτωση αναφέρονται στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων του προγράμματος. Στη δεύτερη περίπτωση αναφέρονται σε σύστημα συντεταγμένων παράλληλο με αυτό του προγράμματος, αλλά μετατοπισμένο ως προς αυτό με αρχή το τελευταίο σημείο όπου μετατοπίστηκαν οι άξονες (τρέχον σημείο).

3.3.4 Βασικοί κώδικες G κατά DIN 66025 / ISO 6983

Προγραμματιστικά όλα τα προγράμματα κατεργασίας σε μηχανές CNC, ανάγονται σε αλληλουχίες και συνδυασμούς τυποποιημένων εντολών, κίνησης και ενεργειών, γνωστότερων ευρέως σαν G-Κώδικας (DIN 66025 / ISO 6983). Η χρήση G-κώδικα προάγει τη συμβατότητα των προγραμμάτων από εργαλειομηχανή σε εργαλειομηχανή. Οι κώδικες που παρουσιάζονται στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό μιας τυπικής φρέζας CNC με σύστημα ελέγχου της εταιρείας FANUC. Η κύρια ενέργεια ενός «μπλοκ» (δηλαδή μιας πλήρους γραμμής ενός G-κώδικα κατεργασίας) ορίζεται από τον κώδικα προετοιμασίας G και η δευτερεύουσα ενέργεια (αν υπάρχει) από τον κώδικα βοηθητικών λειτουργιών M. Οι δύο αυτοί κώδικες ακολουθούνται πάντα από ένα διψήφιο ακέραιο αριθμό, η τιμή του οποίου καθορίζει για τον μεν κώδικα G μια ενέργεια κατεργασίας, για τον δε κώδικα M μια λειτουργία ελέγχου. Ο κώδικας G συνοδεύεται από μια σειρά δεδομένων που είναι απαραίτητα στην περιγραφή μιας ενέργειας, π.χ. θα πρέπει να συνοδεύεται από τις συντεταγμένες του σημείου προορισμού (X,Y,Z) και την ταχύτητα πρόωσης του κοπτικού εργαλείου (F). Όσο αφορά τον κώδικα M ο διψήφιος αριθμός που ακολουθεί είναι αρκετός για τον ορισμό της λειτουργίας ελέγχου. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις κατά τις οποίες ο κώδικας M πρέπει να συνοδεύεται από κάποιο συμπληρωματικό στοιχείο, π.χ. η εντολή M03 S2000 δηλώνει ξεκίνημα περιστροφής της εργαλειοφόρου ατράκτου δεξιόστροφα (M03) με ταχύτητα περιστροφής 2000 RPM (S2000).

Κώδικας	Λειτουργία
M00	Προσωρινή διακοπή προγράμματος
M03	Ξεκίνημα περιστροφής ατράκτου CW
M04	Ξεκίνημα περιστροφής ατράκτου CCW
M05	Σταμάτημα περιστροφής ατράκτου
M06	Αλλαγή εργαλείου
M08	Ψύξη σε λειτουργία
M09	Ψύξη εκτός λειτουργίας
M13	Ξεκίνημα περιστροφής ατράκτου CW, ψύξης
M14	Ξεκίνημα περιστροφής ατράκτου CCW, ψύξης
M30	Τέλος εκτέλεσης προγράμματος
M70	Κατοπτρικό είδωλο στον άξονα X
M71	Κατοπτρικό είδωλο στον άξονα Y
M80	Ακύρωση κατοπτρικού ειδώλου στον άξονα X
M81	Ακύρωση κατοπτρικού ειδώλου στον άξονα Y
M98	Κλήση υπορουτίνας
M99	Επιστροφή από υπορουτίνα

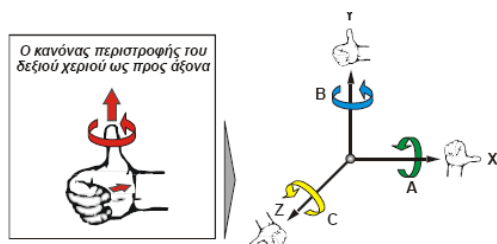
Πίνακας 3.4 Κώδικες M [3.9]

Κώδικας	Λειτουργία
G00	Ευθύγραμμη κίνηση με τη μέγιστη πρόωση (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων)
G01	Ευθύγραμμη κίνηση με προγραμματισμένη πρόωση (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων)
G02	Δεξιόστροφη κυκλική κίνηση, CW (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων)
G03	Αριστερόστροφη κυκλική κίνηση, CCW (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων)
G04	Χρονοκαθυστέρηση
G17	Επιλογή επιπέδου XY
G18	Επιλογή επιπέδου XZ
G19	Επιλογή επιπέδου YZ
G20	Διαστάσεις σε in
G21	Διαστάσεις σε mm
G28	Οδήγηση εργαλειοφόρου ατράκτου στη θέση αλλαγής εργαλείου
G40	Ακύρωση αντιστάθμισης
G41	Αντιστάθμιση ακτίνας εργαλείου αριστερά
G42	Αντιστάθμιση ακτίνας εργαλείου δεξιά
G80	Ακύρωση κύκλου κατεργασίας
G81	Κύκλος κατεργασίας – Σημειακό άνοιγμα τρύπας
G82	Κύκλος κατεργασίας – Σημειακό άνοιγμα τρύπας με προγραμματισμό του χρόνου κατεργασίας
G83	Κύκλος κατεργασίας ανοίγματος βαθειάς τρύπας
G84	Κύκλος κατεργασίας σπειρώματος
G90	Απόλυτες συντεταγμένες
G91	Σχετικές συντεταγμένες
G92	Ορισμός νέου σημείου αναφοράς
G98	Επιστροφή εργαλείου στο αρχικό επίπεδο
G99	Επιστροφή εργαλείου στο επίπεδο R

Πίνακας 3.5 Κώδικες G [3.9]

3.4 Άξονες , συστήματα συντεταγμένων και είδη φρεζαρίσματος

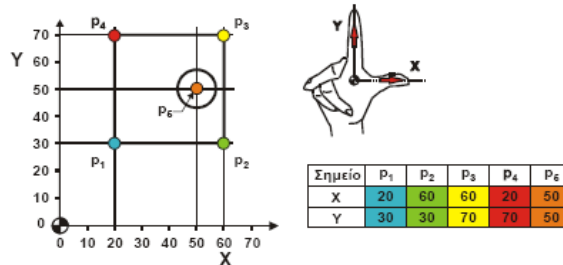
3.4.1 Καρτεσιανές συντεταγμένες στο επίπεδο και στο χώρο



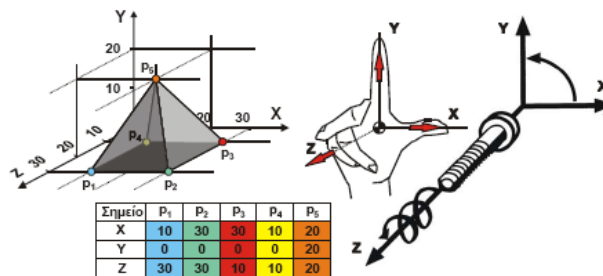
Οι άξονες συντεταγμένων και ο τρόπος καθορισμού της θετικής κατεύθυνσης κίνησης για εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου περιγράφονται στο ISO-841 του 1974 και στα αντίστοιχα εθνικά πρότυπα DIN, BS κλπ.

Οι άξονες περιστροφής συμβολίζονται με A, B και C και είναι επίσης παράλληλοι προς τις κύριες καρτεσιανές διευθύνσεις x,y,z . Η θετική κατεύθυνση περιστροφής για τους άξονες A,B και C προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού κοιτώντας προς τη θετική κατεύθυνση των αξόνων X,Y,Z αντίστοιχα.

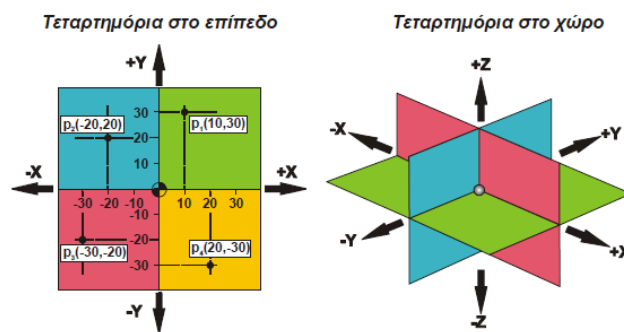
Ο άξονας R (Reference = αναφορά) συχνά χρησιμοποιείται αντί του Z για να δηλώσει το επίπεδο αναφοράς όπου αποσύρεται το εργαλείο της φρέζας, δραπεάνου και άλλων συναφών εργαλειομηχανών μετά την ολοκλήρωση μιας φάσης κοπής πριν την έναρξη της επόμενης και πάνω στο οποίο το εργαλείο είναι δυνατό να κινείται με γρήγορη πρόωση.



Σχήμα 3.16 Σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων στο επίπεδο



Σχήμα 3.17 Σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων στο χώρο



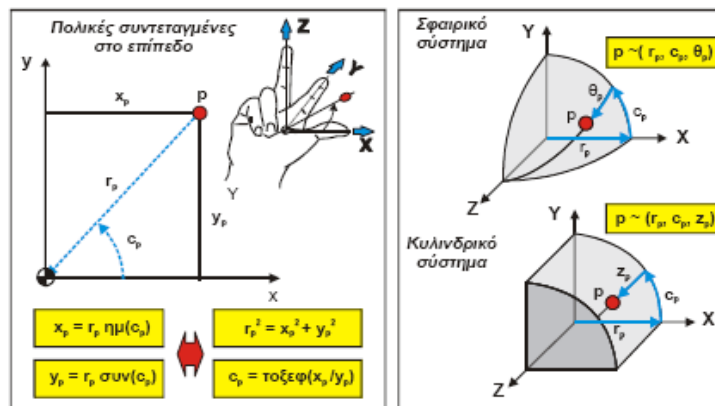
Σχήμα 3.18 Θετικά και αρνητικά τεταρτημόρια στο επίπεδο και στο χώρο

3.4.2 Πολικές συντεταγμένες στο επίπεδο και στο χώρο

Σε αρκετές περιπτώσεις, η θέση ενός σημείου ή η γεωμετρία ενός τεμαχίου είναι δύσκολο να περιγραφούν με χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων. Για παράδειγμα, η περιγραφή των άκρων ενός τόξου κύκλου στο επίπεδο, χρειάζεται τριγωνομετρικές σχέσεις. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται το **πολικό σύστημα συντεταγμένων**. Όπως και στην περίπτωση των καρτεσιανών συντεταγμένων, οι θετικές κατευθύνσεις ορίζονται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Η απόσταση του σημείου από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων και η θετική γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα X και την ευθεία, που ενώνει το σημείο με το κέντρο του συστήματος, προσδιορίζουν τη θέση κάθε σημείου. Οι πολικές συντεταγμένες έχουν μονοσήμαντη τριγωνομετρική σχέση με τις καρτεσιανές.

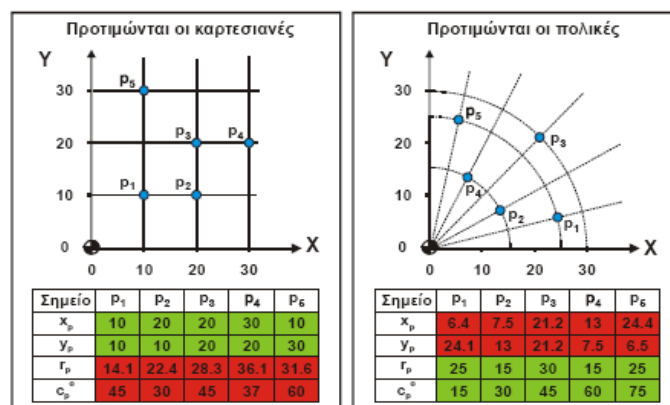
Οι πολικές συντεταγμένες επεκτείνονται στο χώρο με τις **σφαιρικές και τις κυλινδρικές συντεταγμένες**. Τα συστήματα αυτά δίνουν μεγάλη ευελιξία στην περιγραφή τεμαχίων, που προκύπτουν από περιστροφή κάποιας καμπύλης στο χώρο (τεμάχια εκ περιστροφής). Στην περίπτωση όμως της ψηφιακής καθοδήγησης, οι πολικές συντεταγμένες σπάνια προσφέρουν ευκολίες στον προγραμματιστή και γενικά δε χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 3.19 Σύστημα πολικών συντεταγμένων στο επίπεδο και επέκτασή του στο χώρο

Στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευής **πρισματικών τεμαχίων**, η χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων είναι πιο εύχρηστη και αποδοτική. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που οι πολικές συντεταγμένες δίνουν πιο εύκολες λύσεις.

Στο Σχήμα 3.18 συγκρίνονται δυο περιπτώσεις περιγραφής σημείων, που βρίσκονται σε ορθογωνική και κυκλική διάταξη, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα του σχήματος, η χρήση πολικών συντεταγμένων δεν προσφέρει ιδιαίτερη ευκολία και σίγουρα ο προγραμματιστής μιας NC, CNC ή DNC εργαλειομηχανής θα οδηγούσε το κοπτικό εργαλείο στις θέσεις αυτές με καρτεσιανές συντεταγμένες. Αντίθετα, στη δεξιά περίπτωση, που τα σημεία είναι σε ομόκεντρους κύκλους, η περιγραφή με πολικές συντεταγμένες είναι γεωμετρικά και αριθμητικά απλούστερη. Τυπικές τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να βρεθούν στη διάνοιξη οπών σε μία φλάντζα, στις βάσεις στήριξης σωλήνων εναλλακτών θερμότητας κ.λπ.



Σχήμα 3.20 Χρήση καρτεσιανών και πολικών συντεταγμένων, ανάλογα με την περίπτωση

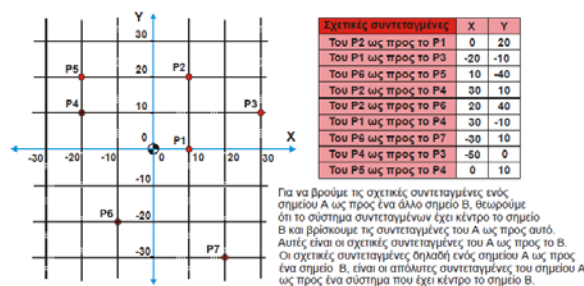
Η πρώτη πολική συντεταγμένη, δηλαδή η απόσταση του σημείου από το κέντρο του συστήματος είναι πολύ εύκολο να βρεθεί. Για τη γωνία όμως και προκειμένου να μη γίνεται κανένα λάθος, υπάρχει μια πολύ απλή τεχνική : Η γωνία είναι εκείνη που διαγράφει ο άξονας X στρεφόμενος προς τον Y στο μικρό τεταρτημόριο X-Y, μέχρι να συναντήσει το σημείο, του οποίου ζητούνται οι πολικές συντεταγμένες. Έτσι για παράδειγμα, στο Σχήμα.5 , το σημείο p5 του δεξιού μέρους του σχήματος, έχει πολικές συντεταγμένες 25 (η απόσταση του σημείου από το κέντρο του συστήματος) και 75° γιατί τόση είναι η γωνία, που πρέπει να περιστραφεί νοερά ο X προς τον Y για να συναντήσει το p5.

3.4.3 Απόλυτες και σχετικές συντεταγμένες

Τα γεωμετρικά δεδομένα ενός τεμαχίου, που πρόκειται να υποστεί κατεργασία, μπορούν να οριστούν με δύο τρόπους, άσχετα αν χρησιμοποιούνται καρτεσιανές ή πολικές συντεταγμένες. Πρόκειται για τον **απόλυτο και το σχετικό** τρόπο προσδιορισμού θέσης σημείων στο επίπεδο ή στο χώρο. Και οι δύο τρόποι είναι μεταξύ τους ισότιμοι, με την έννοια ότι, όποιος από τους δύο κι αν χρησιμοποιηθεί, το αποτέλεσμα της περιγραφής της θέσης θα είναι το ίδιο. Στην περίπτωση προσδιορισμού θέσης με τον **απόλυτο τρόπο**, οι συντεταγμένες κάθε σημείου δίνονται σε σχέση με την αρχή των αξόνων, που έχει ορισθεί.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε σημείο είναι διαφορετική οντότητα και η περιγραφή του δε σχετίζεται με κανένα άλλο σημείο, εκτός από το μηδενικό (την αρχή του συστήματος συντεταγμένων). Έτσι, στην ψηφιακή καθοδήγηση, υπάρχει η δυνατότητα διακοπής και επανάληψης της κοπής σε κάποια γνωστή θέση, χωρίς να είναι αναγκαία η επανεκτέλεση όλου του προγράμματος.

Στο δεύτερο τρόπο, με τη χρήση δηλαδή **των σχετικών συντεταγμένων**, η περιγραφή της θέσης ενός σημείου γίνεται πάντα με αναφορά στο προηγούμενο σημείο (βλ. Σχήμα 3.19). Για να μεταφερθεί δηλαδή στη νέα θέση το κοπτικό εργαλείο, πρέπει η κίνηση να γίνει σε σχέση με τη θέση που αυτό βρισκόταν πριν. Η μέθοδος αυτή έχει ένα βασικό μειονέκτημα. Εάν η κατεργασία διακοπεί, για παράδειγμα, λόγω βλάβης του ηλεκτρικού δικτύου, δεν μπορεί να ξεκινήσει πάλι από την ίδια θέση, αφού αυτή είναι ορισμένη σε σχέση με κάποια προηγούμενη θέση, που δεν είναι πια γνωστή.



Σχήμα 3.21 Σχετικές συντεταγμένες

3.4.4 Πλεονεκτήματα του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων έναντι του σχετικού [3.14]

Το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων έχει δύο πολύ βασικά πλεονεκτήματα έναντι του σχετικού:

- Διακοπές οι οποίες προκλήθηκαν, για παράδειγμα λόγω αστοχίας του κοπτικού εργαλείου (ή την αλλαγή του κοπτικού εργαλείου, είτε τον προληπτικό έλεγχο των κομματιών κατά τη διάρκεια της κατεργασίας), δεν πρόκειται να επηρεάσουν τη θέση του κοπτικού εργαλείου. Εάν π.χ. κάποια στιγμή το κοπτικό εργαλείο πρέπει να αντικατασταθεί, ο χειριστής μετακινεί την τράπεζα της εργαλειομηχανής, εναλλάσσει το κοπτικό εργαλείο, και στη συνέχεια μετακινεί πάλι την τράπεζα στο σημείο στο οποίο παρατηρήθηκε η διακοπή. Στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, το κοπτικό εργαλείο επιστρέφει αυτόματα στη θέση αυτή, ενώ στο σχετικό σύστημα συντεταγμένων είναι σχεδόν αδύνατο το κοπτικό εργαλείο να τοποθετηθεί με ακρίβεια στο σημείο που παρατηρήθηκε η διακοπή, παρά μόνο εάν επαναληφθεί το πρόγραμμα.
- Στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων τα διαστασιολογικά δεδομένα τροποποιούνται αρκετά εύκολα.

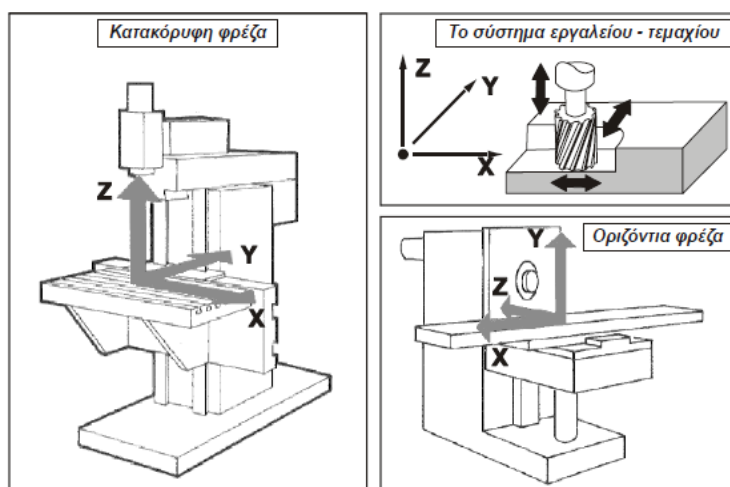
3.4.5 Πλεονεκτήματα του σχετικού συστήματος συντεταγμένων έναντι του απόλυτου [3.14]

Το σχετικό σύστημα συντεταγμένων έχει δύο πλεονεκτήματα έναντι του απόλυτου:

- 1) Η επιθεώρηση του προγράμματος είναι ευκολότερη. Αυτό συμβαίνει επειδή το συνολικό άθροισμα των συντεταγμένων κάθε άξονα είναι μηδενικό. Συνολικό άθροισμα διάφορο του μηδενός συνεπάγεται την ύπαρξη λάθους. Μια τέτοιου τύπου επιθεώρηση στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων είναι αδύνατη.
- 2) Στο σχετικό σύστημα υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού κατοπτρικού ειδώλου (mirror image), κατά τον οποίο τα πρόσημα των συντεταγμένων σε ένα ή δυο άξονες αντιστρέφονται. Ο άξονας ή οι άξονες κατά τους οποίους πραγματοποιείται το κατοπτρικό είδωλο, δηλώνονται στο πρόγραμμα κατεργασίας το οποίο στη συνέχεια αντιστρέφει τα πρόσημα των αντίστοιχων συντεταγμένων.

3.4.6 Συστήματα συντεταγμένων σε φρέζες 3-αξόνων με ψηφιακή καθοδήγηση

Έχει ήδη αναφερθεί ότι, στις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές, η περιγραφή της γεωμετρίας ενός τεμαχίου αλλά και οι κινήσεις μεταφοράς και κοπής του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, απαιτούν τη χρήση συστημάτων συντεταγμένων, ήδη από τη φάση προγραμματισμού της μηχανής. Ανάλογα με το είδος της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται τέτοια συστήματα, που έχουν οριστεί από τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής ή ορίζονται από τον προγραμματιστή. Ένας **βασικός κανόνας** που ισχύει στα συστήματα συντεταγμένων των εργαλειομηχανών, είναι ότι **ο άξονας Z είναι παράλληλος με τον άξονα του κινητήρα, που δίνει την κύρια κίνηση κοπής**. Έτσι, στις φρέζες, ο άξονας αυτός ταυτίζεται με τον άξονα του κινητήρα που δίνει κίνηση στο κοπτικό εργαλείο.



Σχήμα 3.22 Σύστημα συντεταγμένων σε φρέζα ψηφιακής καθοδήγησης

Θεωρώντας ότι το τεμάχιο είναι ακίνητο και κινείται μόνο το εργαλείο (κάτι που δε συμβαίνει στην πράξη, αφού κινείται η τράπεζα της μηχανής), οι διευθύνσεις κίνησης είναι :

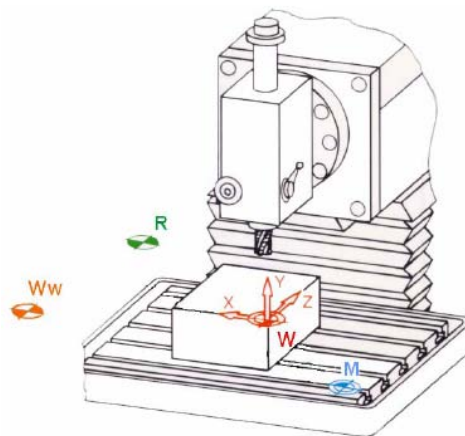
1. **Παράλληλα**, ως προς την άτρακτο περιστροφής της μηχανής και, συνεπώς, στην κατά μήκος(αξονική) διεύθυνση του εργαλείου. Η διεύθυνση της κίνησης αυτής καθορίζει συνήθως και τη διεύθυνση του άξονα **Z** της κατεργασίας, μια και, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο άξονας **Z** συνηθίζεται, για λόγους ευκολίας του προγραμματισμού, να ταυτίζεται από τους κατασκευαστές με τον άξονα περιστροφής της φρέζας. Αυτό όμως δε συμβαίνει πάντα και ο προγραμματιστής πρέπει για κάθε νέα μηχανή να συμβουλευθεί το αντίστοιχο εγχειρίδιο οδηγιών. Η κίνηση κατά **Z** συνήθως θεωρείται θετική κατά τη διεύθυνση του εργαλείου, όταν αυτό απομακρύνεται από το κατεργαζόμενο τεμάχιο.
2. **Κάθετα**, ως προς το κοπτικό εργαλείο και παράλληλα στα χέρια σε έκταση του χειριστή, όταν αυτός κοιτάζει τη μηχανή από την κύρια πλευρά εργασίας της. Η διεύθυνση αυτή ονομάζεται **X** και είναι η ίδια, ανεξάρτητα εάν η εργαλειομηχανή είναι οριζόντια ή κατακόρυφη. Η θετική διεύθυνση του άξονα **X** στην οριζόντια φρέζα συνήθως, ταυτίζεται με το αριστερό χέρι του χειριστή, ενώ στην κατακόρυφη με το αντίστοιχο δεξί.

3. **Κάθετα**, ως προς το κοπτικό εργαλείο και παράλληλα στο βλέμμα του χειριστή, όταν αυτός κοιτάζει τη μηχανή από την κύρια πλευρά εργασίας της. Ο άξονας αυτός ονομάζεται **Y**. Η θετική κατεύθυνση του άξονα **Y** προκύπτει εύκολα με τον κανόνα του αριστερού χεριού, αφού είναι γνωστές οι κατευθύνσεις των αξόνων **X, Z**.

3.4.7 Μηδενικά σημεία στη ψηφιακή καθοδήγηση

Σε κάθε εργαλειομηχανή και κατεργασία ψηφιακής καθοδήγησης, ορίζονται **χαρακτηριστικά μηδενικά 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 (Home position)** 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, που και αυτό 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). Στις φρέζες, η θέση του μηδενικού σημείου βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κίνησης του κάθε άξονα.



Σχήμα 3.23 Θέση χαρακτηριστικών σημείων σε φρέζες και κέντρα κατεργασιών

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 απαραίτητα 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.

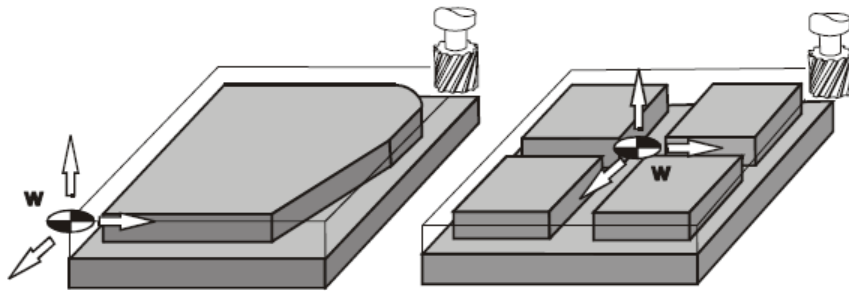
Άλλο τυπικό σημείο, το οποίο συναντάται στην περίπτωση εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση και φαίνεται στα δύο προαναφερόμενα σχήματα, είναι το **σημείο αλλαγής του κοπτικού εργαλείου**, που συμβολίζεται με **Ww**. Στην περίπτωση ύπαρξης μύλου αυτόματης αλλαγής του εργαλείου, η θέση αυτή είναι προκαθορισμένη 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, μια και ο σωστός καθορισμός του έχει πολλές φορές άμεση επίδραση στην τελικά αποδιδόμενη διαστασιολογική ακρίβεια και ακρίβεια απόδοσης 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.

Ο σκοπός, σε αυτήν την περίπτωση, είναι οι έτοιμες διαστάσεις του τεμαχίου από το μηχανολογικό σχέδιο να αποτελούν συντεταγμένες των κινήσεων του κοπτικού εργαλείου, ώστε ο προγραμματισμός των κινήσεων να γίνεται εύκολα. Για το λόγο αυτό, στα φρεζαριστά τεμάχια, ως σημείο μηδέν ορίζεται κάποια κατάλληλη κορυφή του τεμαχίου ή άλλο σημείο ως προς το οποίο υπάρχουν συμμετρίες.

Πάντως, προτιμάται η γωνία του τεμαχίου, που βρίσκεται πιο κοντά στο χειριστή, από τη μεριά που χειρίζεται την εργαλειομηχανή, μια και από εκεί έχει καλύτερη οπτική γωνία, για να πραγματοποιήσει τον καθορισμό του μηδενικού σημείου.



Σχήμα 3.24 Κατάλληλες θέσεις μηδενικού σημείου κατεργαζόμενου τεμαχίου στο φρεζάρισμα

3.4.8 Είδη φρεζαρίσματος

Φρεζάρισμα 2 αξόνων (2D Axis Milling)

Φρεζάρισμα 2 αξόνων έχουμε όταν η κατεργασία διεξάγεται σε ένα μόνο επίπεδο. Σε αυτήν την περίπτωση, το κοπτικό εργαλείο δεν έχει δυνατότητα να μετακινηθεί στο επίπεδο Z (κάθετο επίπεδο). Γενικά οι άξονες X και Y παρεμβάλλονται ταυτόχρονα μεταξύ τους για να δημιουργήσουν υπό κλίση γραμμές και κυκλικά τόξα.

Φρεζάρισμα 2.5 αξόνων (2.5D Axis Milling)

Φρεζάρισμα 2.5 αξόνων έχουμε όταν η κατεργασία διεξάγεται αποκλειστικά σε επίπεδα παράλληλα στο επίπεδο αναφοράς, αλλά όχι απαραίτητα στο ίδιο ύψος ή βάθος.

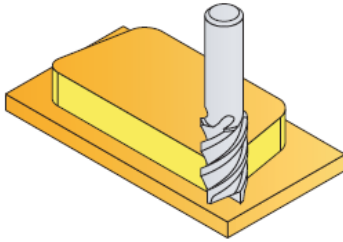
Σε αυτήν την περίπτωση το κοπτικό εργαλείο μπορεί να κινηθεί στο επίπεδο Z (κάθετο επίπεδο) ώστε να αλλάζει επίπεδα κοπής, χωρίς όμως να μπορεί να κινείται ταυτόχρονα στα επίπεδα X, Y. Μια εξαίρεση ίσως να είναι όταν το κοπτικό εργαλείο παρεμβάλλεται ελικοειδώς, σχηματίζοντας έναν κύκλο στα επίπεδα X, Y ενώ ταυτόχρονα κινείται στο επίπεδο Z για να σχηματίσει μια ελίκωση (π.χ. για φρεζάρισμα σπειρωμάτων). Συνοπτικά, στο φρεζάρισμα 2.5 αξόνων η μηχανή μπορεί να παρεμβάλει ταυτόχρονα 2 άξονες, αλλά όχι 3. Αυτό περιορίζει τον αριθμό των 3Δ αντικειμένων που μπορούν να παραχθούν, για παράδειγμα για κατεργασία στα επίπεδα XZ ή YZ υστερεί κατά πολύ του 3Δ φρεζαρίσματος.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.23 το φρεζάρισμα 2.5 αξόνων περαιτέρω υποδιαιρείται σε:



Σχήμα 3.25 Υποδιαιρέσεις 2.5D φρεζαρίσματος

Φρεζάρισμα περιγράμματος (profile operation)

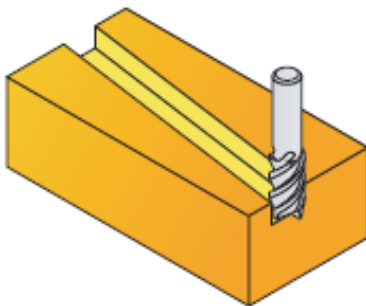


Στην περίπτωση φρεζαρίσματος πάνω ή κατά μήκος ενός εξωτερικού περιγράμματος η γεωμετρία του περιγράμματος μπορεί να είναι είτε ανοικτή είτε κλειστή. Στο φρεζάρισμα περιγράμματος μπορεί προαιρετικά να χρησιμοποιηθεί αντιστάθμιση της ακτίνας του εργαλείου τόσο στην αριστερή όσο και στην δεξιά πλευρά της γεωμετρίας που κατεργάζεται .

Σε πολλά λογισμικά CAM, όπως το SolidCAM © που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία παρέχονται δύο τύποι για φρεζάρισμα περιγράμματος :

- Φρεζάρισμα μονού περιγράμματος στο καθορισμένο ή σε μεταβλητό βάθος (κατά Z) με ένα ή πολλαπλά βήματα , τα οποία ορίζονται από το χρήστη του λογισμικού.
- Φρεζάρισμα ομόκεντρων περιγραμμάτων (σε επίπεδο XY) σε καθορισμένο ή μεταβλητό βάθος. Το φρεζάρισμα αυτού του τύπου παράγει πληθώρα από ομόκεντρα περιγράμματα, τα οποία ξεκινούν από μια καθορισμένη αρχική επιφάνεια και τελειώνουν στην γεωμετρία του επιθυμητού περιγράμματος. Κατά συνέπεια η περιοχή γύρω από το περίγραμμα κατεργάζεται μέχρι ένα σταθερό βάθος.

Φρεζάρισμα εγκοπών (slot operation)

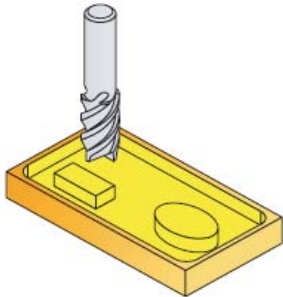


Σε αυτήν την περίπτωση παράγεται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής , αριστερά ή δεξιά , ένα «μονοπάτι» λόγω του κοπτικού εργαλείου (tool path) με ένα ή περισσότερα περιγράμματα. Στο φρεζάρισμα εγκοπών με σταθερό βάθος , η εγκοπή κατεργάζεται κάθε φορά σε διαφορετικά βάθη μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό βάθος. Σε εγκοπές με μεταβλητό βάθος, το βάθος του περιγράμματος ορίζεται από μια 2Δ τομή.

Η εγκοπή μπορεί να προ-κατεργαστεί με ξεχόνδρισμα (roughing) και κύκλους ημιφινιρίσματος (semi-finishing). Η τελική κοπή παράγει ένα «μονοπάτι», συσχετιζόμενο με τις αυξομειώσεις του ύψους στον πυθμένα της εγκοπής . Με κατάλληλες παραμέτρους για δεξιές και αριστερές προεκτάσεις και πλευρικά βήματα (side steps) , μπορούν να κατεργαστούν εγκοπές μεγαλύτερου μήκους από αυτό της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου.

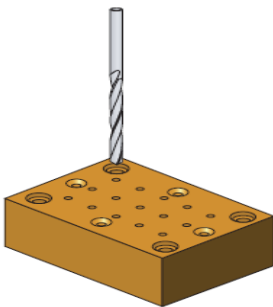
Φρεζάρισμα θυλακίων (rocket operation)

Στο φρεζάρισμα θυλακίων πρέπει να αφαιρεθεί υλικό από το εσωτερικό μιας κλειστής γεωμετρίας. Το SolidCAM © προσφέρει δυο τύπους φρεζαρίσματος θυλακίων :



- Όταν μια γεωμετρία περιγράμματος αποτελείται από ένα ή περισσότερα περιγράμματα και αυτά δεν εσωκλείονται ή διατέμνονται μεταξύ τους , το κάθε ένα κατεργάζεται σαν ξεχωριστό θυλάκιο χωρίς την ύπαρξη «νησιών».
- Όταν μια γεωμετρία αποτελείται από διαφορετικά περιγράμματα ,κάθε περίγραμμα το οποίο εσωκλείεται ή διατέμνεται από κάποιο άλλο περίγραμμα , συμπεριφέρεται σαν «νησί» . Μπορεί να οριστεί αμέτρητος αριθμός νησιών εντός ενός θυλακίου.

Κύκλοι διάτρησης (2.5D drill operation)

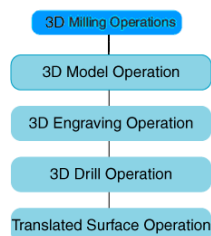


Σε αυτήν την κατεργασία μπορούν να δημιουργηθούν οπές και άλλοι τυποποιημένοι κύκλοι διάτρησης. Το SolidCAM © υποστηρίζει τυποποιημένους κύκλους διάτρησης , όπως σπειροτόμηση (threadening) , γλύφανση (reaming) , εσωτερική τόννευση (boring) , ράμφισμα (peck) κ.τ.λ. Εάν η μηχανή που χρησιμοποιούμε δεν υποστηρίζει κύκλους διάτρησης , τότε αυτοί μπορούν να οριστούν από το γενικό πρόγραμμα του προ- και μετά-επεξεργαστή της (GPPTool).

Φρεζάρισμα 3 αξόνων (3D Axis Milling)

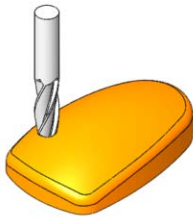
Φρεζάρισμα 3 αξόνων χρησιμοποιούμε όταν η κατεργασία απαιτεί ταυτόχρονη κίνηση στους X, Y και Z άξονες , το οποίο είναι απαραίτητο στις περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες.

Υποδιαιρέσεις 3D φρεζαρίσματος αποτελούν:



Σχήμα 3.26 Υποδιαιρέσεις 3D φρεζαρίσματος

Φρεζάρισμα 3Δ Μοντέλου (3D Model Operation)



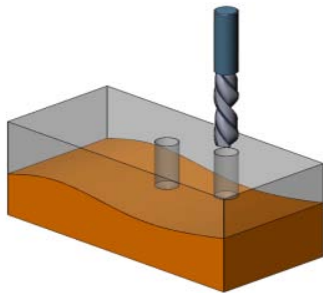
Σε αυτήν την κατεργασία διεξάγεται 3Δ κατεργασία σε μοντέλα στερεών και επιφάνειες. Αυτή η κατεργασία παρέχει πληθώρα επιλογών για ξεχόνδρισμα , ημιφινίρισμα και φινίρισμα μοντέλων ελεύθερων μορφών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή καλουπιών χύτευσης υπό πίεση , ηλεκτροδίων , πρωτοτύπων και άλλων 3Δ μοντέλων .

3Δ Χάραξη (3D Engraving Operation)



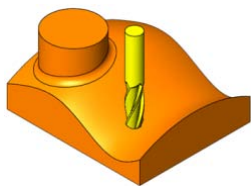
Σε αυτήν την κατεργασία μπορεί να χαραχθεί κειμενο ή οποιοδήποτε άλλο περίγραμμα σε μια 3Δ γεωμετρία. Το περίγραμμα θα προβληθεί στην προς κατεργασία επιφάνεια, χαράζοντας το περίγραμμα σε ένα συγκεκριμένο βάθος.

3Δ Κύκλοι διάτρησης (3D Drill Operation)



Αυτή η κατεργασία επιτρέπει να διεξαχθούν διάφοροι τυποποιημένοι και μη κύκλοι διάτρησης. Εν συγκρίσει με τη διάτρηση στο 2.5Δ φρεζάρισμα , η 3Δ διάτρηση σου επιτρέπει να ληφθεί υπόψη και τη γεωμετρία του στερεού μοντέλου. Το SolidCAM © επιτρέπει να δημιουργηθούν οπές , κατεργασμένες ώστε να επιτρέπουν εισχώρηση κατά τον Z άξονα , ακόμα και κατά τη διάρκεια του 3Δ ξεχονδρίσματος. Όπως και στο 2.5Δ φρεζάρισμα η 3Δ διάτρηση υποστηρίζει τυποποιημένους κύκλους, όπως σπειροτόμηση (threadening) , γλύφανση (reaming) , εσωτερική τόννευση (boring) , ράμφισμα (peck) κ.τ.λ.

Γλυπτές Επιφάνειες (Translated Surface Operation)



Μια γλυπτή επιφάνεια είναι εκείνη που παράγεται όταν μια 2Δ τομή προεκταθεί/προβληθεί πάνω στην επιφάνεια μιας γεωμετρίας. Στην επιφάνεια αυτή μπορούν να προβληθούν γεωμετρικά όρια. Στη συνέχεια μπορεί να γίνει κατεργασία στο εσωτερικό, το εξωτερικό ή και κατά μήκος των γεωμετρικών ορίων

Φρεζάρισμα 4 και 5 αξόνων (4D & 5D Axis Milling)

Η διαφορά του φρεζαρίσματος των 4 αξόνων σε σχέση με αυτό των 3 αξόνων είναι ότι το 4Δ φρεζάρισμα περιλαμβάνει έναν επιπλέον περιστροφικό άξονα. Σε αυτού του τύπου το φρεζάρισμα υπάρχουν δυο επιλογές. Στη πρώτη επιλογή συμβαίνει ταυτόχρονη παρεμβολή και των τεσσάρων αξόνων (γνωστή ως πραγματικό 4Δ φρεζάρισμα) .

Ενώ στη δεύτερη επιλογή ο 4^{ος} άξονας χρησιμοποιείται μόνο για τη μετατόπιση του προς κατεργασία τεμαχίου μεταξύ των 3 άλλων αξόνων , χωρίς ωστόσο αυτός να κινείται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Στο φρεζάρισμα 5 αξόνων η κατάσταση είναι πολύ πιο σύνθετη, οι δυνατότητες περισσότερες, ειδικά όσον αφορά τις γεωμετρίες που μπορούν να παραχθούν, αλλά και ο συναφής εξοπλισμός πολύ συνθετότερος και ακριβότερος. Εκτός από το «πραγματικό» 5-αξονικό φρεζάρισμα κατά το οποίο έχουμε ταυτόχρονη κίνηση 5 αξόνων σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας , υπάρχει επίσης το «3+2» και το «4+1» 5-αξονικό φρεζάρισμα , όπου στην πρώτη περίπτωση έχουμε 3 άξονες εργασίας και δύο τοποθέτησης και στη δεύτερη περίπτωση 4 άξονες εργασίας και έναν τοποθέτησης.

Καταληκτικά θα μπορούσε να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των επιτραπέζιων CNC φρεζομηχανών είναι ικανές για μέχρι 3D φρεζάρισμα, ή υπό προϋποθέσεις (χρήση διαιρέτη για ψευδο-4D φρεζάρισμα, δηλαδή περιστροφή του αντικειμένου με ταυτόχρονη κατεργασία του σε δύο μόνο ευθύγραμμους άξονες.

3.5 Διασύνδεση των επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου (Desktop CNC) με λογισμικά CAM. Προ- και Μετά-επεξεργαστές (pre- & post-processors)

Τα λογισμικά CAM θα πρέπει να είναι ικανά να εξάγουν κώδικα G σε μορφή που θα είναι αναγνωρίσιμη από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (MCU) μιας εργαλειομηχανής ψηφιακού ελέγχου (CNC). Το πιο σημαντικό στη δημιουργία μιας διαδρομής τροχιάς (tool path generation) και ενός προγράμματος κοπής εν γένει είναι η ακεραιότητα των δεδομένων. Ο υπολογιστικά παραγόμενος κώδικας G θα πρέπει να είναι ακριβής και κατάλληλος για κάθε εργαλειομηχανή CNC ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας G που παράγεται από ένα σύστημα CAM δε θα πρέπει να χρειάζεται περαιτέρω τροποποιήσεις, βελτιστοποίηση ή επεξεργασία μέσω παραπλήσιων λογισμικών.

Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται μέσω ενός πολύ καλά δομημένου προγραμματιστικού ύφους σε επίπεδο χρήσης CAM και ενός ορθά ρυθμισμένου ζεύγους **προ- και μετά-επεξεργαστή** για κάθε μηχανή CNC ξεχωριστά.

Οι προ-επεξεργαστές (pre-processor) είναι αρχεία στα οποία έχουν δηλωθεί βασικά στοιχεία της κατεργασίας που επιτελεί η μηχανή, αρχικές τιμές βασικών παραμέτρων της, στοιχεία και όρια για το παραγόμενο πρόγραμμα κοπής, υποστηριζόμενοι κώδικες G και αντιστοίχισή τους με κινήσεις και τροχιές, οι οποίες αναγνωρίζονται από τους controllers των εκάστοτε εργαλειομηχανών.

Οι μετά-επεξεργαστές (post-processors) πρακτικά αποτελούν εσωτερικά αρχεία των προγραμμάτων CAM και έχουν να κάνουν με την υλοποίηση των κινήσεων που αντιστοιχούν στο προγραμματισμένο πρόγραμμα κοπής, σε μορφή κώδικα G για υλοποίηση από την εκάστοτε μηχανή.

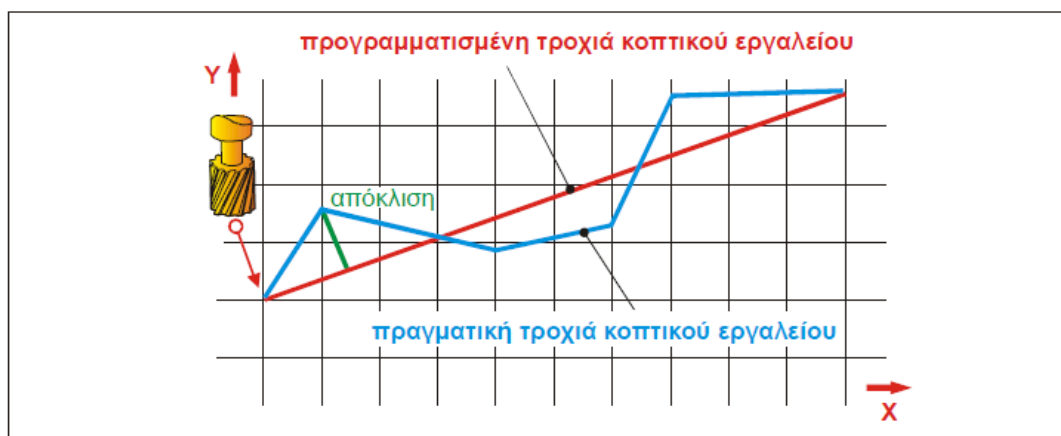
Ένα κατάλληλα ρυθμισμένο ζεύγος προ- & μετά-επεξεργαστή είναι καίριας σημασίας σε ένα λογισμικό CAM, όσον αφορά την επιτυχή του αξιοποίηση από μια εργαλειομηχανή CNC. Κι αυτό γιατί επακριβώς θα καθορίσει τον τρόπο που ο κώδικας κοπής που εξάγεται από το CAM, θα αναγνωρίζεται ή όχι, σε επίπεδο πια κώδικα G, από την στοχευόμενη εργαλειομηχανή. Οι κεντρικές μονάδες επεξεργασίες των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Μερικοί κώδικες G είναι μπορούν να είναι μοναδικοί για ένα και μόνο σύστημα αριθμητικού ελέγχου συγκεκριμένης μηχανής, ενώ άλλοι είναι πιο γενικοί και κοινοί σε περισσότερες CNC μηχανές. Για το λόγο αυτό οι εταιρίες ανάπτυξης λογισμικού CAM είτε προσφέρουν έτοιμα τέτοια ζεύγη για διαδομένους ελεγκτές εργαλειομηχανών (π.χ. Haas, Fanuc) είτε παρέχουν εργαλεία τροποποίησής τους όπως είναι το GPPTool της εταιρίας Solidcam.

Η διαδικασία τροποποίησης δεν είναι απλή διαδικασία. Εξαρτάται από τον τύπο του προ-/μετά-επεξεργαστή και τη μορφή που αυτός λαμβάνει (format). Γενικά απαιτείται γνώση και εμπειρία. Μικρές αλλαγές στον προ- / μετά-επεξεργαστή μπορούν να ληφθούν σε μερικά μόνο λεπτά, ενώ οι μεγάλες μπορούν να διαρκέσουν ακόμη και μέρες. Η επιτυχημένη τροποποίηση τους για χρήση με συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, μπορεί να απαιτεί ακόμα και μια σειρά δοκιμών μεταφοράς συγκεκριμένων εντολών ή και προγραμμάτων CAM για υλοποίηση προς την εργαλειομηχανή. Ο προγραμματιστής μηχανών CNC χρειάζεται ακόμα να γνωρίζει τα συστήματα ελέγχου των μηχανών που χειρίζεται σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό. Μια βαθιά και μεγάλης κλίμακας γνώση πάνω σε μη-αυτοματοποιημένες μεθόδους προγραμματισμού είναι πολύ βασική και συνήθως επιβάλλεται. Επιπλέον η γνώση της μηχανουργικής τεχνολογίας είναι πολύ βασική και αναγκαία. Επίσης η γνώση μιας γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου μπορεί να βοηθήσει το συντάκτη του μετά-επεξεργαστή να αναπτύξει έναν αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο μετά-επεξεργαστή

3.6 Μέθοδοι παρεμβολής και ακρίβεια φρεζών αριθμητικού ελέγχου (CNC)

Οι ανεξάρτητες αλλά ταυτόχρονες μετακινήσεις της τράπεζας ή του κοπτικού εργαλείου στις εργαλειομηχανές NC, CNC και DNC, καθορίζουν τη σχετική θέση του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο. Όλη αυτή η διαδικασία, η οποία παράγει την κοπή, περιγράφεται από τον προγραμματιστή της εργαλειομηχανής μέσω μίας συμβολικής ακολουθίας γραμμών και αριθμών, που είναι το πρόγραμμα ψηφιακής καθοδήγησης. Το πρόγραμμα αυτό έχει ως βασικό σκοπό την περιγραφή των κινήσεων που πρέπει να γίνουν, ώστε να παραχθεί η γεωμετρία του τεμαχίου. Ο προγραμματισμός της εργαλειομηχανής είναι μία εύκολη σχετικά διαδικασία για ένα έμπειρο χειριστή. Όμως η μετατροπή των εντολών του προγράμματος καθοδήγησης σε κινήσεις του εργαλείου ή του τεμαχίου δεν είναι απλή διαδικασία. Αντίθετα, απαιτεί την εκτέλεση ενός μεγάλου όγκου αριθμητικών υπολογισμών, που ευτυχώς γίνονται από **την κεντρική μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής**. Μάλιστα, όσο πιο πολύπλοκη είναι η γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου, τόσο πιο μεγάλος είναι ο φόρτος εργασίας της κεντρικής μονάδας ελέγχου.

Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ή τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου στην επιθυμητή θέση, οι κατάλληλοι άξονες κατεργασίας κινούνται ταυτόχρονα, μέχρι καθένας από αυτούς να φτάσει στον προορισμό του. Όλοι οι άξονες ξεκινούν ταυτόχρονα την κίνησή τους αμέσως μόλις ενεργοποιηθούν από την εκτέλεση ενός προγράμματος καθοδήγησης. Ανά πάσα στιγμή κάθε άξονας κινείται αυτόνομα και το αποτέλεσμα είναι η πραγματική τροχιά του κοπτικού εργαλείου να αποκλίνει από λίγο έως πολύ από την επιθυμητή τροχιά



Σχήμα 3.27 Αδυναμία επίτευξης της επιθυμητής τροχιάς χωρίς συντονισμό της κίνησης των αξόνων κατεργασίας.

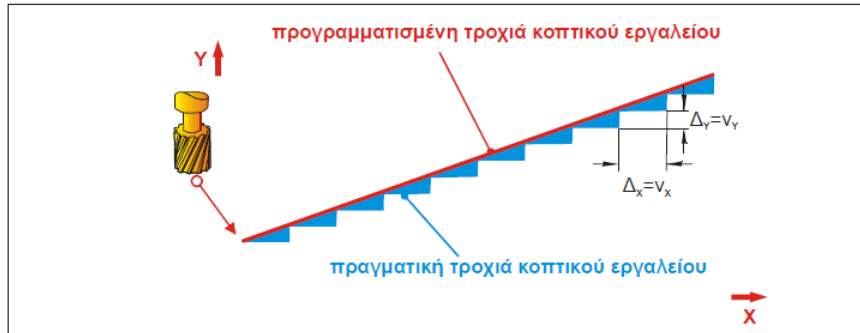
Για τους παραπάνω λόγους, απαιτείται ο συντονισμός της κίνησης όλων των αξόνων κατεργασίας, ώστε η προγραμματισμένη τροχιά να εκτελείται χωρίς αποκλίσεις. Ο συντονισμός αυτός επιτυγχάνεται από μία ηλεκτρονική συσκευή (ολοκληρωμένο κύκλωμα), που ενσωματώνεται στη μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής (MCU) και ονομάζεται **παρεμβολέας** (interpolator). Με χρήση του παρεμβολέα από την αρχή μέχρι το τέλος της μετατόπισης, επιδιώκεται η ελάχιστη δυνατή απόκλιση μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής τροχιάς.

Υπάρχουν πολλά είδη παρεμβολέων, που ενσωματώνονται πάνω στις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές. Οι διαφορές τους προέρχονται κυρίως από το είδος των κινήσεων, που μπορούν να συντονίσουν και με την ακρίβεια τους. Οι κατηγορίες όμως των παρεμβολέων βασίζονται στη μαθηματική προσέγγιση, που ακολουθούν, προκειμένου να επιτύχουν τις μετατοπίσεις. Οι διάφοροι παρεμβολείς μπορεί να υποστηρίζουν μια ή περισσότερες από τις ακόλουθες παρεμβολές:

Γραμμική παρεμβολή

Με τη γραμμική παρεμβολή ο άξονας της ατράκτου κινείται με στοιχειώδεις ορθογώνιες κινήσεις από την αρχή έως το τέλος της διαδρομής. Στην πραγματικότητα, η προγραμματιζόμενη ευθύγραμμη τροχιά διαιρείται σε ένα μεγάλο αριθμό ευθειών μικρού μήκους. Όσο περισσότερες είναι οι ευθείες αυτές, τόσο πιο πολύ προσεγγίζει η πραγματική τροχιά του εργαλείου την αντίστοιχη επιθυμητή. Θεωρητικά, όλοι οι άξονες κατεργασίας είναι δυνατό να καθοδηγηθούν με γραμμική παρεμβολή.

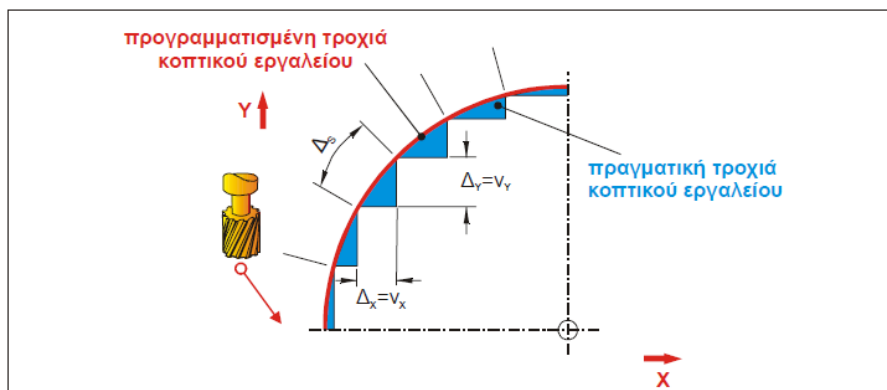
Έτσι, με τη χρήση γραμμικού παρεμβολέα, η μετακίνηση από μία θέση σε μία άλλη στο χώρο μπορεί να γίνει με ευκολία και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η κατεργασία οποιασδήποτε επιφάνειας στο χώρο ή προφίλ στο επίπεδο. Όταν όμως απαιτείται πολύ καλή προσέγγιση για την παραγωγή μιας συγκεκριμένης τροχιάς, ο αριθμός των ενδιάμεσων σημείων που πρέπει να καθορισθούν, οδηγεί σε ένα πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων υπολογισμού στον παρεμβολέα.



Σχήμα 3.28 Γραμμική παρεμβολή

Κυκλική παρεμβολή

Αυτός ο τύπος της παρεμβολής περιορίζεται στο κύριο επίπεδο της επιφάνειας εργασίας. Σε αυτήν την περίπτωση παρεμβολής είναι αδύνατη η συμμετοχή περιστροφικού άξονα κατεργασίας της εργαλειομηχανής. Επίσης, για παρεμβολή στο χώρο, που απαιτείται η συνδυασμένη κίνηση τριών ή περισσότερων αξόνων κατεργασίας, αυτός ο τρόπος παρεμβολής δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Όταν όμως σε κάποια τροχιά του κοπτικού εργαλείου, που ανήκει εντελώς σε κάποιο από τα επίπεδα XY, XZ ή YZ, περιέχονται κύκλοι, ημικύκλια ή τόξα, η παρεμβολή είναι κατά πολύ ευκολότερη. Μάλιστα, για την περιγραφή της κίνησης απαιτούνται μόνον οι συντεταγμένες των άκρων του τόξου, η ακτίνα του και το κέντρο. Όλα τα ενδιάμεσα σημεία μετακίνησης του κοπτικού εργαλείου περιγράφονται από τις εξισώσεις της κυκλικής παρεμβολής, που βασίζεται σε γεωμετρικές σχέσεις.



Σχήμα 3.29 Κυκλική παρεμβολή

Παρεμβολές ανώτερου βαθμού

Εκτός από τις απλές γραμμικές και κυκλικές παρεμβολές, υπάρχουν και άλλοι τύποι ακόμα πιο σύνθετων παρεμβολών. Οι μέθοδοι αυτοί εξελίχθηκαν, για να μπορέσουν να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες των σύγχρονων εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση. Έτσι, οι πολυαξονικές κατεργασίες μπορούν πλέον να καθοδηγηθούν με πιο προηγμένες υπολογιστικές διαδικασίες, που βασίζονται σε πιο σύνθετες εξισώσεις από αυτές του κύκλου και της ευθείας. Οι παρεμβολές αυτές είναι η παραβολική, η ελικοειδής, η κυλινδρική, η τύπου spline και η τύπου nurbs. Τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας ενσωματώνουν κάποιες από αυτές ή και όλες.

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους της ραγδαίας εξάπλωσης των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης είναι η, κατά πολύ, μεγαλύτερη ακρίβεια κατεργασίας που τελικά προσφέρουν, σε σχέση με τις συμβατικές εργαλειομηχανές και η υψηλή τους επαναληψιμότητα. Η ακρίβεια αυτή, μάλιστα, είναι ανεξάρτητη από την εμπειρία και την προσοχή του χειριστή της εργαλειομηχανής και, το σημαντικότερο, δε μεταβάλλεται από τεμάχιο σε τεμάχιο. Η ακρίβεια λοιπόν των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης αναπαράγεται χωρίς περιορισμό, είτε πρόκειται για μερικές δεκάδες, είτε για αρκετές χιλιάδες όμοιων προϊόντων. Η ποιότητα παραγωγής των σύγχρονων εργαλειομηχανών βασίζεται, στο συνεχή έλεγχο και την προσαρμογή των κινήσεων των αξόνων κατεργασίας με τη βοήθεια των μετρητών θέσης.

Ενδεικτικά μεγέθη ακρίβειας των σύγχρονων μεγάλης κλίμακας εργαλειομηχανών NC, CNC και DNC που χρησιμοποιούν servo motors, ανά άξονα κατεργασίας είναι συνήθως από **0.008 έως 0.015 mm [3.1]** ανά πλήρη διαδρομή του άξονα. Αυτό σημαίνει ότι, εάν ένας άξονας κατεργασίας καθοδηγηθεί με μετατόπιση από το ένα έως το άλλο όριο μετατόπισης του, η διαφορά της προγραμματισμένης από την πραγματική θέση δεν πρέπει να βρίσκεται έξω από το παραπάνω διάστημα. Όσον αφορά δε την επαναληψιμότητα τους, όταν ένας άξονας κατεργασίας προγραμματιστεί να εκτελέσει κάποια κίνηση για δεύτερη φορά, η διαφορά των κινήσεων δεν θα πρέπει να βρίσκεται συνήθως εκτός του διαστήματος από **0.001 mm έως 0.002 mm (1-2 μm)**.

Οι επιτραπέζιας κλίμακας εργαλειομηχανές, ως συστήματα ανοικτού βρόγχου ως επί το πλείστον, είναι εύλογο ότι αν και επιτυγχάνουν αξιοσημείωτη ακρίβεια σε σχέση με το κόστος τους, δεν θα φθάνουν όμως στο επίπεδο των μεγάλων συστημάτων και κέντρων κατεργασιών κλειστού βρόγχου.

3.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [3.1] Νεκτάριος Βιδάκης, Αριστομένης Αντωνιάδης : Σημειώσεις Μαθήματος «Εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση» ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – Τμήμα Μηχανολογίας . Σεπτέμβριος 2004
- [3.2] Γ. Βοσνιακός: Σημειώσεις Μαθήματος «Εργαλειομηχανές» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα 2008
- [3.3] Warren S.Seames: Computer Numerical Control – Concepts & Programming 4th Edition. Delmar Cengage Learning August 1, 2001 [σελ. 2-4]
- [3.4] William W.Luggen: CNC A first Look Primer 1st edition. Delmar Cengage Learning October 9, 1996 [σελ. 20-30]
- [3.5] Suk-Hwan Suh, Seong-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, and Ian Stroud: Theory and Design of CNC Systems 1st edition. Springer Verlag October 24, 2008 [σελ. 6-8]
- [3.6] Techno Inc. CNC Router Systems: Technical Section manual <http://www.techno-isel.com> .
- [3.7] Bhandari, V B (2007), [Design of Machine Elements](#), Tata McGraw-Hill, [σελ. 202-237]
- [3.8] Shigley, Joseph E.; Mischke, Charles R.; Budynas, Richard Gordon (2003), [Mechanical Engineering Design](#) (7th ed.), McGraw Hill, [400-405]
- [3.9] Σωτήρης Α. Ομήρου: Προγραμματισμός Εργαλειομηχανών C.N.C. – Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2000
- [3.10] Σκιττίδης , Φιλήμων Χ. : Βασικές Αρχές Αριθμητικού ελέγχου και προγραμματισμού εργαλειομηχανών CNC , τόμοι Α,Β,Γ. Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική. Έκδοση 2000
- [3.11] Κατάλογοι της εταιρείας SecoTools για φρεζάρισμα (www.secotools.com)
- [3.12] Peter Smid: CNC Programming Handbook, 2nd Edition. Industrial Press, Inc. (December 20, 2002)
- [3.13] Takayama Trading Co.LTD: Technical manual – collets (<http://www.takayama-shoji.co.jp/>)
- [3.14] Σημειώσεις του Dr.T.Kesavadas στο μάθημα “Manufacturing Automation”, University at Buffalo (<http://wings.buffalo.edu/academic>)
- [3.15] Ε. Παπαδόπουλου: «Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας», Έκδοση Ε.Μ.Π. 2000-2001 [Κεφάλαιο 9:Ειδικοί Κινητήρες Χαμηλής Ισχύος]

ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

4.1 Βασικά στοιχεία μηχανικής κατά το φρεζάρισμα

4.1.1 Γενικές έννοιες – βασικά μεγέθη

Πρόωση κοπής (cutting feed) [f]:

Είναι η απόσταση την οποία διανύει το ΚΕ, ή το υπό κατεργασία τεμάχιο (μετατόπιση τραπέζης εργαλειομηχανής), κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής της κυρίας ατράκτου της εργαλειομηχανής (spindle) μαζί με το ΚΕ, μετρούμενη σε ίντσες ανά περιστροφή (IPR) ή mm ανά περιστροφή (mm/rev). Σε μερικές περιπτώσεις το ΚΕ διεισδύει (feeds) εντός του υπό κατεργασία τεμαχίου, ενώ σε άλλες περιπτώσεις το υπό κατεργασία τεμάχιο διεισδύει εντός του ΚΕ. Για ένα πολύφτερο ΚΕ (multi-point tool), η πρόωση κοπής ισούται με τη πρόωση ανά δόντι (feed per tooth) [f_z], μετρούμενη σε ίντσες ανά δόντι (IPT) ή mm/δόντι, πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των οδόντων του ΚΕ.

Ταχύτητα κοπής (cutting speed) [v_c]:

Είναι η ταχύτητα του ΚΕ, κατά τη διάρκεια της κοπτικής διαδικασίας, αναγόμενη στην κοπτική ακμή του ΚΕ. Μετριέται σε πρόωση επιφάνειας ανά λεπτό (surface feed per minute – SFM) ή σε m/min.

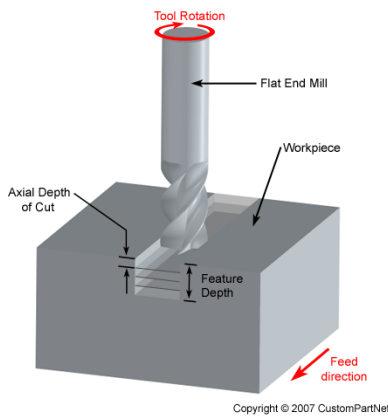
Ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου (spindle speed) [n]:

Είναι η περιστροφική ταχύτητα του άξονα της εργαλειομηχανής και συνάμα του ΚΕ, μετρούμενη σε περιστροφές ανά λεπτό (revolutions per minute) (RPM).

Ρυθμός πρόωσης (feed rate):

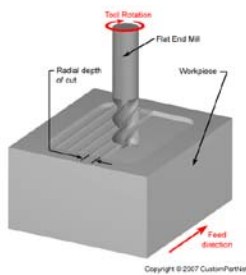
Είναι η σχετική, στο υπό κατεργασία τεμάχιο, ταχύτητα κοπής του ΚΕ κατά τη διάρκεια της κοπτικής διαδικασίας. Ο ρυθμός πρόωσης μετριέται σε ίντσες ανά λεπτό (IPM) ή mm/min και είναι «προϊόν» της πρόωσης κοπής (IPR) και της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου (RPM).

Αξονικό βάθος κοπής (axial depth of cut):



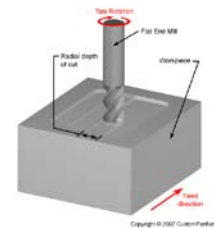
Είναι το βάθος κοπής του ΚΕ στο υπό κατεργασία τεμάχιο, κατά τη διάρκεια της κοπής. Το βάθος κοπής μετράται κατά μήκος του άξονα του ΚΕ. Τα μεγάλα αξονικά βάθη απαιτούν χαμηλό ρυθμό πρόωσης, διαφορετικά μεταφέρονται στο ΚΕ υψηλά φορτία, κάτι το οποίο μειώνει τη διάρκεια ζωής του ΚΕ. Για να αποφευχθούν αυτά τα φορτία, η κατεργασία διεξάγεται σε διαφορετικά περάσματα (πάσα). Σε αυτή την περίπτωση το ΚΕ μετατοπίζεται σε διακριτά και καθορισμένα βάθη κοπής ανά πάσο.

Ακτινικό βάθος κοπής (radial depth of cut):



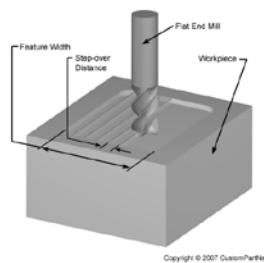
Είναι το βάθος κοπής κατά μήκος της ακτίνας του ΚΕ στο υπό κατεργασία τεμάχιο. Εάν το ακτινικό βάθος κοπής είναι μικρότερο από την ακτίνα του ΚΕ, τότε το ΚΕ κόβει τμηματικά και διεξάγει περιφερικό φρεζάρισμα. Εάν το ακτινικό βάθος κοπής ισούται με τη διάμετρο του ΚΕ, τότε το ΚΕ εισχωρεί πλήρως στο υπό κατεργασία τεμάχιο και δημιουργεί

θυλάκια (slots). Τα μεγάλα ακτινικά βάθη κοπής απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς πρόωσης, διαφορετικά το ΚΕ θα καταπονηθεί με υψηλά φορτία και θα μειωθεί ο χρόνος ζωής του. Για το λόγο αυτό, η κατεργασία εξελίσσεται σε διάφορα στάδια, όσο το ΚΕ κινείται εντός της απόστασης step-over και διεισδύει στο επιθυμητό ακτινικό βάθος κοπής.



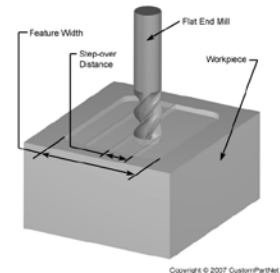
Σχήμα 4.1 Περιφερικό φρεζάρισμα (Αριστερά) – Φρεζάρισμα θυλακίων (Δεξιά)

Απόσταση διαδοχικού βηματισμού (step-over distance):



Για να κατεργαστούμε με φρεζάρισμα μια γεωμετρία, η οποία είναι μεγαλύτερης έκτασης από το πλάτος του ΚΕ, θα πρέπει να διεξάγουμε διαδοχικές κοπές, οι οποίες εκτελούνται βαθμιδωτά και διαδοχικά η μια μετά την άλλη, με τρόπο τέτοιο που μοιάζει με διαδοχικούς βηματισμούς του ΚΕ. Η

απόσταση διαδοχικού βηματισμού (step-over) είναι ταυτόσημη με το ακτινικό βάθος κοπής κάθε πάσου και πρέπει να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της διαμέτρου του ΚΕ.



Σχήμα 4.2 Περιφερικό φρεζάρισμα (αριστερά), Φρεζάρισμα θυλακίων (δεξιά)

4.1.2 Μηχανική φρεζαρίσματος – Βασικές Εξισώσεις

Δίνονται παρακάτω βασικοί συμβολισμοί και εξισώσεις μηχανικής κοπών που αφορούν στο φρεζάρισμα:

Ορολογία και συμβολισμοί κατά το φρεζάρισμα:

D_c : Διάμετρος κοπής (mm)

l_m : Υπό κατεργασία μήκος (mm)

D_e : Ενεργή διάμετρος κοπής

a_p : Βάθος κοπής (mm)

a_e : Πλάτος κοπής (mm)

v_c : Ταχύτητα κοπής (m/min)

Q : Ρυθμός αποβολής υλικού (cm^3 / min)

T_c : Χρόνος κατεργασίας (min)

z_n : Αριθμός δοντιών

f_z : Πρόωση ανά δόντι (mm/δόντι)

f_n : Πρόωση ανά περιστροφή (mm/rev)

v_f : Ταχύτητα πρόωσης τραπέζης (mm/min)

h_{ex} : Μέγιστο πάχος αποβλήτου (mm)

h_m : Μέσο θεωρητικό πάχος αποβλήτου (mm)

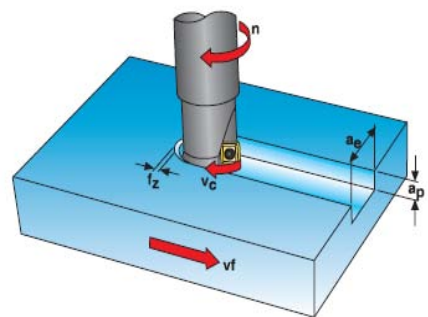
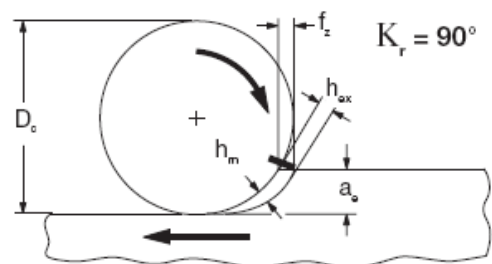
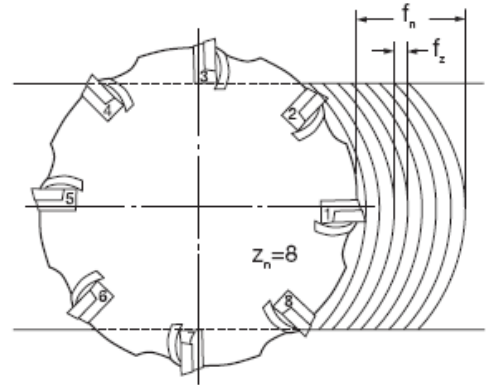
z_c : Ενεργός αριθμός δοντιών¹

k_c : Δύναμη κοπής ανά mm^2 (N/mm^2)

n : Στροφές ατράκτου (RPM)

η : Βαθμός απόδοσης

κ_r : Βασική γωνία κοπής (degrees)



¹ Ο ενεργός αριθμός δοντιών z_c είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των v_f και f . Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει $z_c = z_n$, χωρίς να αποκλείεται όμως να έχουμε $z_c < z_n$.

k_{c1} : Δύναμη κοπής για πάχος αποβλήτου 1mm (N/mm^2). Είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία υλικών της αυτή δίνεται από της πίνακες του κατασκευαστή εργαλείων

γ_p : Αξονική κλίση κοπτικού εργαλείου

γ_f : Ακτινική κλίση κοπτικού εργαλείου

γ_o : (Γωνία κλίσης του κοπτικού εργαλείου) + (γωνία κλίσης του ένθετου πλακιδίου)

m_c : Εκθέτης που λαμβάνεται στον υπολογισμό της δύναμης κοπής ανά mm^2 (k_{c1})

v_{co} : Σταθερά για την ταχύτητα κοπής

c_{vc} : Συντελεστής διόρθωσης της ταχύτητας κοπής

iC : Καταχωρημένος κύκλος

ω_e : Γωνία σύμπλεξης

M_c : Ροπή κοπής [Nm]

Γενικές σχέσεις για το φρεζάρισμα :

$$\text{Ταχύτητα κοπής (} v_c \text{) : } v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad [\text{ m/min }] \quad (4.1)$$

$$\text{Στροφές ατράκτου (} RPM \text{) : } n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad [\text{ rev/min }] \quad (4.2)$$

$$\text{Ταχύτητα πρόωσης (} v_f \text{) : } v_f = n \cdot z_n \cdot f_z \quad [\text{ mm/min }] \quad (4.3)$$

$$v_f = n \cdot z_c \cdot f_z \quad [\text{ mm/min }] \quad (4.4)$$

$$\text{Ρυθμός αποβολής υλικού (} cm^3 / \text{ min) : } Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad [\text{ cm}^3 / \text{ min }] \quad (4.5)$$

$$\text{Πρόωση ανά δόντι (} f_z \text{) : } f_z = \frac{v_f}{n \cdot z_n} \quad [\text{ mm/δόντι }] \quad (4.6)$$

$$\text{Πρόωση ανά περιστροφή (} f_n \text{) : } f_n = \frac{v_f}{n} \quad [\text{ mm/rev }] \quad (4.7)$$

$$\text{Δύναμη κοπής ανά } mm^2 \text{ } k_c \text{ (} N/mm^2 \text{) : } k_c = k_{c1} \times h_m^{-z} \quad [\text{ N/mm}^2] \quad (4.8)$$

(z: διορθωτικός παράγοντας στο μέσο πάχος αποβλήτου)

Υπολογισμός ισχύος κοπής κατά το φρεζάρισμα:

$$\text{Ροπή (Nm): } M_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{2\pi \times n} \quad (4.9)$$

$$\text{Ισχύς (kW): } P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 102 \times 9.81} \quad (4.10)$$

$$\text{Μέσο θεωρητικό πάχος αποβλήτου (mm): } h_m = \frac{f_z \times a_e \times 360}{D \times \pi \times \arccos \left[1 - \frac{2 \cdot a_e}{D} \right]} \quad (4.11)$$

			Drilling	Milling		Threading
			k	k _{C1}	Z	k _C
Application Material Groups			Material factor	N/mm ²	Correction factor	N/mm ²
1. Steel	1.1	Magnetic soft steel	1,3	1400	0,18	2000
	1.2	Structural steel, case carburizing steel	1,4	1450	0,22	2100
	1.3	Plain Carbon steel	1,9	1500	0,20	2200
	1.4	Alloy steel	1,9	1550	0,20	2400
	1.5	Alloy steel, Hardened and tempered steel	2,7	1600	0,20	2500
	1.6	Alloy steel, Hardened and tempered steel	3,4	1700	0,20	2600
	1.7	Alloy steel, Heat treated	3,7	1900	0,20	2900
	1.8	Alloy steel, Hardened & Wear resistant steel	4,0	2300	0,20	2900
2. Stainless Steel	2.1	Free machining, Stainless Steel	1,9	1300	0,36	2300
	2.2	Austenitic,	1,9	1500	0,32	2600
	2.3	Ferritic + Austenitic, Ferritic, Martensitic	2,7	1600	0,24	3000
3. Cast Iron	3.1	Lamellar graphite	1,0	900	0,26	1600
	3.2	Lamellar graphite	1,5	1100	0,26	1600
	3.3	Nodular graphite, Malleable Cast Iron	2,0	1150	0,24	1700
	3.4	Nodular graphite, Malleable Cast Iron	1,5	1450	0,24	2000
4. Titanium	4.1	Titanium, unalloyed	1,4	900	0,20	2000
	4.2	Titanium, alloyed	2,0	1200	0,22	2000
	4.3	Titanium, alloyed	2,7	1450	0,22	2300
5. Nickel	5.1	Nickel, unalloyed	1,3	1100	0,12	1300
	5.2	Nickel, alloyed	2,0	1450	0,22	2000
	5.3	Nickel, alloyed	2,7	1700	0,22	2000
6. Copper	6.1	Copper	0,6	450	0,20	800
	6.2	β-Brass, Bronze	0,7	500	0,30	1000
	6.3	α-Brass	0,7	600	0,32	1000
	6.4	High Strength Bronze	1,5	1600	0,36	1000
7. Aluminium Magnesium	7.1	Al, Mg, unalloyed	0,6	250	0,22	700
	7.2	Al alloyed, Si < 0.5%	0,6	450	0,18	700
	7.3	Al alloyed, Si > 0.5% < 10%	0,7	450	0,18	800
	7.4	Al alloyed, Si > 10% Whisker reinforced Al-alloys Mg-alloys	0,7	500	0,15	1000
8. Synthetic materials	8.1	Thermoplastics	0,6	1400	0,15	400
	8.2	Thermosetting plastics	0,6	1400	0,20	600
	8.3	Reinforced plastic materials	1,0	1600	0,30	800
9. Hard material	9.1	Cermets (metals-ceramics)	4,0	2600	0,38	>2600
10. Graphite	10.1	Graphite	-	200	0,30	600

Σχήμα 4.3 Δύναμη κοπής για πάχος αποβλήτου 1mm (N / mm²). Είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία υλικών, δίνεται από πίνακες του κατασκευαστή εργαλείων [4.2]

4.1.3 Μηχανική Διάτρησης & Σπειροτόμησης– Βασικές Εξισώσεις

Χωρίς αλλαγή στους συμβολισμούς που δόθηκαν παραπάνω δίνονται επίσης εξισώσεις μηχανικής κοπών που αφορούν στη διάτρηση και σπειροτόμηση, καθώς και αυτές οι κατεργασίες μπορούν αν υλοποιηθούν σε επιτραπέζιες CNC φρέζες.

Διάτρηση:

Στροφές ατράκτου (RPM):

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ (RPM)} \quad (4.12)$$

v_c = ταχύτητα κοπής [m/min]

D= διάμετρος (mm)

Ταχύτητα πρόωσης:

$$v_f = n \cdot f_n \text{ (mm/min)} \quad (4.13)$$

f_n =feed/rev

n=r/min (RPM)

Αξονική δύναμη εισχώρησης:

$$T = 11.4 \times K \times D \times (100 \times f_n)^{0.85} \quad (4.14)$$

Ισχύς (kW):

$$P = \frac{1.25 \times D^2 \times K \times n \times (0.056 + 1.5 \times f_n)}{100000}$$

P=Power (kW) (για μετατροπή σε HP πολλαπλασιάζουμε με 1.341) (4.15)

K=συντελεστής υλικού

T= δύναμη εισχώρησης (N)

Σπειροτόμηση:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ (RPM)} \quad (4.16)$$

Ροπή [Nm]:

$$M_d = \frac{p^2 \times D \times k_c}{8000} \quad (4.17)$$

p = βήμα [mm] D = ονομαστική διάμετρος [mm]

k_c = Δύναμη κοπής ανά mm^2

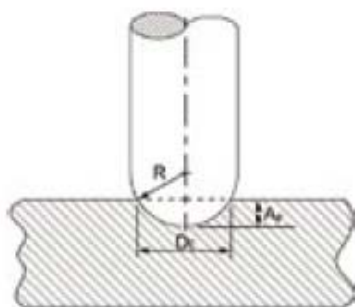
Ισχύς (kW):

$$P = \frac{M_d \times 2 \times \pi \times n}{60} \quad (4.18)$$

4.1.4 Εξειδίκευση για φρεζάρισμα με σφαιροειδή κονδύλια (ball nose end mills)

Ένα σφαιροειδές κονδύλι (ball nose end mill) έχει στην άκρη του μια ημισφαιρική επιφάνεια κοπής. Τα σφαιροειδή κονδύλια χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατεργασία καλουπιών (dies) και μητρών (moulds) καθώς της για την κατασκευή σύνθετων επιφανειών για την αεροπορική βιομηχανία, τη βιομηχανία οχημάτων και την πολεμική βιομηχανία (defense industry), ως τα πλέον κατάλληλα για ελεύθερες 3D μορφές.

Η ενεργή διάμετρος κοπής είναι ο βασικότερος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη ώστε να υπολογισθεί για αυτά η ταχύτητα περιστροφής της κυρίας ατράκτου (spindle). Η ενεργή διάμετρος του κοπτικού εργαλείου είναι αυτή που πραγματικά χρησιμοποιείται στα αξονικά βάθη κοπής. Η ενεργή διάμετρος επηρεάζεται από δυο παραμέτρους : την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου και το αξονικό βάθος κοπής και δίνεται από τη σχέση:



$$D_E = 2 \times \sqrt{R^2 - (R - A_p)^2} \quad (4.19)$$

D_E = Ενεργή διάμετρος

R = Ακτίνα του κοπτικού εργαλείου

A_p = Αξονικό βάθος κοπής

Η ενεργή διάμετρος κοπής αντικαθιστά την διάμετρο (D_c) του κοπτικού εργαλείου όταν υπολογίζεται η ενεργός ταχύτητα κοπής v_c για φρεζάρισμα με σφαιροειδή κονδύλια. Η σχέση είναι η ακόλουθη :

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_E}{1000} \quad (4.20)$$

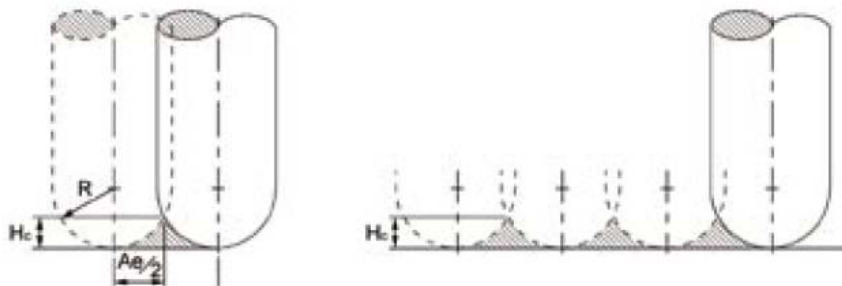
όπου:

v_c = η ταχύτητα κοπής (m/min)

D_E = η ενεργός διάμετρος κοπής (mm)

n = η ταχύτητα περιστροφής (rpm)

Όταν ένα μη επίπεδο κοπτικό εργαλείο, π.χ. όταν ένα σφαιροειδές κονδύλι, χρησιμοποιείται για να κατεργαστεί μια επιφάνεια με την τακτική «zigzag», μεταξύ δυο πάσων εμφανίζεται υπόλειμμα υλικού, το ύψος των οποίων υπολογίζεται ως εξής :



$$H_c = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{A_e}{2}\right)^2} \quad \text{ή} \quad A_e = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - H_c)^2} \quad (4.21)$$

όπου,

H_c = Το ύψος του υλικού που απομένει (υπόλειμμα)

R = Η ακτίνα του κοπτικού εργαλείου

A_e = Η απόσταση μεταξύ δυο πάσων

Η συσχέτιση μεταξύ του H_c και της τιμής της τραχύτητας επιφανείας R_a προσεγγίζεται περίπου ως εξής [4.2]:

H_c (μm)	0.2	0.4	0.7	1.25	2.2	4	8	12.5	25	32	50	63	100
R_a (μm)	0.03	0.05	0.1	0.4	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	8	12.5	16	25

Πίνακας 4.1 Η R_a αντιστοιχεί περίπου στο 25% του H_c

4.1.5 Κατεργασία σε σκληρυμένο χάλυβα και διόρθωση πρόωσης σε περιγράμματα

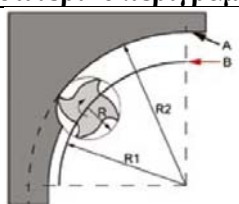
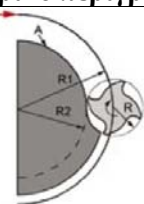
Πολλοί κατασκευαστές κοπτικών με την πολυετή εμπειρία τους παρέχουν χρήσιμες οδηγίες – κατευθύνσεις για την χρήση των κοπτικών τους και τον ορθότερο υπολογισμό παραμέτρων κοπής, π.χ. Dormer [4.2]

Έτσι π.χ. ο ακόλουθος πίνακας-οδηγός [4.2] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αξονικών βαθών κοπής όταν κατεργαζόμαστε σκληρυμένο χάλυβα.

Σκληρότητα (HRC)	Αξονικό βάθος κοπής (A_p)
$30 \leq 40$	$0.10 \times D$
$40 \leq 50$	$0.05 \times D$
$50 \leq 60$	$0.04 \times D$

Πίνακας 4.2 υπολογισμό των αξονικών βαθών κοπής όταν κατεργαζόμαστε σκληρυμένο χάλυβα

Ενώ το παρακάτω σχήμα για διόρθωση της πρόωσης για εσωτερικά και εξωτερικά περιγράμματα.

Εσωτερικό περίγραμμα	Εξωτερικό περίγραμμα
	
$v_{f(prog)} = v_f \times \frac{R_2 - R}{R_2}$	$v_{f(prog)} = v_f \times \frac{R_2 + R}{R_2}$
<p>A= η τροχιά που ακολουθείται B= η τροχιά του κέντρου του κοπτικού εργαλείου R= η ακτίνα φρεζαρίσματος R₁ = η ακτίνα της τροχιάς κίνησης του κοπτικού εργαλείου R₂ = η ακτίνα πάνω στην οποία γίνεται το φρεζάρισμα</p>	

Πίνακας 4.3 Διόρθωση της πρόωσης για εσωτερικά και εξωτερικά περιγράμματα

4.1.6 Τρόποι εισχώρησης ΚΕ στην πρώτη ύλη

Απαντώνται στις κατεργασίες φρεζαρίσματος οι παρακάτω τρόποι εισχώρησης κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο:

Εισχώρηση με γωνία (ramping)

Προτεινόμενες γωνίες εισχώρησης α στο κατεργαζόμενο τεμάχιο (ramping angle) για εφαρμογή σε κονδύλια φρεζαρίσματος υψηλών ταχυτήτων (HM) [4.2].



Αριθμός οδόντων	2	3	≥ 4
Για χάλυβα και χυτοσίδηρο	≤ 15	≤ 10	≤ 5
Για αλουμίνιο, χαλκό και πλαστικά	≤ 30	≤ 20	≤ 10
Για σκληρυμένο χάλυβα	≤ 4	≤ 3	≤ 2

Πίνακας 4.3 Προτεινόμενες γωνίες εισχώρησης α στο κατεργαζόμενο τεμάχιο

Σπειροειδής εισχώρηση



Υλικό	Προτεινόμενο a_p
Χάλυβας	$\leq 0.10 \times D$
Αλουμίνιο	$\leq 0.20 \times D$
Σκληρυμένος χάλυβας	$\leq 0.05 \times D$

Πίνακας 4.4 Προτεινόμενες τιμές ταχύτητας σπειροειδούς εισχώρησης για διαφορετικού τύπου υλικά

$$D_{b\max} = 2 \times (D - R) \quad (4.22)$$

όπου ,

$D_{b\max}$ = η μέγιστη δυνατή διάμετρος διάνοιξης

D = η διάμετρος φρεζαρίσματος

και R= Η ακτίνα φρεζαρίσματος

Αξονική εισχώρηση



Σε αυτήν την περίπτωση , η πρόωση πρέπει να διαιρεθεί με τον αριθμό των οδόντων του κοπτικού εργαλείου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι δεν πρέπει να διεξαχθεί αξονική εισχώρηση με κονδύλια που φέρουν παραπάνω από τέσσερις οδόντες [4.2].

4.2 Κατηγορίες φρεζαρίσματος, κοπτικών εργαλείων και επιλογή κατά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα

4.2.1 Κατηγορίες Φρεζαρίσματος (milling)

Το φρεζάρισμα ως κατεργασία διαχωρίζεται στις εξής κατηγορίες [4.1] :

Γενικό φρεζάρισμα (general machining): Είναι μια στρατηγική φρεζαρίσματος για γενική χρήση . Το πλάτος κοπής (a_e) και το βάθος κοπής (a_p) μπορούν να διαφέρουν σε κάθε περίπτωση. Τα εργαλεία στην εν λόγω στρατηγική φρεζαρίσματος έχουν συνήθως μεγάλα μήκη κοπής (long cutting lengths) και μικρού πάχους διαμέτρους στα άκρα τους (core diameters). Δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις στις ανοχές (tolerances). Στην εν λόγω στρατηγική φρεζαρίσματος , η χρήση των βασικών στοιχείων της τεχνολογίας CNC δεν καθιστά εφικτές προχωρημένες μεθόδους κατεργασίας. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα της μεθόδου λαμβάνονται από τον βαθμό αποβολής υλικού $Q(cm^3 / min)$. Το εύρος εφαρμογής της εν λόγω κατηγορίας περιλαμβάνει μικρές παραγωγές (small batch sizes) σε ευρύ πεδίο υλικών.

Φρεζάρισμα υψηλών ταχυτήτων (high speed precision machining): Είναι μια στρατηγική φρεζαρίσματος που συνδυάζει μικρά ακτινωτά βάθη κοπής (small radial depth of cut) με υψηλές ταχύτητες κοπής και πρόσθη της τράπεζας της εργαλειομηχανής (table feed) . Ανάλογα με τη μέθοδο , μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί βαθμοί αποβολής υλικού και χαμηλές τιμές τραχύτητας R_a . Τυπικά χαρακτηριστικά της εν λόγω στρατηγικής είναι οι μικρές δυνάμεις κοπής που εμφανίζονται , η μειωμένη παραγωγή θερμότητας στο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο , μικρότερη ανάγκη για γλύφανση (burr formation) και υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια στο τεμάχιο. Με τη μέθοδο HSM (High Speed Machining) μπορεί να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού και/ή αποπεράτωση της επιφάνειας με τη χρήση πολύ υψηλότερων ταχυτήτων κοπής από αυτές που εμφανίζονται στο γενικό φρεζάρισμα (general machining). Εδώ τα εργαλεία είναι πολύ ευσταθή , έχουν μεγάλο πάχος διάμετρο στα άκρα τους και μικρά μήκη κοπής , περιλαμβάνουν κατάλληλα διαμορφωμένο και ευκρινή χώρο για την εξαγωγή του αποβλήτου για την εύκολη απομάκρυνσή του και μπορεί να φέρουν επικάλυψη (π.χ. επικάλυψη κοβαλτίου , που προσδίδει βελτιωμένη αντοχή σε φθορά λόγω των υψηλών ταχυτήτων κοπής). Πεδίο εφαρμογής της εν λόγω μεθόδου φρεζαρίσματος είναι η βιομηχανία ταχείας κατασκευής καλουπιών/χυτών για προ-αποπερατωμένες (pre-finishing) και αποπερατωμένες (finishing) κατεργασίες σε σκληρυμένο χάλυβα (78-62 HRC) . Η τεχνική αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στις περισσότερες κατηγορίες υλικών όταν χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο εργαλείο και προχωρημένες μέθοδοι κατεργασίας.

Φρεζάρισμα υψηλών αποδόσεων (high performance machining): Στην εν λόγω στρατηγική φρεζαρίσματος επιτυγχάνονται πολύ υψηλοί βαθμοί αποβολής υλικού . Τυπικό χαρακτηριστικό της εν λόγω κατεργασίας είναι ότι το πλάτος κοπής (a_e) αντιστοιχεί μια φορά στη διάμετρο κοπής (D_c) και το βάθος κοπής από 1 μέχρι $1^{1/2}$ φορές στη D_c αναφορικά με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Με τη μέθοδο HPM (High Performance Machining) επιτυγχάνεται ιδιαίτερα υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού εφαρμόζοντας πολύ υψηλότερες φορτίσεις στο απόβλητο (chip load) από ότι στο γενικό φρεζάρισμα (general machining). Τα κοπτικά έχουν ειδικές διαμορφώσεις στους άυλακες τους για την απομάκρυνση του αποβλήτου, στις αιχμές τους έχουν προστατευτικές επιφάνειες 45° ή προστατευτικά γωνιακά ράδια (corner radius) , έχουν έναν ειδικά λείο διαμορφωμένο χώρο για το απόβλητο και την επικάλυψη που επιδέχονται , παραδίδονται με ή χωρίς άξονες τύπου Weldon (Weldon shanks). Πεδίο εφαρμογής της εν λόγω κατηγορίας είναι οι κατεργασίες σε περιβάλλοντα μαζικής παραγωγής στα οποία ο χρόνος παραγωγής/παράδοσης των τεμαχίων είναι πολύ μεγάλης σημασίας ή σε παραγωγή ξεχωριστών προϊόντων στα οποία απαιτείται υψηλός βαθμός αποβολής υλικού $Q(cm^3 / min)$

Φρεζάρισμα υψηλών προώσεων(high feed machining): Στην εν λόγω στρατηγική φρεζαρίσματος μπορούν να επιτευχθούν υψηλές τιμές προώσεως με πλήρη σύμπλεξη της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου (a_e) σε συνδυασμό με μικρά βάθη κοπής (a_p). Με τη χρήση της τεχνολογίας HFM (High Feed Machining) επιτυγχάνεται υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού και/ή αποπεράτωση επιφανειών με πολύ υψηλότερες προώσεις τραπέζης συγκριτικά με αυτές του γενικού φρεζαρίσματος (general machining). Τα κοπτικά έχουν ιδιαίτερα μελετημένο το κυρίαρχο κοπτικό δόντι (front teeth) , έχο ψ πο λ μικρά μήκη για κοπή και επικάλυψη. Πεδίο εφαρμογής της εν λόγω κατηγορίας φρεζαρίσματος είναι οι κατεργασίες μαλακού και σκληρυμένου χάλυβα , κατεργασίες τιτανίου και ανοξείδωτου χάλυβα , καθώς επίσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια καλή μέθοδος για προεργασία πριν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος HSM . Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί για φρεζάρισμα θυλακίων μεγάλου βάθους

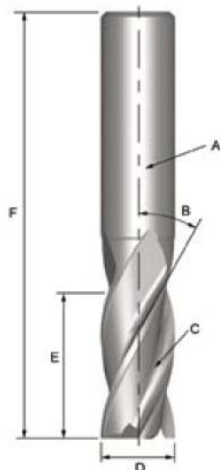


Σχήμα 4.4 Φρεζάρισμα υψηλών ταχυτήτων (HSM)

4.2.2 Κονδύλια (end mills)

Στο επιτραπέζιο φρεζάρισμα σχεδόν κατά αποκλειστικότητα χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα κονδύλια (end mills). Υπάρχουν σε αρκετές μορφές και τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται παρακάτω.

Βασικά Γεωμετρικά χαρακτηριστικά :



- A Τμήμα ατράκτου κοπτικού (Shank)
- B Γωνία Ελίκωσης (Helix Angle)
- C Ενεργός επιφάνεια-κανάλι κοπής (Φτερό – Flute)
- D Εξωτερική Διάμετρος (Outside Diameter)
- E Μήκος Κοπής (Cutting Length)
- F Συνολικό Μήκος (Overall Length)

Επιλέγοντας των αριθμό των φτερών (flutes)

Διακρίνονται σε δίφτερα, τρίφτερα, τετράφτερα ή και με περισσότερα φτερά (σπανιότερα). Ο αριθμός των φτερών (flutes) στα κονδύλια φρεζαρίσματος (end mill) εξαρτάται από:

- Το κατεργαζόμενο υλικό.
- Τις διαστάσεις του υπό κατεργασία τεμαχίου.
- Τις συνθήκες κατεργασίας.

Τα γενικά χαρακτηριστικά και κριτήρια επιλογής τους φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Ο ρόλος της γωνίας ελίκωσης (Helix angle)

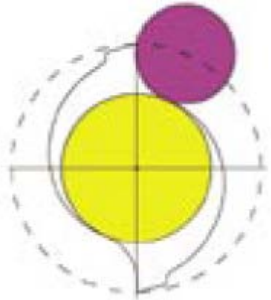
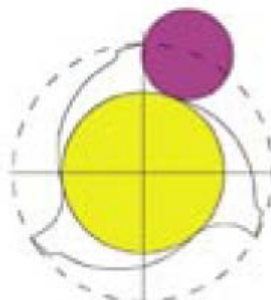
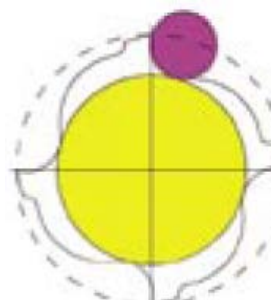
Αυξάνοντας τον αριθμό των φτερών (flutes), το φορτίο κοπής σε κάθε οδόντωση είναι περισσότερο ομοιογενές, με αποτέλεσμα να προκύπτει καλύτερη ποιότητα επιφανείας στο τεμάχιο που κατεργαζόμαστε.

Μια μεγάλη όμως γωνία ελίκωσης αυξάνει και το φορτίο (FV) κατά μήκος του άξονα του ΚΕ. Ένα μεγάλο φορτίο FV συνεπάγεται τα ακόλουθα:

- Αυξημένα φορτία στις εδράσεις (bearings) της εργαλειομηχανής.
- Μετατόπιση του ΚΕ κατά μήκος της ατράκτου περιστροφής. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κοχλιωτοί ,ή τύπου Weldon σφικτήρες (shanks).



Σχήμα 4.5 Κονδύλι φρεζαρίσματος (end mill)

2 flutes	3 flutes	4 flutes (or multiflutes)
		
<p>Αντοχή σε λυγισμό/κάμψη Υψηλή ←————→ Χαμηλή (flexural strength)</p>		
<p>Ρυθμός Απομάκρυνσης αποβλήτου Μεγάλος ←————→ Μικρός (chip space)</p>		
<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλος χώρος αποβλήτου. • Ευκολία αποβολής υλικού. • Ενδείκνυται για slot milling. • Ιδανικό για μεγάλο φόρτο εργασίας. • Μικρότερη ακαμψία εξαιτίας της μικρής διατομής του. • Μικρότερη ποιότητα επιφανείας στο τεμάχιο κατά την αποπεράτωση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Χώρος αποβλήτου περίπου ίσου μεγέθους με αυτόν των 2 flutes. • Μεγαλύτερη διατομή – μεγαλύτερη ακαμψία από αυτήν των 2 flutes. • Βελτιωμένη ποιότητα επιφανείας στο τεμάχιο. 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ακαμψία. • Μεγαλύτερη διατομή – μικρός χώρος αποβλήτου. • Κορυφαία ποιότητα επιφανείας στο τεμάχιο. • Ιδανικό για φρεζάρισμα profile, πλευρικό (side milling) και shallow slotting.

Πίνακας 4.5 Γενικά χαρακτηριστικά και κριτήρια επιλογής κονδυλίων



Κονδύλια – Βασικές Κατηγορίες

Τα κονδύλια φρεζαρίσματος κατατάσσονται ανάλογα με τη μορφή τους κατά τον ακόλουθο πίνακα:

Επίπεδα - Ξεχονδρίσματος (Flat end mills)	Σφαιρικά-Σφαιροειδή (Ball-nose End Mills)	Γωνιακά (Corner Radius End Mills)	Χαρακτικά - Λεπτοκατεργασίας (Miniature Cutters)
			
Τελειώνει σε τετραγωνική διατομή	Τελειώνει σε ημισφαιρική διατομή	Τελειώνει σε τετραγωνική διατομή με ράδιο.	Διάμετρος έως 1mm

Πίνακας 4.6 Κατάταξη των κονδυλίων φρεζαρίσματος ανάλογα με τη μορφή τους



Το πρότυπο DIN 1836 καθορίζει τους διαφορετικούς τύπους κοπτικής ικανότητας για τα κονδύλια, όπως παρακάτω:

	Για ΚΕ που κατεργάζονται χάλυβα, ανεπαρκή (low) σε συνθήκες υψηλής αντίστασης.
	Για ΚΕ που κατεργάζονται ελατά (malleable) υλικά.

Πίνακας 4.7 Μερικοί τύποι κοπτικής ικανότητας κατά το πρότυπο DIN 1836

Χαρακτηριστικά των κονδυλίων ως προς τις κοπτικές αιχμές

Ως προς τις κοπτικές αιχμές τους (απολήξεις των flutes) τα κονδύλια υποδιαιρούνται σε :

Κεντροφόρα κονδύλια	Μη-κεντροφόρα κονδύλια
	
<p>Ιδανικό για διάτρηση (drilling) και βυθίσεις (plunging).</p> <p>Στην περίπτωση άρτιου αριθμού ελικώσεων (π.χ. 2-4-6 κτλ) , τότε κεντρικά εισχωρούν μόνο δύο αιχμές. Στην περίπτωση περιττού αριθμού ελικώσεων (π.χ. 3-5 κτλ) , κεντρικά εισχωρεί μόνο μια αιχμή.</p>	<p>Χρησιμοποιείται μόνο για γεωμετρίες περιγράμματος (profile) και ανοικτών αυλακών (slots)</p> <p>Επιτρέπει την λείανση μεταξύ των κέντρων. (Allows the regrinding between centers)</p>

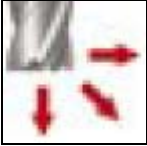
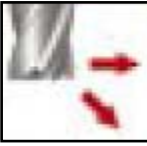
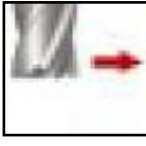
Πίνακας 4.8 Υποδιαίρεση των κονδυλίων ως προς τις κοπτικές αιχμές

Περεταίρω Κατηγοριοποίηση για την επιλογή κονδυλίων (end mills)

Υπάρχουν πολλές κατεργασίες οι οποίες ορίζονται υπό τον όρο “end milling”. Για κάθε κατεργασία, υπάρχει ένας βέλτιστος τύπος κοπτικού εργαλείου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί . Τρεις κυρίως παράμετροι επηρεάζουν τον τύπο του ΚΕ που τελικά θα επιλεγεί και την περεταίρω κατηγοριοποίηση των κοπτικών εργαλείων αυτού του τύπου :

- Η κατεύθυνση χρήσης (κοπής) του ΚΕ.
- Ο ρυθμός αποβολής του υλικού (Material Removal Rate).
- Ο τύπος της εφαρμογής.

Όσον αφορά την κατεύθυνση χρήσης του ΚΕ (Direction of the use of the cutter), μπορούμε να διαχωρίσουμε το σύνολο των ΚΕ σχετικά με τις πιθανές διευθύνσεις εργασίας πάνω στην επιφάνεια του υπό κατεργασία τεμαχίου (workpiece) με τρεις τρόπους:

3 Διευθύνσεις	2 Διευθύνσεις	1 Διεύθυνση
		

Πίνακας 4.9 Κατεύθυνση χρήσης του ΚΕ (Direction of the use of the cutter)

Παρατήρηση : Η αξονική κατεύθυνση είναι εφικτή μόνο με centre cutting end mills.

Όσον αφορά το ρυθμό αποβολής υλικού [Material Removal Rate – MRR (Q)] μπορούμε να τον υπολογίσουμε ως τον όγκο του υλικού που αποβάλλεται κατά τη διάρκεια της κοπής. Ο όγκος που αποβάλλεται είναι ο αρχικός όγκος του τεμαχίου πλην αυτόν που μένει μετά το πέρας της κατεργασίας. Ο χρόνος κοπής είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ΚΕ για να μετακινηθεί κατά το μήκος του τεμαχίου. Ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι η παράμετρος , η οποία επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το βαθμό τελικής ποιότητας αποπεράτωσης (finishing grade) του τεμαχίου.

Ορίζεται,

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \quad (4.23)$$

όπου:






$$Q = MRR(cm^3 / \text{min})$$

$$a_p = \text{αξονικό πάχος (mm)}$$

$$a_e = \text{ακτινικό μήκος (mm)}$$

$$v_f = \text{ρυθμός αποβολής (mm / min)}$$

Όσον αφορά τις εφαρμογές των κονδυλίων αυτές συνδέονται στενά με το ρυθμό αποβολής υλικού. Για κάθε εφαρμογή υπάρχει ένας διαφορετικός ρυθμός αποβολής υλικού , ο οποίος αυξάνεται με τον τρόπο εμπλοκής του κοπτικού εργαλείου με το υπό κατεργασία τεμάχιο.

Πλευρικό φρεζάρισμα (side milling)	Μετωπικό Φρεζάρισμα (face milling)	Slot Milling	Plunge Milling	Ramping
				
<p>Το ακτινικό βάθος κοπής πρέπει να είναι μικρότερο από το 0.25 της διαμέτρου του end mill κονδυλίου</p>	<p>Το ακτινικό βάθος κοπής (radial depth) δεν πρέπει να είναι παραπάνω από το 0.9 της διαμέτρου του ΚΕ, ενώ το αξονικό βάθος κοπής (axial depth) μικρότερο από το 0.1 της διαμέτρου του ΚΕ.</p>	<p>Φρεζάρισμα θυλακίου για σφηνάλακα. Το ακτινικό βάθος κοπής είναι ίσο με τη διάμετρο του end mill κονδυλίου.</p>	<p>Είναι πιθανόν να γίνει διάτρηση του υπό κατεργασία τεμαχίου (work piece), αποκλειστικά και μόνο με το κοπτικό κέντρο του ΚΕ (cutting center). Σε αυτή την περίπτωση η πρόωση του ΚΕ πρέπει να μειωθεί στο μισό.</p>	<p>Ταυτόχρονη αξονική και ακτινική εισχώρηση εντός του υπό κατεργασία τεμαχίου.</p>

Πίνακας 4.10 Συνιστώμενες παράμετροι χρήσης κονδυλίων ανά εφαρμογή

4.2.3 Κανόνες επιλογής και χρήσης κοπτικών εργαλείων

Γενικά

Η επιλογή συνθηκών κατεργασίας για επιτραπέζιες εργαλειομηχανές CNC με δεδομένο το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί έχει δύο σκέλη, το τεχνολογικό και το οικονομικό. Το πρώτο συνδέεται με όλους εκείνους τους περιορισμούς που αναφέρονται στις τεχνολογικές δυνατότητες της μηχανής, του κοπτικού εργαλείου και του περιβάλλοντος της κατεργασίας (υγρό κοπής, σύστημα συγκράτησης κλπ) καθώς και με τις προδιαγραφές ποιότητας του κατεργαζόμενου τεμαχίου (τραχύτητα επιφάνειας, ανοχές κλπ). Το δεύτερο σκέλος αναφέρεται στη βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας έτσι ώστε –τυπικά– να μεγιστοποιείται κάποια συνάρτηση κέρδους. Θεωρητικά, δηλαδή, πρόκειται για ένα πρόβλημα πολύ-παραμετρικής βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

Στην πράξη πολύ σπάνια ακολουθείται μια τέτοια διαδικασία λόγω των δυσκολιών που προκύπτουν από τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων, αλλά και από την πολυπλοκότητα της μαθηματικής ή αριθμητικής λύσης. Έτσι, αρκείται κανείς σε επιλογή συνθηκών μέσα από τεχνικούς καταλόγους των εταιρειών παραγωγής εργαλείων, με βοήθεια από handbooks υλικών με επιμέρους διορθώσεις προς τα άνω ή προς τα κάτω.

Πολύ σημαντική δε κρίνεται και η κτηθείσα κάθε φορά εμπειρία και τεχνογνωσία του χρήστη από την πολυετή ενασχόληση με τα αντικείμενα αυτά

Πριν διεξαχθεί φρεζάρισμα πρέπει να λαμβάνει κανείς υπόψη τα εξής:

- Επιλέγουμε από τους καταλόγους της κατασκευάστριας εταιρείας το καταλληλότερο για την εφαρμογή μας κονδύλι. Λαμβάνουμε υπόψη ότι υπάρχουν κεντροφόρα (center cutting type) και μη κεντροφόρα (non-center cutting type) κονδύλια.
- Επιλέγουμε την κατάλληλη ταχύτητα κοπής και τον κατάλληλο ρυθμό πρόωσης ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ του ρυθμού αποβολής υλικού και της διάρκειας ζωής του ΚΕ.
- Ενημερωνόμαστε για την κατάσταση και την ηλικία του ΚΕ.
- Επιλέγουμε τα καλύτερα από άποψη διαστάσεων κονδύλια, με όσο το δυνατόν γίνεται μεγαλύτερη διάμετρο, με σκοπό να μειώσουμε την απόκλιση και τις καμπτικές τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά.
- Επιλέγουμε κονδύλια με υψηλή στιβαρότητα και αποφεύγουμε να προβάλλουμε υπέρμετρα το ΚΕ από τον εργαλειοδέτη του.
- Τα κονδύλια με πολλές αυλακώσεις (flutes), έχουν υψηλή στιβαρότητα, μειωμένο χώρο αποβλήτου και ενδείκνυνται για υψηλές ταχύτητες πρόωσης τραπέζης.
- Τα κονδύλια με λιγότερες αυλακώσεις (flutes), έχουν μειωμένη στιβαρότητα έναντι αυτών με πολλές αυλακώσεις, παρέχουν περισσότερο χώρο για το απόβλητο και ως συνέπεια αυτού, το απόβλητο αποβάλλεται ευκολότερα από το ΚΕ χωρίς να μπλοκάρει την κοπή ή να συγκολλιέται πάνω στο ΚΕ εξαιτίας της ανάπτυξης θερμότητας.

Η επιλογή της καταλληλότερης ταχύτητας κοπής και του ρυθμού πρόωσης πρέπει να γίνεται με γνώμονα τον τύπο του υλικού που κατεργαζόμαστε, το υλικό του κονδυλίου, την ισχύ του άξονα μετάδοσης ισχύος (spindle) και την ποιότητα επιφανείας που επιδιώκουμε.

Επιλογή από καταλόγους

Για κάθε τύπο εργαλείου ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και με το υλικό του κοπτικού εργαλείου ο κατασκευαστής δίνει ένα πίνακα με συνιστώμενες τιμές πρόωσης και ταχυτήτων κοπής.

Παράδειγμα – φρεζάρισμα με χρήση κονδυλίων (end mills)

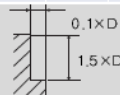
Για πλευρικό φρεζάρισμα με 3flute κονδύλι (standard solid carbide K30), υλικό κατεργασίας αλουμίνιο (Aluminum alloys), πλευρικό φινίρισμα και $D=2\text{mm}$ από τον παρακάτω πίνακα του κατασκευαστή υπολογίζουμε τις κατάλληλες παραμέτρους κοπής.

3 FLUTE, FINISH SIDE CUTTING

304303, 104103, 128103



MATERIAL	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		STAINLESS STEELS TITANIUM ALLOYS		CAST IRON		ALUMINUM ALLOYS		COPPER, BRASS NON-FERROUS METALS	
	~ HRc20		HRc20 ~ HRc30		HRc30 ~ HRc40									
HARDNESS	500 ~ 800N/mm ²		800 ~ 1000N/mm ²		1000 ~ 1300N/mm ²									
STRENGTH														
DIAMETER	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED
2	5500	180	4800	160	4000	120	8000	140	6500	330	16000	720	12000	540
3	3700	200	3200	170	2600	130	5300	140	4200	330	11000	690	8000	530
4	2800	200	2400	180	2000	130	4000	140	3200	340	8000	720	6000	540
5	2200	200	1900	180	1600	130	3200	140	2500	340	6400	710	4800	530
6	1800	200	1600	180	1300	130	2600	150	2100	400	5300	760	4000	580
8	1400	200	1200	180	1000	130	2000	150	1600	430	4000	760	3000	580
10	1100	200	950	180	800	130	1600	150	1300	450	3200	760	2400	580
12	900	200	800	180	660	130	1300	150	1000	470	2600	760	2000	580
14	800	200	700	180	570	130	1100	150	900	490	2300	760	1700	580
16	700	220	600	190	500	160	1000	170	800	510	2000	760	1500	580
20	550	220	480	190	400	160	800	180	640	540	1600	760	1200	580



※The FEED, in long & extra long types, should be reduced by around 50%

RPM =rev/min
FEED =mm/min

Σχήμα 4.5 Πίνακας επιλογής κονδυλίων

$$\text{Για } D=2\text{mm} \Rightarrow a_e = 0.1 \times D = 0.1 \times 2 = 0.2\text{mm} \Rightarrow \boxed{a_e = 0.2\text{mm}}$$

$$\text{Και } a_{p\max} = 1.5 \times D = 3\text{mm} \Rightarrow \boxed{a_{p\max} = 3\text{mm}}, \text{ επιλέγω } \boxed{a_p = 0.1\text{mm}}$$

$$\text{άρα για } D = D_c = 2, n = 16000\text{RPM} \text{ και } \boxed{v_f = 720\text{mm} / \text{min}}$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D_c}{1000} = \frac{16000 \cdot \pi \cdot 2\text{mm}}{1000} = 100.5\text{m} / \text{min} \Rightarrow \boxed{v_c = 100.5\text{m} / \text{min}}$$

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} = \frac{0.2 \text{ mm} \cdot 0.1 \text{ mm} \cdot 720 \text{ mm} / \text{min}}{1000} = 0.0144 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \Rightarrow \boxed{Q = 0.0144 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}$$

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z_n} = \frac{720 \text{ mm} / \text{min}}{16000 \cdot 3} = 0.015 \text{ mm} / \text{flute} \Rightarrow \boxed{f_z = 0.015 \text{ mm} / \text{flute}}$$

$$f_n = \frac{v_f}{n} = \frac{720 \text{ mm} / \text{min}}{16000} = 0.045 \text{ mm} / \text{rev} \Rightarrow \boxed{f_n = 0.045 \text{ mm} / \text{rev}}$$

$$h_m = \frac{f_z \cdot a_e \cdot 360}{D \cdot \pi \cdot \arccos \left[1 - \frac{2 \cdot a_e}{D} \right]} = \frac{0.015 \cdot 0.2 \cdot 360}{2 \cdot \pi \cdot \arccos \left[1 - \frac{2 \cdot 0.2}{2} \right]} = 0.0047 \text{ mm} \Rightarrow \boxed{h_m = 0.0047 \text{ mm}}$$

Για σκληρυμένο αλουμίνιο, Si < 0.5% (π.χ. Al 7075) παίρνουμε $k_{c1} = 450 \text{ N} / \text{mm}^2$ και $z = 0.18$

Επομένως:

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-z} = 450 \times 0.0047^{-0.18} = 1182.68 \text{ N} / \text{mm}^2 \Rightarrow \boxed{k_c = 1182.68 \text{ N} / \text{mm}^2}$$

$$P_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 102 \cdot 9.81} = \frac{0.1 \cdot 0.2 \cdot 720 \cdot 1182.68}{60 \cdot 102 \cdot 9.81} = 0.283 \text{ KW} = 283.66 \text{ W}$$

Έτσι λοιπόν αν σε μια η επιτραπέζια CNC εργαλειομηχανή ο άξονα κυρίας ατράκτου δίδει ισχύ 330Watt και μέγιστη ταχύτητα πρόωσης τραπέζης 3000mm/min, θεωρώντας βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα $\eta = 0.97$ προκύπτει:

$$P = \frac{P_c}{\eta} = \frac{283.66}{0.97} = 293 \Rightarrow \boxed{P = 293 \text{ W} < P_{\max} = 330 \text{ W}}$$
 , επομένως δεν τίθεται θέμα

αστοχίας κινητήρα , ούτε του κοπτικού εργαλείου.

```

%
:O5000
N2G70G390G40G49G17G80G53G00
N4G1X0.Y0.S3819M03
N5G43H1Z1.0T2
N6M08
N7Z0.1
N8G01Z-1.0F22.91
N9G41D1Y-5.0F45.83
N10X4.0
N11G03X5.0Y-4.0I0.J1.0
N12G01Y4.0
N13G03X4.0Y5.0I-1.0J0.
N14G01X-4.0
N15G03X-5.0Y4.0I0.J-1.0
N16G01Y-4.0
N17G03X-4.0Y-5.0I1.0J0.
N18G01X0.
N19G40Y0.
N20G00Z1.0
N21G91G28Z0M09
N22G00X0.Y0.
N23M06
N24G90G00G1X-0.036Y0.536S4965M03
N25G43H2Z1.0T1

```

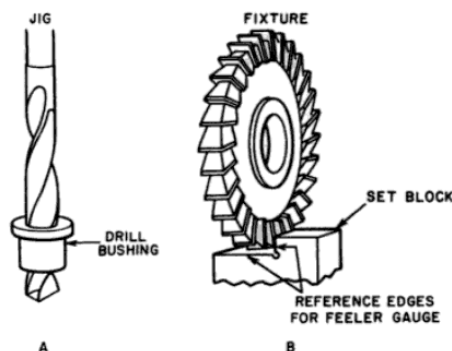
Σχήμα 4.6 Παράδειγμα κώδικα G μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων κοπής.

4.3 Ιδιοσυσκευές πρόσδεσης & συγκράτησης (Jigs & fixtures) και φρεζάρισμα

Οι ιδιοσυσκευές πρόσδεσης και συγκράτησης είναι συσκευές ακριβείας για την πρόσδεση και την ακριβή προσδιορισμό θέσης των υπό κατεργασία τεμαχίων. Η απαραίτητη σχέση και η ευθυγράμμιση του κοπτικού εργαλείου με το υπό κατεργασία τεμάχιο πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη μελέτη οποιασδήποτε κατεργασίας (φρεζάρισμα , διάτρηση , σπειροτόμηση κτλ.). Οι συσκευές πρόσδεσης και συγκράτησης είναι σχεδιασμένες κατά τέτοιο τον τρόπο ώστε να συγκρατούν , να τοποθετούν και να προσδιορίζουν τη θέση των τεμαχίων που κατεργαζόμαστε, με το σταθερότερο δυνατό τρόπο, ώστε να μην αποκλίνουμε από την επιθυμητή γεωμετρία. Οι ιδιοσυσκευές πρόσδεσης & συγκράτησης διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο με τον οποίο οδηγείται το κοπτικό εργαλείο στο υπό κατεργασία τεμάχιο.

Οι **ιδιοσυσκευές πρόσδεσης (jigs)** [4.10] είναι συσκευές που συγκρατούν (hold), στηρίζουν (support) και τοποθετούν (place) το υπό κατεργασία τεμάχιο. Είναι συσκευές που όχι μόνο συγκρατούν και στηρίζουν το υπό κατεργασία τεμάχιο αλλά επίσης οδηγούν το κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Οι συσκευές συγκράτησης μπορεί να είναι ακόμα και κουζινέτα από σκληρυμένο χάλυβα (hardened steel), τα οποία οδηγούν τα κοπτικά εργαλεία (Σχήμα 4.7Α) .

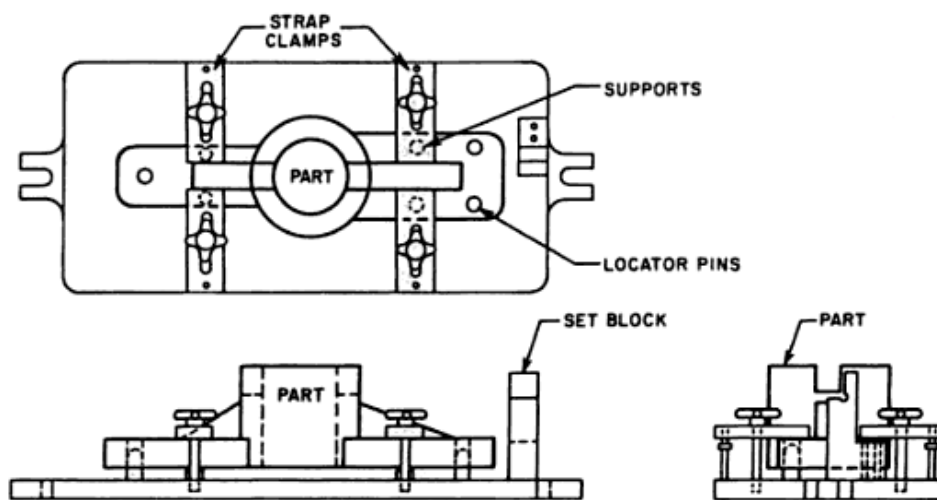
Οι **ιδιοσυσκευές συγκράτησης (fixtures)** [4.10] είναι συσκευές που με ακρίβεια τοποθετούν (locate), συγκρατούν (hold) και υποστηρίζουν (support) το υπό κατεργασία τεμάχιο με ασφάλεια έτσι ώστε να διεξαχθεί μια κατεργασία. Μαζί με τις συσκευές συγκράτησης χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια (set blocks) , ελάσματα μέτρησης διάκενου (feelers) και μικρομετρικά ρολόγια (thickness gauges) αναφορικά πάντα με το κοπτικό εργαλείο και το υπό κατεργασία τεμάχιο (Σχήμα.1.B). Μια συσκευή συγκράτησης θα πρέπει να τοποθετηθεί με ασφάλεια στην τράπεζα της μηχανής μέχρι να λάβει τέλος η κατεργασία. Κυρίως στις φρεζομηχανές οι συσκευές συγκράτησης είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε χρησιμοποιούνται με τα περισσότερα τυποποιημένα κοπτικά εργαλεία. Οι ιδιοσυσκευές συγκράτησης μπορεί να είναι από πολύ απλές και οικονομικές έως πολύ ακριβές και σύνθετες.



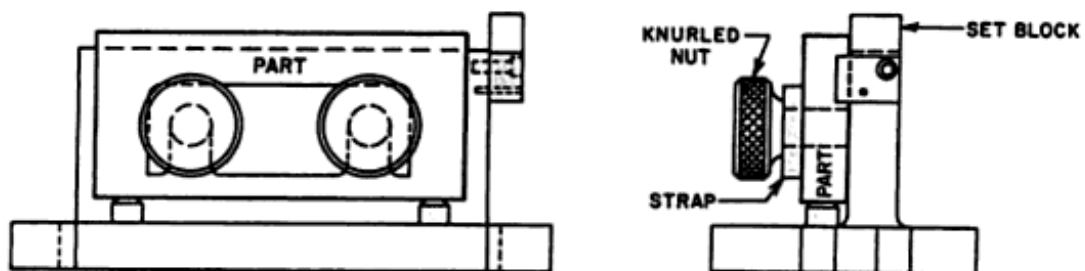
Σχήμα 4.7 Το κοπτικό εργαλείο αναφορικά με το υπό κατεργασία τεμάχιο

Οι **ιδιοσυσκευές πρόσδεσης (jigs)** διαιρούνται σε δυο κατηγορίες: σε ιδιοσυσκευές πρόσδεσης για διάτρηση (drilling) και ιδιοσυσκευές πρόσδεσης για διεύρυνση οπής (boring). Αν και κάποιες από αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν και για φρεζάρισμα (Milling) δεν εξειδικεύονται σε αυτό και δεν κρίνεται σκόπιμο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας να γίνει περαιτέρω εμβάθυνση σε αυτά.

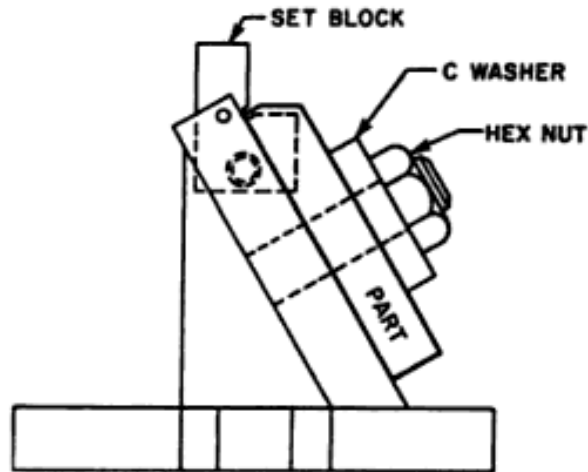
Οι **ιδιοσυσκευές συγκράτησης (fixtures)**, που περισσότερο χρησιμοποιούνται στο φρεζάρισμα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη σχεδίαση τους. Οι πιο κοινοί τύποι ιδιοσυσκευών συγκράτησης είναι οι ιδιοσυσκευές συγκράτησης τύπου πλάκας (plate), επικλινούς ή στρεφόμενης πλάκας (angle-plate), μέγγενες (vise-jaw), ευθυγραμμιστές και διαιρέτες (indexing) και κατεργασίας πολλαπλών αντικειμένων (multistation).



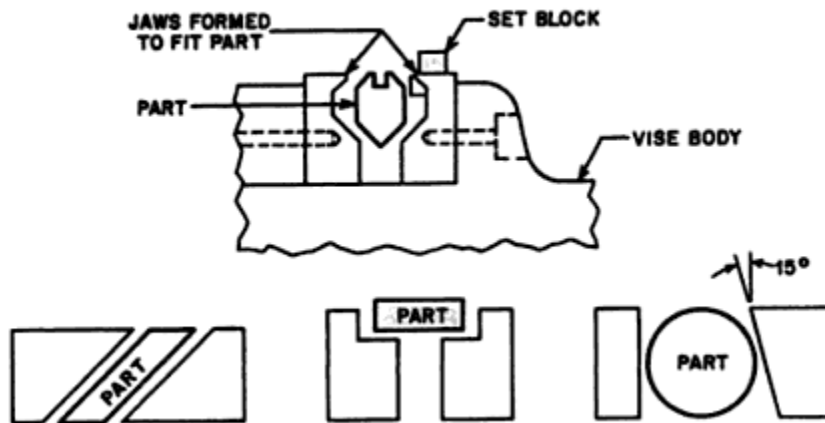
Σχήμα 4.8 Plate fixture



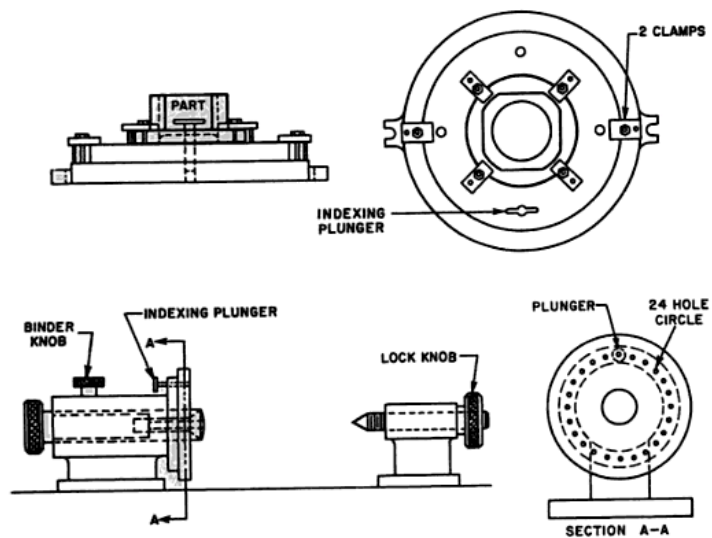
Σχήμα 4.9 Angle-Plate fixture



Σχήμα 4.10 Modified angle-plate fixture



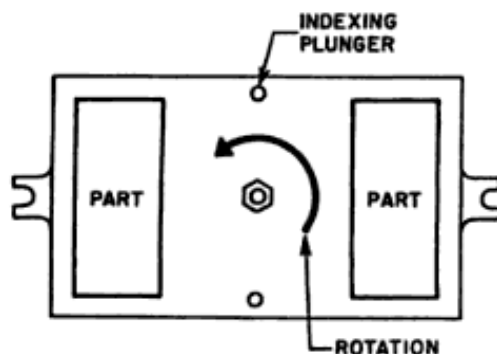
Σχήμα 4.11 Vise-jaw fixture



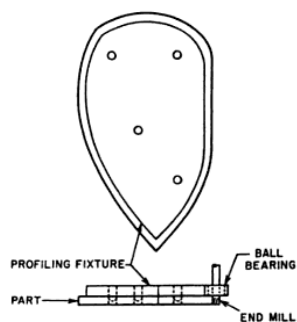
Σχήμα 4.12 Indexing fixture



Σχήμα 4.13 Τεμάχια όπου μπορούν να κατεργαστούν με indexing fixture



Σχήμα 4.14 Duplex Fixture



Σχήμα 4.14 Ιδιοσκευή συγκράτησης για γεωμετρία περιγράμματος

Για την ορθή συγκράτηση των τεμαχίων στο επιτραπέζιας κλίμακας φρεζάρισμα, χρησιμοποιούνται κυρίως μέγγκενες, περαστοί σφικκτήρες-συγκρατητήρες αύλακας μορφής «T» (T-clamps) και σπανιότερα μαγνητικοί συγκρατητές ή τραπέζια αναρρόφησης κενού (vacuum clamping tables). Για την καλύτερη ευθυγράμμιση και «γώνιασμα» των υπό κατεργασία τεμαχίων χρησιμοποιούνται επίσης ειδικές πρότυπες γωνίες και πρότυπα πλακίδια. Παρακάτω απεικονίζονται ανά κατηγορία και δίνονται πληροφορίες για μερικές από τις διατάξεις συγκράτησης.

Μέγγνες εργαλειομηχανών



Σχήμα 4.15 Διάφορες μέγγνες εργαλειομηχανών

Στις μέγγνες χρησιμοποιούνται επίσης πλευρικά όρια (side stops) για να «κλειδώνουν» τη θέση του υπό κατεργασία τεμαχίου κατά το επίπεδο XY.



Σχήμα 4.16 Πλευρικό όριο για μέγγνες (side stop)

Στήριξη σε τράπεζα με αύλακες μορφής T με clamps



Σχήμα 4.17 Clamps μορφής T για συγκράτηση των υπό κατεργασία τεμαχίων



Σχήμα 4.18 Set από clamps για συγκράτηση των υπό κατεργασία τεμαχίων

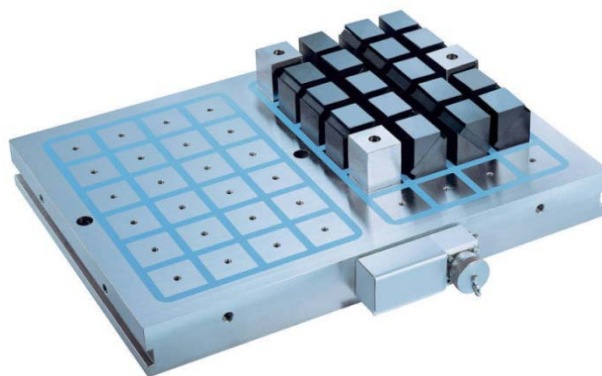
Χρησιμοποιούνται επίσης κεφαλές-περικόχλια (nuts) τύπου T που δένονται στην τράπεζα της εργαλειομηχανής και έχουν μεταβλητό ύψος με σκοπό να «κλειδώνουν» τη θέση του υπό κατεργασία τεμαχίου, όταν αυτό συγκρατείται από clamps στο επίπεδο XY.



Σχήμα 4.19 Πλευρικό όριο τύπου T (side stop)

Μαγνητικοί σφικτήρες

Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για να συγκρατούν μαγνητικά υπό κατεργασία τεμάχια.



Σχήμα 4.20 Μαγνητικός σφικτήρας

Συγκράτηση με αναρρόφηση (vacuum clamping)

Είναι συστήματα συγκράτησης με επενέργεια κενού (αναρρόφηση αέρα) και χρησιμοποιούνται τόσο σε υγρά περιβάλλοντα (ύπαρξη ψυκτικού υγρού) , όσο και σε στεγνά.



Σχήμα 4.21 Συγκράτηση με αναρρόφηση

Γωνιακό όριο 90°

Πρόκειται για πρότυπες γωνίες , που χρησιμοποιούνται για το «γώνιασμα» των υπό κατεργασία τεμαχίων.



Σχήμα 4.22 Γωνιακό όριο 90°

Πρότυπα πλακίδια



Σχήμα 4.23 Πρότυπα πλακίδια

Τυποποιημένα προϊόντα της παραπάνω κατηγορίας ιδιοσυσκευών μπορεί κανείς να αναζητήσει από πολλούς κατασκευαστές όπως π.χ. AMF, Vertex, i-mesh, optimum κ.α.

4.4. Υλικά για ΤΚΠ με φρέζες CNC επιτραπέζιας κλίμακας

Κατά την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με φρέζες CNC επιτραπέζιας κλίμακας είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται υλικά τα οποία είναι οικονομικά , δεν προκαλούν φθορές στα κοπτικά εργαλεία και που χαρακτηρίζονται από καλή κατεργασιμότητα (machinability). Παρακάτω αναφέρονται κάποια διαδεδομένα υλικά που διατίθενται σε εμπορική μορφή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με επιτραπέζιες φρέζες CNC.

Πορώδες Αλουμίνιο (Porous Aluminum) [4.17]

Είναι ένα υλικό με σύνθεση 80% σε σκόνη αλουμινίου (aluminum powder) και 20% σε εποξειδική ρητίνη (epoxy). Με κατάλληλη διαδικασία παράγονται τεμάχια στερεής ύλης (solid blocks) από αυτό το μικρό-πορώδες υλικό (micro-porous material) , το οποίο μοιάζει με αλουμίνιο και είναι κατά 37% ελαφρύτερο. Αυτό το υλικό είναι εμπορικά γνωστό ως Metapor. Οδηγίες για την κατεργασία του εν λόγω υλικού μπορεί να αναζητήσει κανείς στην ιστοσελίδα <http://www.refractron.com/> και <http://www.cmtmaterials.com> . Συνήθως επιλέγονται ταχύτητες κοπής 3300ft/min και ταχύτητες πρόωσης 0.004 in/tooth.

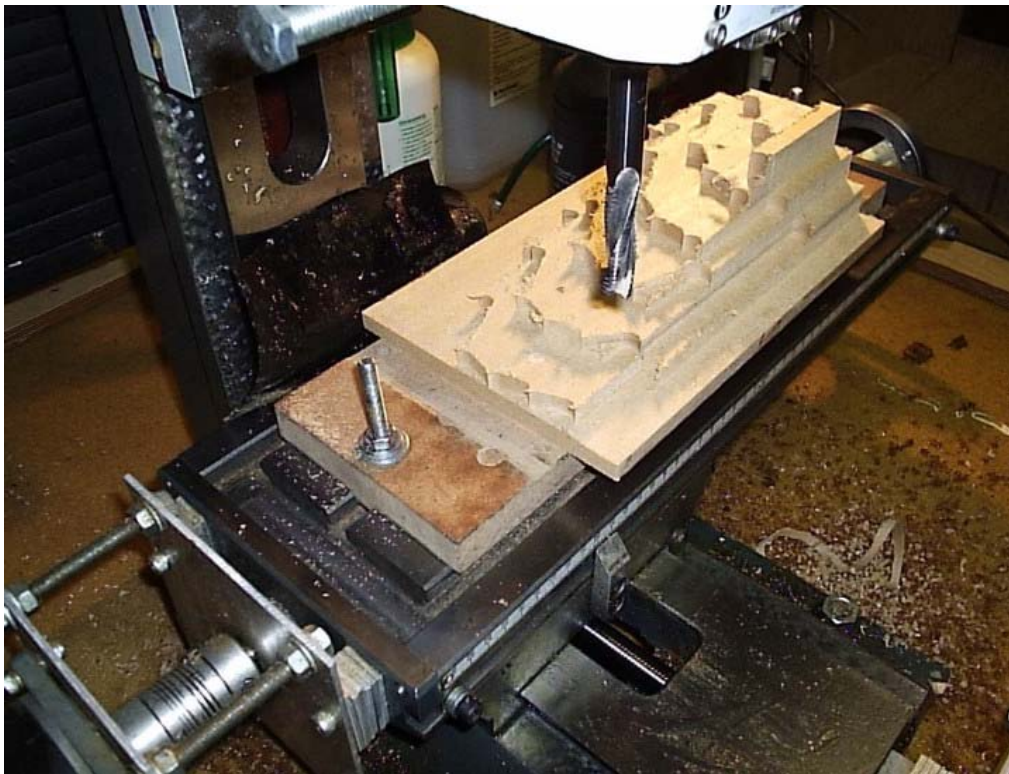


Σχήμα 4.24 Κατεργασία του υλικού Metapor

Κοκκώδη υλικά (Particle Boards) [4.17]

Τα υλικά μεσαίας πυκνότητας σε ίνες (Medium Density Fibre) , γνωστά ως **MDF** είναι σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από ίνες κελουλόζης (cellulose fibers) και συνθετική ρητίνη (synthetic resin) και κατάλληλη συνδετικά ύλη (suitable bonding systems) , τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με θέρμανση υπό πίεση. Διάφορα προσθετικά στοιχεία προστίθενται κατά την παραγωγή του MDF με σκοπό να βελτιωθούν κάποιες ιδιότητες του υλικού.

Πολλές εταιρείες βελτιστοποιούν αυτού του τύπου τα υλικά , μερικές από αυτές και χωρίς να γίνεται διάκριση όσο αφορά τη σειρά που αναφέρονται είναι οι Synergy Corporation , Global Wood , Georgia Pacific κτλ . Η επιφάνεια του MDF είναι επίπεδη και λεία (smooth) , ενιαία (uniform) , συμπαγής (dense) , χωρίς σβόλους (knots) και κόκκους (grain patterns) , κάτι το οποίο είναι ιδανικό για την αποπεράτωση (finishing) κατά το φρεζάρισμα. Η ομοιογένεια του MDF μας επιτρέπει να διεξάγουμε φρεζάρισμα υψηλής ακριβείας και ιδανικές τεχνικές αποπεράτωσης (finishing techniques) για υψηλής ποιότητας πρωτότυπα. Το απόβλητο που αποβάλλεται κατά την κατεργασία του MDF είναι αισθητά μειωμένο έναντι άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού. Η σταθερότητα/ευστάθεια (stability) και η αντοχή του MDF είναι μερικά ακόμη πλεονεκτήματα του MDF , κάτι το οποίο επιτρέπει καλύτερες συναρμογές/ανοχές όταν κατασκευάζονται λειτουργικά πρωτότυπα. Η καλή κατεργασιμότητα και το πολύ χαμηλό κόστος αυτού του υλικού είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως για κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού. Παρόλο αυτά ο χρόνος προετοιμασίας του υλικού , ώστε να υποστεί κατεργασία είναι σημαντικός, λόγω ότι πρέπει να διαποτιστεί με ένα κατάλληλο στρώμα από ειδικό υγρό (permeable layer) , εξαιτίας του γεγονότος ότι το MDF δεν είναι αρκετά πορώδες.



Σχήμα 4.25 Κατεργασία MDF

Αφρός άνθρακα (carbon foam) [4.17]

Το υλικό CFOAM είναι αφρός άνθρακα που παράγεται από την εταιρεία Touchstone Research Laboratory. Το υλικό CFOAM παράγεται κατά αποκλειστικότητα από γαιάνθρακα (coal) , ο οποίος είναι οικονομικός και άμεσα διαθέσιμος. Οι ιδιότητες του CFOAM μπορούν να τροποποιηθούν για διαφορετικές κάθε φορά απαιτήσεις (τροποποιείται η πυκνότητα , το μέγεθος και η συνοχή των κυψελών). Οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του υλικού είναι ευρείες. Το CFOAM μπορεί εύκολα να κοπεί , να φρεζαριστεί , να τριαντουθεί κτλ. Επειδή το CFOAM είναι πορώδες δεν απαιτείται να επικαλυφτεί με ειδικό υγρό (permeable layer). Παρόλο αυτά είναι σε μορφή σκόνης (powdery) και ψαθυρό (brittle) , ενώ η επιφάνεια του είναι τραχεία.



Σχήμα 4.26 Αφρός άνθρακα

Για περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα : <http://www.cfoam.com>

Κεραμικά γυαλιού (Glass Ceramics) [4.17]

Τα κεραμικά υλικά με κύριο συστατικό το γυαλί παράγονται μετά από προσεκτική θερμική κατεργασία του γυαλιού ώστε να προκληθεί κρυσταλοποίηση (crystallization). Τα κρυσταλλικά κεραμικά (glass ceramics) είναι πυκνά υλικά , στα οποία το 98% του όγκου τους είναι κρύσταλλοι , συνήθως διαμέτρου 1μm. Το υπόλοιπο του υλικού παραμένει στην κρυσταλλική φάση. Στο εμπόριο , το υλικό αυτό είναι γνωστό ως Macor και παρασκευάζεται από την εταιρεία Owens Corning και έχει τα εξής χρήσιμα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι ιδιαίτερος χρήσιμα στην ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού:

- Μπορεί να κατεργαστεί με κατάλληλα χαλύβδινα ή καρβιδίου κοπτικά εργαλεία για φρεζάρισμα υψηλών στροφών (HSS machining).
- Μπορεί να αποδώσει ανοχές έως και 0.005 in.
- Μπορεί να δώσει τραχύτητα επιφανείας μέχρι 20μm.
- Μπορεί να κολληθεί με ίδιου και άλλου τύπου υλικά καθώς επίσης να επιμεταλλωθεί εν κενώ (metalizing) , να συγκολληθεί (soldering) , sputtering και να χαλκοκολληθεί επίσης και με συγκολλητικά υλικά (adhesives) όπως είναι οι εποξειδικές ρητίνες (epoxies)



Σχήμα 4.27 Κατεργασία Glass Ceramics

Drill Size	Speeds and Feeds			
	Twist Drills		Diamond Core Drills	
	Spindle Speed	Feed Rate	Spindle Speed	Feed Rate*
6.5mm (1/4")	300 rpm	36mm/min (1.4"/min)	3500 rpm	14mm/min (.5"/min)
12.7mm (1/2")	250 rpm	45mm/min (1.7"/min)	3000 rpm	14mm/min (.5"/min)
19 mm (3/4")	200 rpm	50mm/min (2.0"/min)	2500 rpm	10mm/min (.4"/min)
25.4mm (1")	100 rpm	30mm/min (1.2"/min)	2000 rpm	8.5mm/min (.3"/min)
50.8mm (2")	50 rpm	19mm/min (.75"/min)	1200 rpm	6.5mm/min (.25"/min)

* Feed rates based on 1.4 Mpa (200 psi) coolant pressure through the center of the drill

Πίνακας 4.11 Προτεινόμενες τιμές για διάτρηση κρυσταλλικών κεραμικών

Για φρεζάρισμα προτείνονται ταχύτητες κοπής από 1-1.4m/min, τιμές πρόωσης 0.05mm/tooth (0.002"/tooth) και βάθη κοπής από 3-5 mm (0.125"-0.200"). Προτείνονται κονδύλια καρβιδίου C2 ή αντίστοιχα για αυξημένη διάρκεια ζωής, δίφτερα (two flute) ή τετράφτερα (four flute) , δεν προτείνονται γρεζοθραύστες (chipbreakers) και κοπτικά για roughing. Κοπτικά με τυποποιημένη γωνιά ελίκωσης είναι επίσης προτεινόμενα. Προτείνεται επίσης χρήση ψυκτικού υγρού για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και να απομακρύνονται τα απόβλητα. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να συμβουλευτεί την ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www accuratus.com/macorfab1.html>

Κατεργάσιμο κερί (machinable wax) [4.17]

Το κερί για κατεργασίες είναι σύνθεση ενός μείγματος από πετρέλαιο που προέρχεται από κερί υδρογονανθράκων , ρητίνη και πολυμερή , τα οποία κατηγοριοποιούνται ως μη επιβλαβή υλικά όταν γίνεται χρήση τους σε φυσιολογικές συνθήκες. Η εταιρεία Freeman Manufacturing και η εταιρεία Supply Company παρασκευάζουν κατεργαστό κερί (machinable wax). Το κερί κατεργάζεται ευκολότερα από το πλαστικό και τα μέταλλα, χωρίς μάλιστα να υπολείπεται στην ποιότητα επιφανείας των τελικών προϊόντων, στην επιφανειακή λεπτομέρεια και την διαστασιολογική ακρίβεια. Το κερί είναι ανακυκλώσιμο. Εν αντιθέσει με τις ρητίνες, το ξύλο και τα πλαστικά , τα υπολείμματα του κεριού μπορούν να υποστούν κατάλληλη κατεργασία και να επαναχρησιμοποιηθούν.

Είναι αυτό-λιπαινόμενο, επιτρέποντας έτσι να φρεζάρεται χωρίς να χρειάζονται ειδικά ψυκτικά ή ειδικά υγρά κοπής. Κομμάτια από κερί μπορούν να κολληθούν και να δημιουργήσουν άλλα μεγαλύτερα κομμάτια για επόμενες κατεργασίες. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το εν λόγω υλικό είναι πολύ μαλακό.



Σχήμα 4.28 Φρεζάρισμα κεριού

Machinable Wax Specifications

Hardness (Shore D)	50-55
Specific Gravity	0.92
Flash Point	575° F
Melting Point	226° F
Volumetric Shrinkage @ Room Temp.	7%
Coefficient of Thermal Expansion (in./in. °F)	9.5×10^{-5}
Color	blue

Machinable Wax Machining Guidelines

	Spindle Speed	Feed Rate
Roughing	3,000 rpm	100 inches per minute
Finishing	8,000 -10,000 rpm	40 -100 inches per minute

*Data obtained using a ½" ball end mill

How to Calculate Machinable Wax Weight

$$\frac{\text{Length} \times \text{Width} \times \text{Thickness (inches)}}{28.8} = \text{Weight (Lbs)}$$

Πίνακας 4.12 Προτεινόμενες τιμές για κατεργασία κεριού

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατεργασιμότητα των κεριών και άλλων υλικών μπορεί κανείς να αναζητήσει στην ιστοσελίδα:

<http://www.freemansupply.com>

Σανίδα Πολυουρεθάνης (Polyurethane Foam Board)

Ο αφρός πολυουρεθάνης FR-4500 της εταιρείας General Plastics είναι ένα σκληρό , υψηλής πυκνότητας προϊόν από Polyurethane που χρησιμοποιείται στην κατασκευή πρωτοτύπων μοντέλων και καλουπιών για χύτευση , για ιδιοσυσκευές συγκράτησης και στήριξης (tooling and fixtures) και για σύνθετες εφαρμογές όπου απαιτείται μια ενιαία , χωρίς κόκκους, διαστασιολογικά σταθερή κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Αυτό το οικονομικό υλικό είναι διαθέσιμο σε ένα μεγάλο εύρος από πυκνότητες και διαστάσεις. Ο αφρός FR-4500 δεν καταστρέφει τα κοπτικά εργαλεία για HSS , γεγονός που τον καθιστά ιδανικό υλικό για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού. Με κατάλληλους υπολογισμούς κατά την κατεργασία του FR-4500 παράγονται ιδανικής γεωμετρίας απόβλητα ,τα οποία με κατάλληλα αντιστατικά πρόσθετα (anti-static additives) μπορούν να καθαριστούν εύκολα και γρήγορα. Μια καλή δομή κελιών στο υλικό (cell-structure) επιτρέπει ένα εύκολο φινίρισμα σχεδόν με όλες τις μεθόδους επικάλυψης (coating system). Το υλικό FR-4500 μπορεί να συγκολληθεί (bond) με ένα μεγάλο εύρος από συγκολλητικές ουσίες (adhesive systems). Οι στρώσεις (sheets) του FR-4500 είναι διαστασιολογικά σταθερές , χωρίς warp ή κλίσεις. Οι πυκνότητα αυτού του υλικού από 50 lbs. per cubic foot , επιτρέπει στους πελάτες να επιλέγει το υλικό ανάλογα με τις απαιτήσεις του , ελέγχοντας παράλληλα το κόστος αγορά του. Η υψηλή του θερμική αγωγιμότητα (heat deflection temperature) το καθιστά ικανό για διαδικασίες μορφοποίησης εν κενώ όπου άλλα υλικά με βάση την urethane μπορεί να μαλακώσουν (soften) ή να παραμορφωθούν (deform).



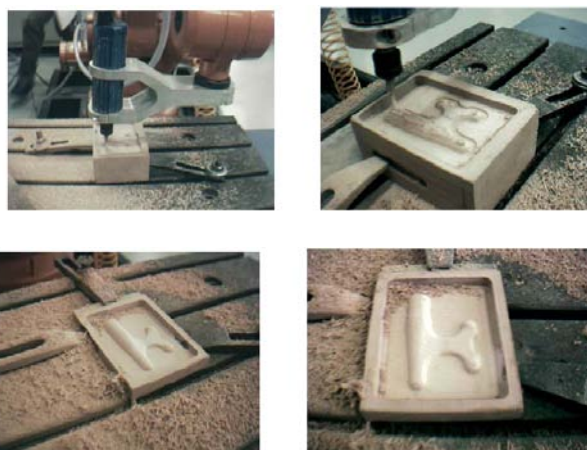
Σχήμα 4.29 Κατεργασία Polyurethane

	Roughing Speed (RPM)	Roughing Feed (IPM)	Finishing Speed (RPM)	Finishing Feed (IPM)
RenShape Modeling & Styling Boards				
RenShape 5020	2,500	200	15,000	200
RenShape 5025	2,500	200	15,000	200
RenShape 5030	2,500	200	15,000	200
RenShape 5045	2,500	100	15,000	200
RenShape 440	2,000	200	15,000	200
RenShape 5440	2,000	100	15,000	200
RenShape 450	2,000	100	15,000	200
RenShape 5460	2,000	100	15,000	200
RenShape 460	1,600	40	10,000	100
RenShape 5003 (Epoxy)	1,600	40	10,000	100
RenShape Tooling & High-Temperature Work Boards				
RenShape 470	1,600	40	10,000	100
RenShape 472	1,600	40	10,000	100
RenShape 473	1,600	40	10,000	100
RenShape 474	1,600	40	10,000	100
RenShape 550	1,600	40	10,000	100
RenShape 5166	1,600	40	10,000	100
RenShape 5169	1,600	70-140	10,000	100-200
RenShape 5179	1,500	60	10,000	100
RenShape 5008 (Epoxy)	1,600	40	10,000	100
RenShape 2000 (Epoxy)*	6-10,000	240+	15,000	300+

Πίνακας 4.13 Προτεινόμενες τιμές για κατεργασία Polyurethane

CIBA tool-Tool Express Tooling boards

Τα CIBA tool-Express παρασκευάζονται από την εταιρεία Ciba Specialty Chemicals Corporation. Με τα υλικά CIBA μπορούν να κατασκευαστούν καλούπια, με τα οποία μπορούν να παραχθούν εκατοντάδες διαστασιολογικά ακριβή τεμάχια με υψηλή ποιότητα επιφανείας από έγχυση πλαστικών όπως ABS, polypropylene και polycarbonate. Το πολυμερές υλικό CIBATOOL ενδείκνυται για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων λόγω ότι μετά την αποπεράτωση (φινίρισμα) αποδίδονται στα πρωτότυπα πολύ καλές τελικές επιφάνειες κατεργασίας. Αυτό δε συμβαίνει με τα αλουμίνια όπου απαιτείται μια χρονοβόρα διαδικασία για την λείανση/αποπεράτωση της επιφάνειας μετά το πέρας της κατεργασίας. Το πολυμερές αυτό υλικό ακόμη και ως μήτρα, μπορεί να αντέξει τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που απαιτούνται για να δεχτεί πολλά θερμοπλαστικά υλικά και να διαμορφώσει εκατοντάδες υψηλής ποιότητας κομμάτια όπου εμφανίζουν συναρμογές (tolerances) της τάξεως του 0.005in.



Σχήμα 4.30 Κατεργασία CIBA tool

Από καταλόγους του κατασκευαστή προτείνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για την κατεργασία CIBATOOL.

RECOMMENDED OPERATION PARAMETERS						
	ROUGH MACHINING			FINISHING		
Material	Speed (rpm)	Feed Rate (mpm)	Depth (mm)	Speed (rpm)	Feed Rate (mpm)	Depth (mm)
CIBATOOL	2000 - 2500	2,5 - 5	6,0 - 60,0	15000	1,0 - 5,0	< 3

Πίνακας 4.14 Προτεινόμενες τιμές για κατεργασία CIBATOOL [4.16]

Πολυαιθυλένιο (Polyethylene)

Το πολυαιθυλένιο είναι ανθεκτικό στη διάβρωση , είναι ένα υψηλής πυκνότητας υλικό , το οποίο εμφανίζει αντίσταση στο να διαποτιστεί με κάποιο υγρό (low moisture permeability). Πολλές εταιρείες κατασκευάζουν αυτό το υλικό. Μερικές από αυτές είναι οι San Diego Plastics και City Plastics. Δικαίως εμφανίζει χαμηλές θερμοκρασίες κατά την κατεργασία του (low working temperatures), μαλακή επιφάνεια (soft surface) και χαμηλές τιμές δυνάμεων τάνυσης (low tensile strength). Είναι ένα εξαιρετικό υλικό , του οποίου η ανθεκτικότητα του σε διάβρωση είναι ένας πολύ βασικός παράγοντας, αλλά η δυσκαμψία (stiffness) , οι υψηλές θερμοκρασίας και η αντοχή σε κόπωση (structural strength) δεν εμφανίζουν απαραίτητα υψηλό ενδιαφέρον. Μερικά άλλα χαρακτηριστικά του είναι το χαμηλό βάρος (lightweight), η δυνατότητα μορφοποίησης (formable) , η αντοχή σε κρούση (impact resistant) , εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες (electrical properties) , καλή κατεργασιμότητα (machinability) και συγκολλησιμότητα (weldable).



Σχήμα 4.31 Blocks/bars Πολυαιθυλενίου

Για περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα : <http://www.eurofoam.com>

Τέλος παρακάτω παρατίθεται ένας γενικότερος πίνακας που αναγράφει το κόστος και την κατεργασιμότητα διαφόρων υλικών όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού [4.17].

Item	Material	Cost per 144in ³	Additional Cost	Machinability
GP Industrial Board	Wood	\$0.58	High	Low
GP MDF	Wood	\$1.00	High	Low
Perfect Plank	Wood	\$7.45	Low	Medium
RenShape Tooling Board	Polyurethane	\$19.95	Low/High	High
Mass Cast Epoxy-RP8269	Epoxy (no filler)	\$69.70	Medium	High
	Epoxy-Filler 1:1	\$36.20		
Mass Cast PolyU-RP6470	Polyurethane (no filler)	\$94.70	Medium	High
	PolyU-Filler 1:2	\$40.65		
Paste Epoxy-RP8200	Epoxy	\$73.84	Medium	High
Combo-Wood/Epoxy	IB (75%) Epoxy (25%)	\$9.50	High	High

Πίνακας 4.15 Κόστος και κατεργασιμότητα διαφόρων υλικών για ΤΚΠ με αφαίρεση υλικού [4.17]

Όσο αφορά τη μηχανή Comagran MT Profi του εργαστηρίου ΤΚΠ του Ε.Μ.Π. , σύμφωνα με τον κατασκευαστή της μηχανής , η ισχύς της κυρίας ατράκτου (spindle) είναι ικανή να κατεργαστεί **ορείχαλκο , αλουμίνιο , μαλακούς χάλυβες , magnesium , acrylic και Plexiglas**. Κατά τον προγραμματισμό μιας κατεργασίας στο λογισμικό CAM , οι συνθήκες κοπής υπολογίζονται εκ των προτέρων (ταχύτητα κοπής , ταχύτητα πρόωσης των αξόνων XYZ , βάθος και πλάτος κοπής, στροφές της κυρίας ατράκτου) με γνώμονα την ισχύ της κυρίας ατράκτου (550Watt) και με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται αστοχίες του κινητήρα κυρίας ατράκτου (spindle) και των κοπτικών εργαλείων. Κατά την κατεργασία αλουμινίου και μαλακών χαλύβων απαιτείται **ψυκτικό υγρό** , λόγω ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες , οι οποίες είναι υπεύθυνες για αστοχία και φθορά των κοπτικών εργαλείων , καψάλισμα του υπό κατεργασία τεμαχίου και κατά συνέπεια χειρότερη ποιότητα επιφανείας του παραγόμενου τεμαχίου , καθώς επίσης την παραγωγή αποβλήτων με ασυνεχή μορφή , κάτι το οποίο επηρεάζει επίσης την ποιότητα επιφανείας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Ο κατασκευαστής της επιτραπέζιας φρέζας αριθμητικού ελέγχου Comagran MT Profi, προτείνει τις ακόλουθες παραμέτρους κοπής για τα διάφορα υλικά [4.18].

Material	RPM	Depth for one path	XY speed in mm/s
plastic layer	10 000 - 16 000	0 - 3 mm	5 - 15
brass	16 000 - 25 000	0 - 0,5 mm	1 - 4
acrylic	8 000 - 14 000	0 - 3 mm	1 - 8
aluminium	16 000	0 - 0,5 mm	1 - 4

Πίνακας 4.16 Προτεινόμενες παράμετροι κοπή για τη φρέζα Comagran Mt Profi του εργαστηρίου ΤΚΠ του Ε.Μ.Π

4.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [4.1] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας SecoTools (www.SecoTools.com)
- [4.2] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Dormer (www.DormerTools.com)
- [4.3] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Weldon (www.endmills.com)
- [4.4] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Sandvik (www.sandvik.com)
- [4.5] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Europa Tool (www.europatool.co.uk)
- [4.6] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Kennametal (www.kennametal.com)
- [4.7] Τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας Karnasch (www.Karnasch.de)
- [4.8] Γ. Βοσνιακός: Σημειώσεις Μαθήματος «Εργαλειομηχανές». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα 2008
- [4.9] Δ.Ε. Μανωλάκος: Σημειώσεις Μαθημάτων «Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία» και «Κατεργασίες ΙΙ» . Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [4.10] Hoffman Edward G.: “Jig and Fixture Design”. Cengage Learning, 2003 [8-20]
- [4.11] Herman W.Pollack: “Tool Design”. Prentice Hall, 2nd Edition [322-325]
- [4.12] V.Korsakov: “Fundamentals of Fixture Design”. Mir Publishers Moscow 1989 [12-17]
- [4.13] <http://www.cmtmaterials.com/metapor.htm>
- [4.14] <http://www.aegis-ceramics.co.uk/mma/mma.htm>
- [4.15] http://www.portec.ch/metapor_block.htm
- [4.16] Flávio José Lorini , Gustavo Pizarro Meneghello : “A Milling System with robot Resources” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, GPFAl, Porto Alegre- RS, Brasil.
- [4.17] Arvind Kuppusamy: “Development of framework for rapid tool manufacture for ridft process”. A Thesis submitted to the Department of Industrial Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. The Florida State University: College of Engineering. Fall Semester, 2003
- [4.18] Comagrav 3D CNC routing and engraving machine: PILOT CNC engraving/routing controller for Windows 2000/XP Operating manual 2004
- [4.19] Κατάλογος για “Standard Clamping Elements” 2008/7-8GB της εταιρείας AMF (clamping, screwing, guarantee)

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

5.1 Στόχοι της εργασίας

Έχοντας επισκοπήσει την επιστημονική και τεχνολογική περιοχή των κατεργασιών φρεζαρίσματος σε επιτραπέζια κλίμακα και των σχετικών εργαλειομηχανών, κοπτικών, υλικών και ιδιοσκευών, γίνεται εδώ αναλυτικότερα από ότι στην παράγραφο §1.2 αναφορά των αντικειμένων που απετέλεσαν στόχους της παρούσας εργασίας.

Κύριους στόχους λοιπόν αποτέλεσαν:

- Η εγκατάσταση και έναρξη πραγματικής λειτουργίας (πέραν της επίδειξης του προμηθευτή) της επιτραπέζιας φρέζας 3 αξόνων COMAGRAV MT Profi του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Εργαλείων (TKΠ & Ε) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.
- Η εκμάθηση λειτουργίας και χρήση του λογισμικού CAM δημιουργίας κώδικα κοπής εργαλειομηχανών CNC SOLIDCAM, εκπαιδευτική άδεια χρήσης του οποίου διαθέτει το Εργαστήριο TKΠ του ΕΜΠ, για την αξιοποίηση και κατασκευή με επιτραπέζιο φρεζάρισμα γεωμετρικών δεδομένων σε περιβάλλον CAD 3D SOLIDWORKS, άδειες χρήσης του οποίου διαθέτουν τόσο το Εργαστήριο TKΠ (2 θέσεις), όσο και η Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (60 θέσεις).
- Η διασύνδεση του λογισμικού SOLIDCAM με την εργαλειομηχανή CNC COMAGRAV MT Profi του Εργαστηρίου και η σύνταξη κατάλληλου μετά-επεξεργαστή προς τούτο.
- Η επιλογή, προμήθεια από το Εργαστήριο και οργάνωση-κατάταξη κατάλληλων βασικών εργαλείων κοπής-κονδυλίων και κώνων πρόσδεσης για χρήση και αξιοποίηση στη φρέζα COMAGRAV MT Profi του Εργαστηρίου.
- Η επιλογή, προμήθεια και έναρξη κοπών σε κατάλληλα πολυμερή υλικά πρωτοτυποποίησης, σε μορφή σανίδα.
- Η δημιουργία και κοπή στη μηχανή του Εργαστηρίου δοκιμίων, για την καταρχήν διαπίστωση και αποτίμηση των επιδόσεων, της αποδιδόμενης ακρίβειας και της ποιότητας επιφάνειας, κατεργασμένων αντικειμένων από πολυμερή υλικά πρωτοτυποποίησης, Επιμέρους επιδιώχθηκε έλεγχος σε τρεις κατευθύνσεις:
 - Επιδόσεις στο επίπεδο των αξόνων X-Y της τράπεζας
 - Επιδόσεις και στους τρεις άξονες (X-Y-Z)
 - Διαπίστωση αποκλίσεων σε ελεύθερης γεωμετρίας αντικείμενα.
 -
- Αποτίμηση και εξαγωγή συμπερασμάτων για τις επιδόσεις της μηχανής CNC του εργαστηρίου σε επίπεδο χρόνου-κόστους.

- Σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων επιδόσεων-ακρίβειας-ποιότητας επιφανειών-χρόνου-κόστους με αντίστοιχα αποτελέσματα προηγηθείσας έρευνας που αφορούν τον υφιστάμενο εξοπλισμό ΤΚΠ του Εργαστηρίου με εναπόθεση υλικού (LOM 1015) και εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Απόπειρα κατασκευής πλήρους πρωτοτύπου αντικειμένου τριών διαστάσεων με τον εν λόγω εξοπλισμό και καταγραφή αποτελεσμάτων, δυσκολιών και συμπερασμάτων.
- Εξαγωγή γενικότερων ποιοτικών συμπερασμάτων και βέλτιστων πρακτικών χρήσης για την επιτραπέζια CNC φρέζα του εργαστηρίου και τις ιδιοσυσκευές της. Επιλογή κατάλληλων ιδιοσυσκευών και διατάξεων για προμήθεια στο μέλλον από το Εργαστήριο.

Επίσης δευτερευόντως επιδιώχθηκαν και οι παρακάτω στόχοι:

- Επίλυση μικροπροβλημάτων λειτουργίας της μηχανής σε συνεννόηση με τον προμηθευτή και την κατασκευάστρια εταιρία.
- Αναζήτηση και συγκέντρωση επιπλέον πληροφοριών για τα κύρια δομικά της μέρη και εξαρτήματα
- Συμπλήρωση των οδηγιών συντήρησης του κατασκευαστή και επιλογή κατάλληλων σχετικών αναλωσίμων υλικών λίπανσης, καθαρισμού και συντήρησής της.
- Εντοπισμός σημείων για περεταίρω διερεύνηση της περιοχής της εργασίας και του υφιστάμενου εξοπλισμού.
- Ένταξη του εξοπλισμού COMAGRAV MT-Profi σε όλες τις δραστηριότητες του Εργαστηρίου ΤΚΠ (Εκπαίδευση, έρευνα, παροχή υπηρεσιών).

5.2 Εγκατεστημένος Εξοπλισμός ΤΚΠ Εργαστηρίου ΤΚΠ ΕΜΠ

Το Εργαστήριο ΤΚΠ — ΤΚΕ ανήκει στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η δημιουργία του ξεκίνησε το 1996 στα πλαίσια προγράμματος του ΕΠΕΤ II της ΓΓΕΤ, με κύριο αντικείμενο τη δημιουργία σε ελληνικό περιβάλλον εργαστηρίων για Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων & Εργαλείων Παραγωγής.

Από το έτος 2001 αποτελεί θεσμοθετημένο εργαστήριο του Ε.Μ.Π. (ΦΕΚ Αρ.66 / 6 Απρ2001, Τεύχος 1ο), ενώ από το Μάρτιο 2008 είναι πιστοποιημένο για τις δραστηριότητές του (κυρίως όσον αφορά την παροχή υπηρεσιών προς τη βιομηχανία) κατά ISO 9001:2000.

Στα πλαίσια της δραστηριότητας κατασκευής πρωτοτύπων είναι από το τέλος του 1996 εξοπλισμένο με Διάταξη Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων με εναπόθεση στερεών φύλλων υλικού (Laminated Object Manufacturing) του οίκου Helisys, μοντέλο LOM 1015 (Σχήμα 5.1) με τεχνικά χαρακτηριστικά που παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 5.1 Η Helisys-LOM1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ Ε.Μ.Π.

Helisys LOM-1015	
Μέγιστο Κατασκευαζόμενο Αντικείμενο	370x240x340mm Μήκ*Πλ*Υψ
Ταχύτητα Κατασκευής	1,5 έως 12 mm/hour
Αποδιόδομη ακρίβεια	Dim ± 0,3mm
Χρησιμοποιούμενο Laser	CO ₂ , Ισχύος 25 Watt
Διάμετρος ακτίνας Laser	0,254 -0,381 mm
Οδήγηση ίχνους ακτίνας Laser	XY-Plotter με βηματικούς κινήρες
Χρησιμοποιούμενα Υλικά	Χαρτί (LPS,LPH), πλαστικό (LXP), (κεραμικά)
Μορφή πρώτης ύλης	Φύλλο σε Ρολό
Μέθοδος συνένωσης	Θερμοκόλληση με κυλιόμενο κύλινδρο
Πάχος πρώτης ύλης	Συνήθως 0,1mm (Υπάρχουν από 0,051 έως 0,381 mm)
Αρχεία που δέχεται	STL
Χρησιμοποιούμενο Λογισμικό	LOMSlice
Λειτουργικό Σύστημα	Windows NT 3.51
Διαστάσεις Μηχανής	Μήκ*Πλ*Υψ : 1,25 x 1,0 x 1,30m
Απαιτήσεις Ηλεκτρικής Παροχής	220V, 60Hz, 20A
Απαιτούμενος Απορροφητήρας	800m ³ /h

Πίνακας 5.1 Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά LOM 1015

Για τη διάταξη LOM 1015 έχει συντελεσθεί έως σήμερα εκτενής έρευνα εντός και εκτός Εργαστηρίου ΤΚΠ ΕΜΠ, στο δε Εργαστήριο ΤΚΠ ΕΜΠ έχουν υλοποιηθεί πάρα πολλές σχετικές εφαρμογές, από τις οποίες έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία και τεχνογνωσία.

Το 2007 ο παραπάνω εξοπλισμός για Ταχεία Κατασκευή πρωτοτύπων συμπληρώθηκε με την CNC εργαλειομηχανή COMAGRAV MT-PRofi, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο, με στόχο τη συμπλήρωση της δραστηριότητας του Εργαστηρίου ΤΚΠ και με ΤΚΠ αφαίρεσης υλικού. Η εν λόγω μηχανή και η χρήση της αποτελούν και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε άμεση σχέση και διασύνδεση με τις παραπάνω δραστηριότητες και εξοπλισμό ΤΚΠ και την υποστήριξή τους, στο Εργαστήριο είναι ακόμα εγκατεστημένα και σε χρήση, λογισμικά CAD, CAM, CAE, PLM και αξιόλογος μετρητικός εξοπλισμός CMM επαφής και εξ' αποστάσεως (contact & non-contact CMMs, DEA Mistral & Faro Arm), μέσω των οποίων υποστηρίχθηκε σημαντικά και η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

5.3 Επιτραπέζια CNC φρέζα 3 αξόνων Comagrav Mt Profi

5.3.1 Hardware

Το Εργαστήριο ΤΚΠ του ΕΜΠ συμπληρώνει τον εξοπλισμό του για Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού με τη μηχανή COMAGRAV MT-Profi. Η εν λόγω μηχανή είναι επιτραπέζια CNC φρέζα 3 αξόνων, κατασκευής του Τσέχικου οίκου COMAGRAV, που εκτός από μικρής κλίμακας εργαλειομηχανές, επίσης παράγει και διαθέτει μηχανές επιγραφοποιίας, routers και άλλα παρόμοια συστήματα για την εξυπηρέτηση των μικρομεσαίων κυρίως επαγγελματιών και παραγωγικών φορέων.

Είναι μια σχετικά χαμηλού κόστους λύση (<10.000 €), με απλά μηχανικά και ηλεκτρονικά μέρη και υποσυστήματα, που όμως με την κατάλληλη αξιοποίηση μπορεί να αποκτήσει ενδιαφέρουσες δυνατότητες και προοπτικές, ειδικά όσον αφορά την κατασκευή πρωτοτύπων.



Σχήμα 5.2 Η επιτραπέζια φρέζα CNC Comagrav Mt Profi

Τεχνικά χαρακτηριστικά της Comagrav Mt Profi

Η επιτραπέζια φρέζα Comagrav 3D engraving plotter , type MT έχει συνολικές διαστάσεις 700x680x700 mm και βάρος μικρότερο από 50kg, γεγονός που την καθιστά ικανή να τοποθετηθεί ακόμα και σε ένα απλό τραπέζι. Βέβαια είναι καλύτερα να τοποθετείται και χρησιμοποιείται σε μικρών διαστάσεων τραπέζι βαρέως τύπου με απουσία κραδασμών, όπως στο Εργαστήριο ΤΚΠ του ΕΜΠ.

Ο χώρος εργασίας της μηχανής είναι 320x215x95mm , ικανοποιητικός για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων αρκετών αντικειμένων και εργαλείων (καλούπια, μήτρες κτλ).

Ως CNC σύστημα κατατάσσεται στα συστήματα με έλεγχο κίνησης ανοικτού βρόγχου. Οι βηματικοί κινητήρες που κινούν τους άξονες X-Y-Z της μηχανής, είναι τα μοντέλα SL23-0704 της εταιρείας Microcon με χαρακτηριστικές καμπύλες ταχύτητας/ροπής στρέψης που δίνονται στο **Παράρτημα Α**. Πρόκειται για 2Φ brushless σύγχρονους ηλεκτροκινητήρες με micro step resolution 0.0035mm και γωνία βήματος 1.8° (= η γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων ενός βηματικού κινητήρα). Η μέγιστη πρόωση κοπής της μηχανής είναι σε 25mm/sec, ενώ η μέγιστη ταχεία πρόωση (μετάβασης) 30mm/sec.

Όσον αφορά την κύρια άτρακτο της μηχανής, αυτή κινείται με ασύγχρονο 3-φασικό brushless κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος, με ρύθμιση στροφών αναστροφήα συχνότητας (inverter). Είναι τύπου TEKNOMOTOR μοντέλο C31/40-B-DBS-P-ER20 (0.55Kw at 18000rpm, max 24000rpm, 300-400Hz 220/380V). Με τη χρήση αυτού του κινητήρα οι μέγιστες στροφές της κυρίας ατράκτου φθάνουν τις 24000 RPM και πάνω στην άτρακτο μπορούν να προσδεθούν κώνοι έως ER-20.

Η κίνηση στους άξονες μεταδίδεται με ζεύγη κοχλία κίνησης – περικοχλίου τριβής (leadscrew-nut). Στην τράπεζα της μηχανής μπορούν να προσδεθούν T-clamps, για τη συγκράτηση των υπό κατεργασία τεμαχίων. Επιπλέον μαζί με τη μηχανή παρέχεται και αισθητήρας για τον αυτόματο προσδιορισμό του ύψους Z της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου (Z sensor).

Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής παρατίθενται αναλυτικά στο **Παράρτημα Β**. Για τον δε κινητήρα κύριας ατράκτου (spindle) με τον οποίο είναι εφοδιασμένη η μηχανή του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ και είναι αναβαθμισμένων επιδόσεων από αυτόν του βασικού μοντέλου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία TEKNOMOTOR και επισυνάπτονται στο **Παράρτημα Γ**.

Η εταιρεία Comagran, κυκλοφόρησε πρόσφατα στην αγορά αναβαθμισμένα μοντέλα της σειράς MT Profi, με δυνατότητες μεγαλύτερου χώρου εργασίας 640 x 420 x 95 mm και ballscrews για την κίνηση όλων των αξόνων.

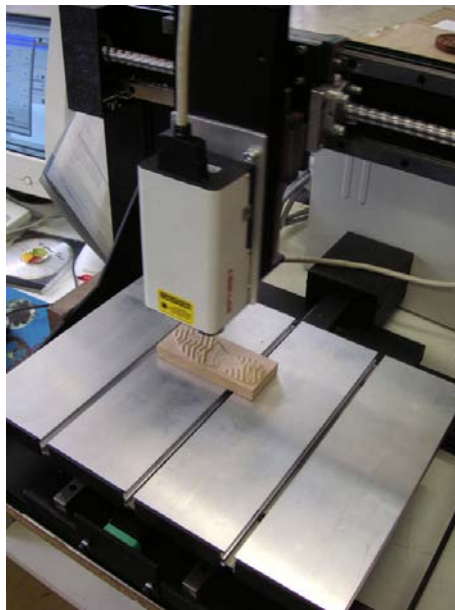
Η εταιρεία Comagran, για την καλύτερη συμπλήρωση δυνατοτήτων των συστημάτων MT-Profi διαθέτει και κάποια υποσυστήματα και παρελκόμενα, όπως:

- Διαιρέτη για υποκατάσταση του Y άξονα με περιστροφική κίνηση.
- Σύστημα Ψύξης μέσω εξαχνωμένου μείγματος δια πεπιεσμένου αέρα (Mist Cooling). Για παραπάνω πληροφορίες στο **Παράρτημα Η**.
- Σύστημα συλλογής αποβλήτων κοπής (Dust Collector).
- Κεφαλή laser για scanning επίπεδων ανάγλυφων αντικειμένων και μορφών (χρήση της μηχανής ως flatbed CMM)

Πολλά από αυτά (διαιρέτη, dust collector, mist cooling) έχει ήδη προμηθευτεί το Εργαστήριο ΤΚΠ.



Σχήμα 5.3 Κοπή με mist cooling σε μηχανή router της εταιρείας Comagrav



Σχήμα 5.4 Χρήση μιας μηχανής Mt Profi για laser scanning αντικειμένων



Σχήμα 5.5 Το νέο μοντέλο της Comagrav Mt Profi XL (640 x 420 x 95 mm)



Σχήμα 5.6 Κοπή ακρυλικού (acrylic) με μια μηχανή Comagrav Mt Profi

5.3.2 Το λογισμικό ελέγχου Pilot (Software)

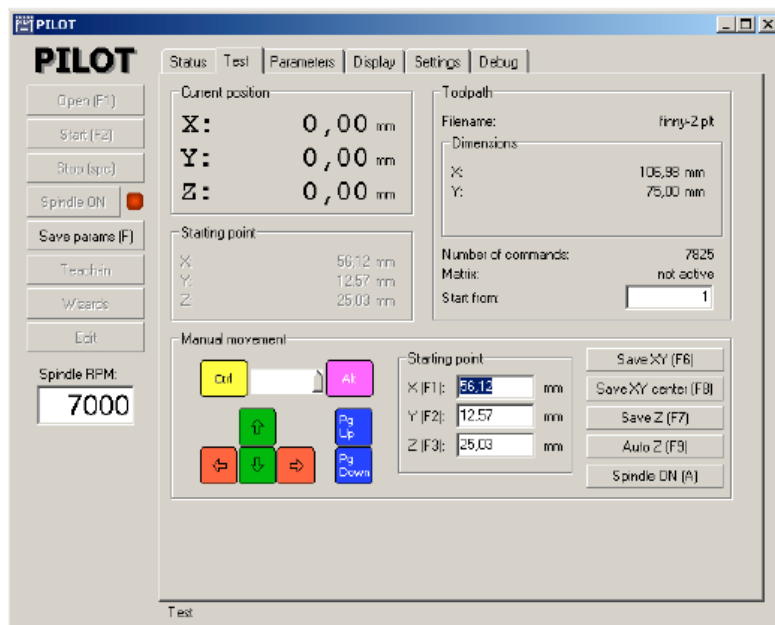
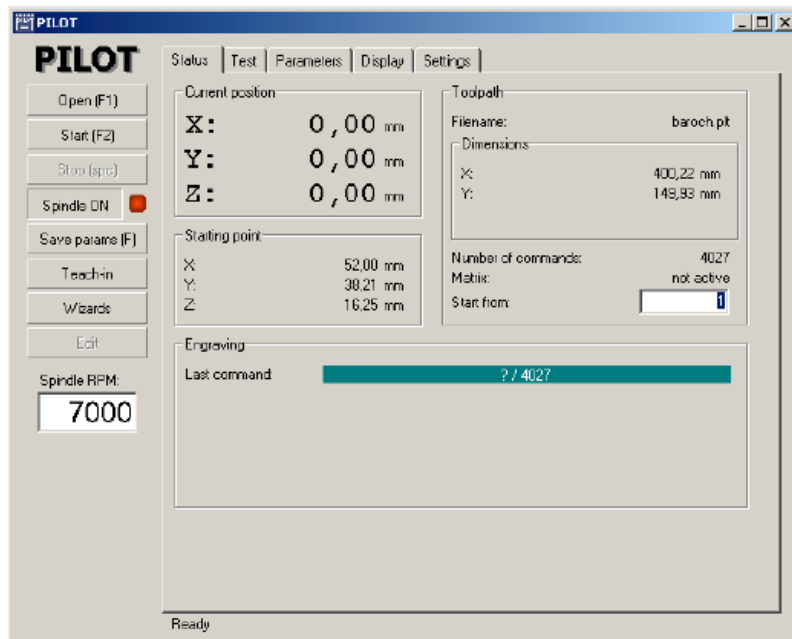
Το λογισμικό Pilot είναι το βασικό λειτουργικό λογισμικό της εταιρίας COMAGRAV δια του οποίου γίνεται στις εργαλειομηχανές της:

- α) ο έλεγχος του controller της εκάστοτε μηχανής (Εδώ του MT – Profi)
- β) η διαχείριση του τελικού προγράμματος κοπής και
- γ) η μη αυτοματοποιημένη (από το χειριστή) έναρξη – παύση και τροφοδότηση τιμών σε βασικές και απαραίτητες για την κοπή λειτουργίες και παραμέτρους.

Το λογισμικό είναι κοινό για πολλές εργαλειομηχανές της εταιρίας (milling machines, engravers, routers) και πολλές φορές απαιτείται παραμετροποίηση του για χρήση σε συγκεκριμένη μηχανή. Διαθέτει δε και γραφικό περιβάλλον, βασισμένο σε καρτέλες (tabs). Σε κάθε βασική καρτέλα ο χρήστης επιτελεί επιμέρους κύριες λειτουργίες (π.χ. Αρχικές Τιμές, Διαχείριση-εκτέλεση κώδικα κοπής, γραφική απεικόνιση, ρυθμίσεις)

Μέσω του Pilot επιτελούνται οι παρακάτω κύριες λειτουργίες:

- Έναρξη – παύση και αυξομείωση στροφών της κυρίας ατράκτου.
- Τοποθέτηση του σύστημα αναφοράς στο υπό κατεργασία τεμάχιο.
- Ορισμός του ύψους (Z) της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου
- Ορισμός των ταχυτήτων πρόωσης στους άξονες XYZ.
- Εκτέλεση του προγράμματος κοπής.



Σχήμα 5.7 Μέρος από το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Pilot.

Περισσότερες πληροφορίες για το PILOT ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει από την κατασκευάστρια εταιρία ή στο του τεχνικό εγχειρίδιο [4.18].

5.4 Το λογισμικό 3D CAD SolidWorks

Για την δημιουργία και επεξεργασία μοντέλων αντικειμένων σε περιβάλλον CAD 3D της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **SolidWorks, έκδοση 2009**, πλήρη εκπαιδευτική άδεια του οποίου για δύο θέσεις διαθέτει το Εργαστήριο ΤΚΠ.

Γενικές πληροφορίες και βασικά χαρακτηριστικά

Το SolidWorks είναι ένα πλήρες 3D μηχανολογικό εργαλείο για σχεδιασμό προϊόντων, προσφέροντας στη σχεδιαστική ομάδα όλα τα απαραίτητα εργαλεία για μηχανολογικό σχεδιασμό, επικύρωση, προσομοίωση κίνησης μηχανισμών, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (αντοχής και ροής), φωτορεαλισμό, διαχείριση δεδομένων από ομάδες και τα πολλά εργαλεία επικοινωνίας. Εξάγει τα γεωμετρικά δεδομένα σε πληθώρα ουδέτερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (IGES, STEP, PARASOLID, VRML, STL κ.α.), δίνοντας τη δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία τους και με άλλα λογισμικά εργαλεία, ή ακόμα και κατασκευής τους σε διατάξεις ΤΚΠ.

Με το SolidWorks όλα τα σχεδιαστικά δεδομένα του υπό σχεδίαση αντικειμένου ή μηχανολογικού συνόλου είναι 100% παραμετρικά, επεξεργάσιμα και τροποποιήσιμα, η δε διασύνδεση ανάμεσα στα 3D μοντέλα (parts) , συναρμολογήματα (assemblies) και 2D σχέδια (drawings) που τα απαρτίζουν είναι πάντα άμεση και ανταποκρίνεται σε κάθε αλλαγή που γίνεται. Επίσης, η διασύνδεση με λογισμικά εργαλεία τρίτων εταιριών λογισμικού (π.χ. CAE, CAM, Flow), είναι δυνατή και άμεση μέσα από το ίδιο το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης (GUI) του ίδιου του προγράμματος.

Με το SolidWorks μειώνονται τα βήματα σχεδιασμού και οι περιττές κινήσεις μέσα από μία πληθώρα καινοτόμων εργαλείων «εξοικονόμησης χρόνου». Η αναζήτηση παλιότερων σχεδίων είναι πολύ εύκολη και η επαναχρησιμοποίηση τμημάτων των σχεδίων αυτών μας επιτρέπει να σχεδιάζουμε πιο αποδοτικά.

Με το SolidWorks μπορούν να αυτοματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες σχεδιαστικές διαδικασίες και να δημιουργηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί πολλών παραμέτρων.

Το περιβάλλον SolidWorks παρέχει συνοπτικά και κωδικοποιημένα τις εξής δυνατότητες :

- Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων (2D drawings).
- Συμφωνία με τα πρότυπα και την υπάρχουσα τυποποίηση μηχανολογικού σχεδιασμού (DIN , ISO κλπ).
- Αυτόματες λίστες υλικών (BOM) με τα χαρακτηριστικά τους.
- Αμφίδρομη συμβατότητα και ενημέρωση με το αντίστοιχο 3D συναρμολόγημα.
- Πλήρη και αυτόματη διαστασιολόγηση.

- Σύγκριση μοντέλων και κατασκευαστικών σχεδίων.
- Δυνατότητα κίνησης σε 2D σκαριφήματα (sketch blocks) και εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας ενός μηχανισμού, πριν η σχεδίαση προχωρήσει στον τρισδιάστατο σχεδιασμό.
- Συνδυασμός ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών από διαφορετικά SolidWorks αρχεία και διατήρηση των «παλιών» ρυθμίσεων κατά τη δημιουργία νέων αντικειμένων.
- Γρήγορη δημιουργία συναρμολογημάτων με τη χρήση έξυπνων κανόνων συναρμογών και γειτνίασης (smart mates). Με κάθε αλλαγή ενός εξαρτήματος στο συναρμολόγημα (assembly), τα υπόλοιπα εξαρτήματα προσαρμόζονται αυτόματα στις νέες διαστάσεις των εξαρτημάτων.
- Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στερεών σωμάτων με μοναδικές δυνατότητες φυσικών συνθηκών (π.χ επίδραση βαρύτητας). Προσομοίωση κινήσεων ιμάντων, αλυσίδων και οδοντωτών τροχών.

Εξειδικευμένα εργαλεία και χαρακτηριστικά στο SolidWorks

Με το SolidWorks μπορούν να αποτυπωθεί και να τροποποιηθεί μια αρχική ιδέα με τις προχωρημένες δυνατότητες 3D sketching (3D σκαρίφημα). Με την εντολή Freeform (ελεύθερη διαχείριση επιφανειών), μπορούν να δημιουργηθούν πολύπλοκες επιφάνειες σύροντας προκαθορισμένα σημεία τους στο χώρο, κατασκευάζοντας καθ' αυτό τον τρόπο αντικείμενα ανώτερης αισθητικής ποιότητας και μηχανολογικής ακρίβειας.

Το SolidWorks προσφέρει επίσης την τεχνολογία SWIFT, η οποία απλοποιεί το σχεδιασμό με προχωρημένες τεχνικές σχεδιασμού. Για παράδειγμα, η εντολή Instant 3D, επιτρέπει την αλλαγή διαστάσεων σε πραγματικό χρόνο επιλέγοντας και σύροντας επιφάνειες του μοντέλου. Επίσης μας παρέχει ενσωματωμένα εργαλεία συγκολλήσεων και μεταλλικών κατασκευών, ενσωματωμένα εργαλεία σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (sheet metal) και δημιουργία αναπτυγμάτων με ένα κλικ. Επιπλέον ενσωματώνει εργαλεία για σχεδίαση καλουπιών με πολύπλοκες επιφάνειες. Τα εργαλεία αυτά αυτοματοποιούν τη δημιουργία μητρών καλουπιού με βάση τη γεωμετρία του τελικού προϊόντος.

Το SolidWorks ενσωματώνει το λογισμικό COSMOSWorks για ανάλυση κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία. Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει εργαλεία για στατική & δυναμική ανάλυση, υπολογισμό θερμικών καταπονήσεων, ανάλυση κραδασμών, βελτιστοποίηση κατασκευών, υπολογισμό αντοχής κατασκευών σε κόπωση κτλ.

Για δυναμική/κινηματική ανάλυση και ρευστομηχανικά προβλήματα προσφέρονται τα ακόλουθα λογισμικά :

COSMOSMotion: Προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων στα κινητά μέρη ενός μηχανισμού και υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Σε συνδυασμό με το COSMOSWorks μας προσφέρεται ένα ολοκληρωμένο πακέτο για ανάλυση κατασκευών.

COSMOSFlowWorks: Είναι ένα πλήρως ενσωματωμένο λογισμικό για ρευστομηχανική και θερμική ανάλυση. Υποστηρίζει μια μεγάλη γκάμα ρευστών (Νευτώνεια και μη) τόσο για εξωτερικές όσο και για εσωτερικές ροές.

Το SolidWorks παρέχει επίσης τα εξής εργαλεία για μεγαλύτερη παραγωγικότητα:

- **SolidWorks Routing:** Εξειδικευμένα εργαλεία και βιβλιοθήκες για το σχεδιασμό καλωδιώσεων & σωληνώσεων με έξυπνο τρόπο.
- **Toolbox:** Βιβλιοθήκες κατά ANSI, BSI, CISC, DIN, ISO, JIS, GB, όπου περιλαμβάνουν τυποποιημένα εξαρτήματα συναρμογών (π.χ. ρουλεμάν, κοχλίες, περικόχλια, ροδέλες, κτλ.), εξαρτήματα μετάδοσης ισχύος (οδοντωτούς τροχούς, μάντες, αλυσίδες, έγκεντρα) και διατομές δοκών.
- **TolAnalyst:** Εργαλεία για εμπειριστατωμένο υπολογισμό ανοχών ολόκληρων μηχανισμών.
- **DriveWorks:** Εύχρηστο εργαλείο για αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων σχεδιαστικών εργασιών.
- **CircuitWorks:** Για αποτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (PCB).Πλήρης ενσωμάτωση ηλεκτρονικού και μηχανολογικού σχεδίου, καθώς και εξαγωγή καταλόγου υλικών.
- **DFMXpress:** Για τον έλεγχο εάν το προ-κατεργασία εξάρτημα κατασκευάζεται εύκολα κατά συνέπεια οικονομικά με βάση τις παραμέτρους όπου εμείς ορίζουμε.
- **PhotoWorks:** Δημιουργία εντυπωσιακών φωτορεαλιστικών απεικονίσεων.
- **FeatureWorks:** Αναγνώριση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (features) κατά την εισαγωγή αρχείων από άλλα CAD συστήματα, μειώνοντας καθεαυτό τον τρόπο το χρόνο επαναδημιουργίας παραμετρικών μοντέλων.
- **Design Checker:** Για έλεγχο συμβατότητας των σχεδίων με τα πρότυπα σχεδιασμού όπου εμείς ορίζουμε.

- **3D Instant Website:** Για τη δημοσίευση σχεδίων στο διαδίκτυο και τη γνωστοποίησή τους σε συνεργάτες και προμηθευτές.
- **3D Content Central:** Δυνατότητα λήψης μοντέλων (parts) και συναρμολογημάτων (assemblies) από τη μεγαλύτερη δικτυακή/εικονική βιβλιοθήκη εξαρτημάτων παγκοσμίως.

Το SolidWorks περιλαμβάνει επίσης το προϊόν 3Dvia Product Doc , το οποίο αυτοματοποιεί εύκολα και γρήγορα τη δημιουργία εγγράφων για οδηγίες χρήσης προϊόντων. Ενδεικτικά μπορεί κανείς να δημιουργήσει οδηγίες συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης, τεχνικές λεπτομέρειες σε συνδυασμό με 3D απεικονίσεις – animations , εκπαιδευτικό υλικό, παρουσιάσεις για marketing, τις πωλήσεις κτλ. Κατ' αυτό τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος και χρήμα ενώ παράλληλα βελτιώνονται οι τεχνικές πληροφορίες που δίνονται στον πελάτη. Το 3Dvia Composer διαβάζει αρχεία SolidWorks, CATIA, Pro-E κ.α.

Το SolidWorks παρέχει στο χρήστη τα λογισμικά της σειράς SolidWorks DWGseries, τα οποία δημιουργήθηκαν με σκοπό χρήστες του AutoCAD να ανοίγουν, να επεξεργάζονται, να δημιουργούν και να μοιράζονται DWG/DXF με το Solidworks δεδομένα με αποτελεσματικότητα χωρίς να απαιτείται αναβάθμιση του AutoCAD. Η σειρά DWGseries προσφέρεται δωρεάν και περιλαμβάνει τα ακόλουθα λογισμικά:

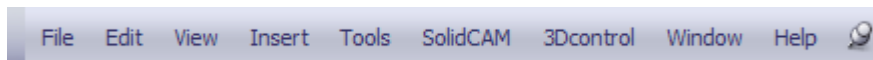
- **DWGgateway:** Επιτρέπει να ανοίγονται DWG σχέδια από την έκδοση AutoCAD v.14 και να αποθηκεύονται έως την πιο πρόσφατη.
- **DGWviewer και SolidWorks eDrawings:** Για να ανοίγονται και να παρουσιάζονται DWG/DXF αρχεία.
- **DWGeditor:** Δυνατότητα επεξεργασίας και δημιουργίας αρχείων DWG και DXF.
- **Μετάβαση από το 2D στο 3D CAD, γρήγορα και εύκολα:** Για τη δημιουργία 3D μοντέλων στο SolidWorks από 2D σχέδια του AutoCAD.

Το SolidWorks τέλος παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης τεχνικών δεδομένων εν ονόματι SolidWorks Product Data Management Software ή PDMWorks. Πρόκειται για λογισμικό τύπου PDM με το οποίο καθ' όλη τη φάση ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου προϊόντος οργανώνονται τεχνικά δεδομένα, με τη δημιουργία ροών εργασίας για αυτόματη ηλεκτρονική διακίνηση δεδομένων και την γνωστοποίηση τεχνογνωσίας εντός μιας επιχείρησης. Το PDMWorks εμπεριέχει ένα ηλεκτρονικό «θησαυροφυλάκιο» με την επωνυμία VAULT , το οποίο κατοχυρώνει την ασφάλεια των δεδομένων μιας επιχείρησης.

Σύντομη περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του Solidworks 2009

Στο γραφικό περιβάλλον του SolidWorks 2009, το βασικό μενού περιλαμβάνει στη γνωστή από τα Windows οριζόντια δομή τα παρακάτω μενού:

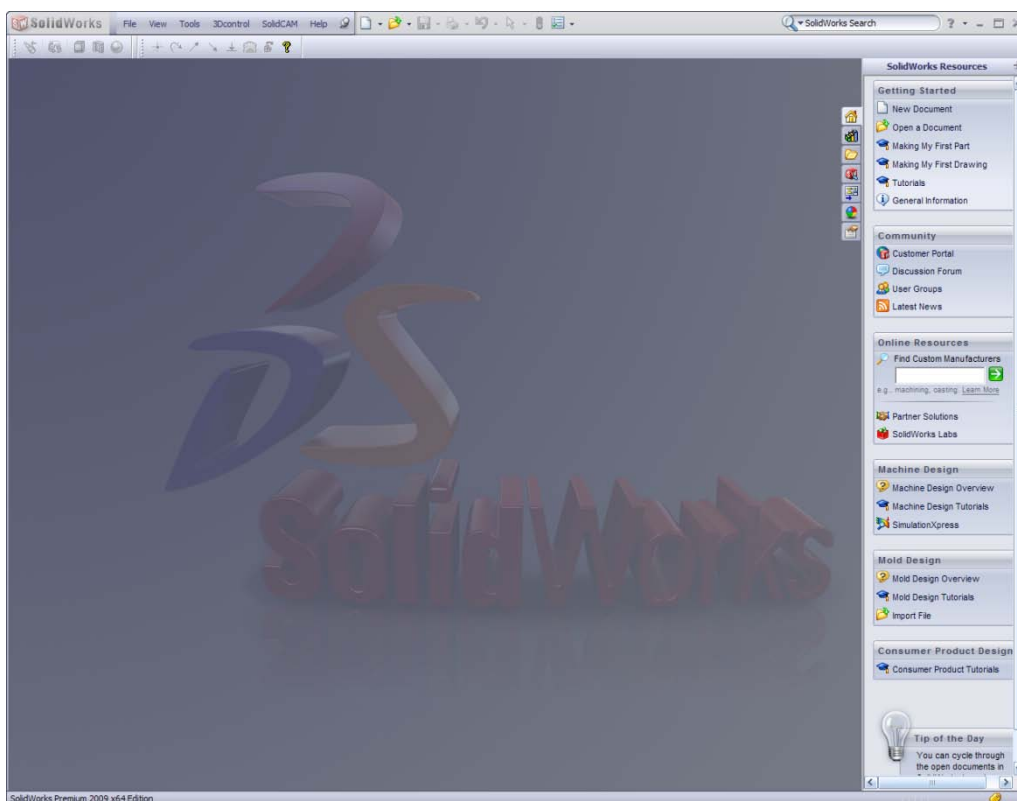
- File
- Edit
- View
- Insert
- Tools



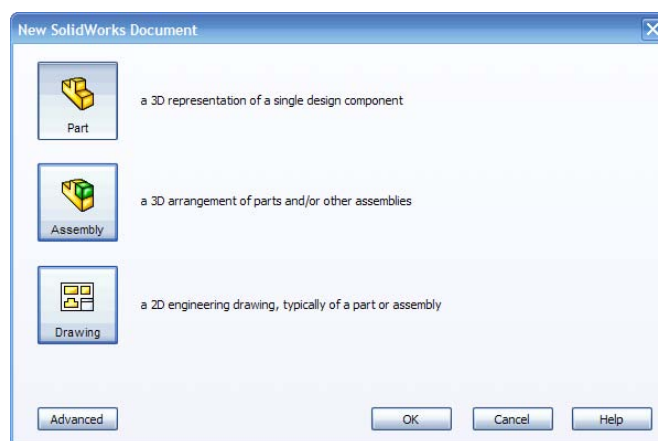
Σχήμα 5.8 Βασικό μενού του SolidWorks έκδοσης 2009 SP3.0

Αναλόγως του τι θέλουμε να δημιουργήσουμε, από τη μπάρα εργασίας μπορούμε να επιλέξουμε File > New > Part , Assembly ή Drawing.

Αν ήδη δουλεύουμε ένα «ανοικτό» αρχείο, μπορούμε από τα υπόλοιπα μενού ή από «κουμπιά» σε μπάρες εντολών να επιτελέσουμε οποιαδήποτε από τις προσφερόμενες εντολές, σχεδίασης, επεξεργασίας, ανάλυσης κλπ.

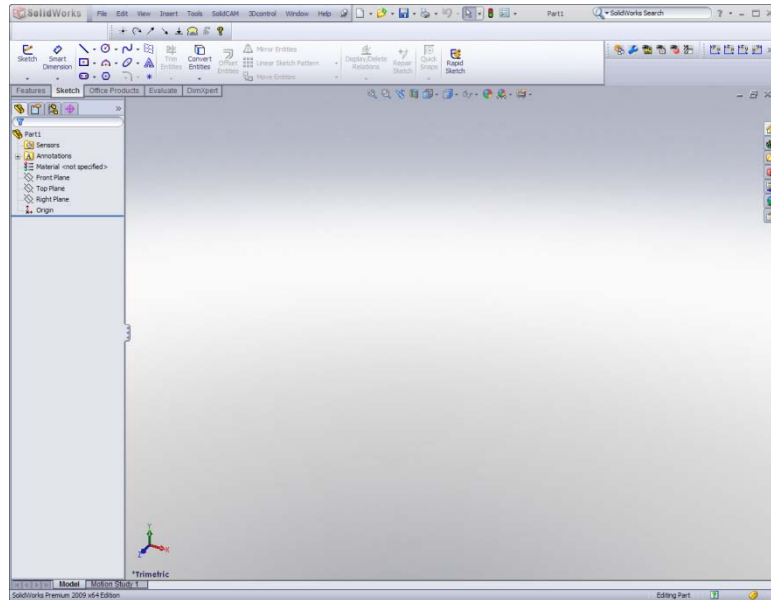


Σχήμα 5.9 Αρχικό γραφικό περιβάλλον του SolidWorks

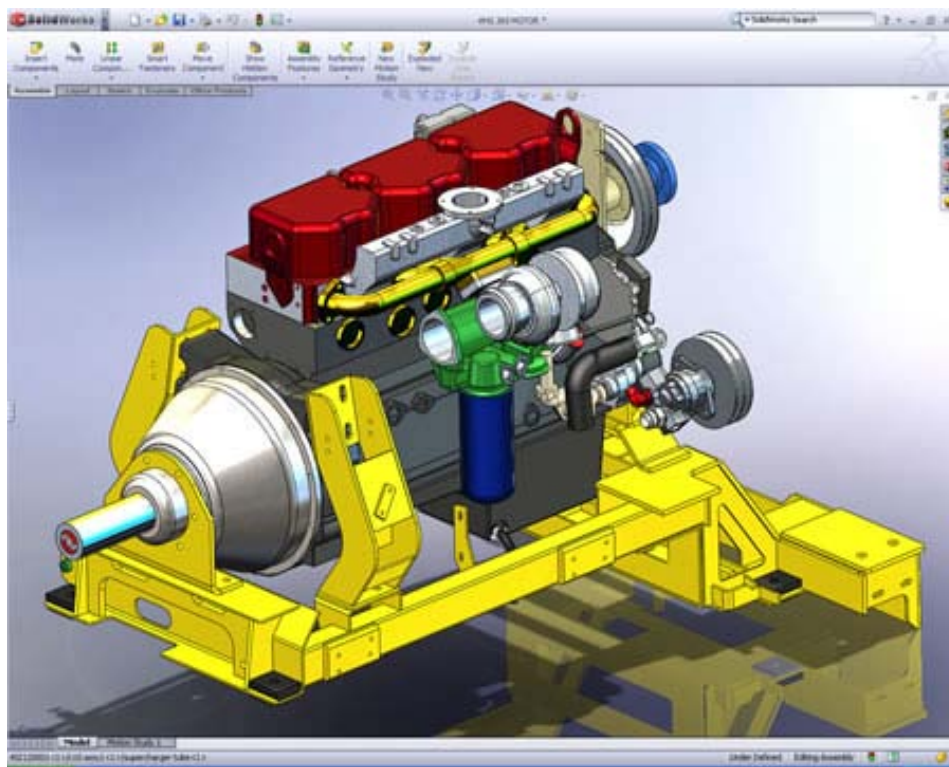


Σχήμα 5.10 Δημιουργία Part , assembly ,Drawing

Επιλέγοντας π.χ. Part για νέο αντικείμενο (Σχήμα 5.10), εμφανίζεται το πλήρες γραφικό περιβάλλον του Solidworks, του οποίου μπορούμε να ρυθμίσουμε τα εργαλεία ώστε να εμφανίζονται τα απαραίτητα, ανάλογα με τις σχεδιαστικές μας ανάγκες.



Σχήμα 5.11 Γραφικό περιβάλλον σχεδίασης του SolidWorks

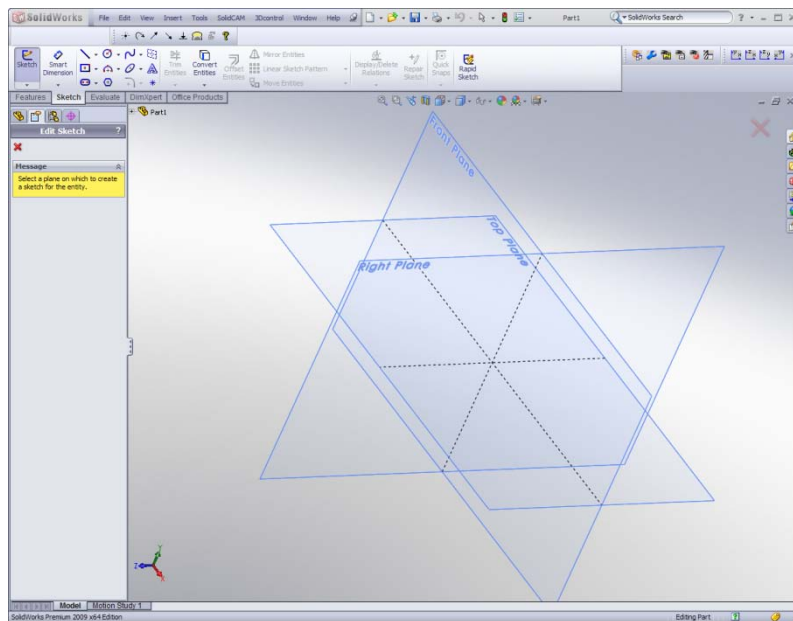


Σχήμα 5.12 Δημιουργία σύνθετων συναρμολογημάτων με χρήση του SolidWorks

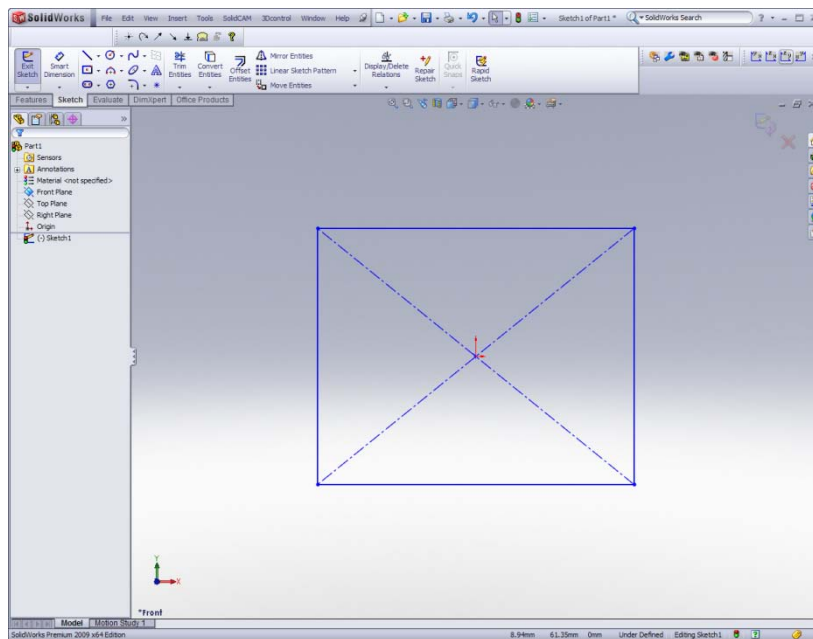
Βασικά βήματα σχεδίασης - Παράδειγμα

Παρακάτω καταγράφονται σε ένα απλό παράδειγμα τα πιο βασικά βήματα που συνήθως ακολουθούνται για τη δημιουργία ενός στερεού μοντέλου (solid part) . Το λογισμικό Solidworks περιλαμβάνει πληθώρα σχεδιαστικών εργαλείων με τα οποία μπορεί κανείς να σχεδιάσει πολλές και σύνθετες γεωμετρίες.

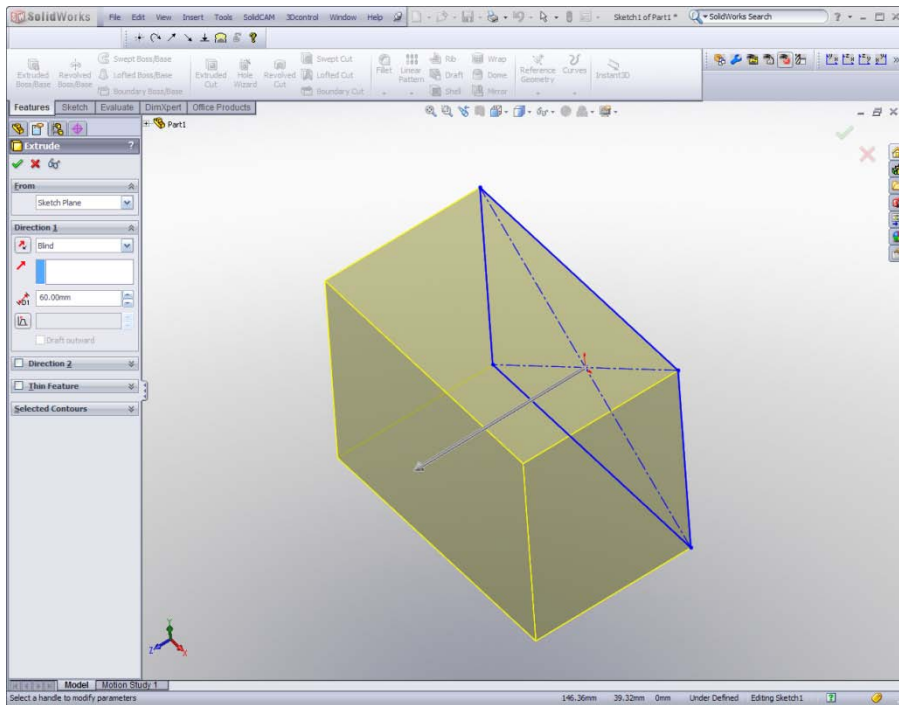
1. Επιλέγουμε επίπεδο εργασίας-σχεδίασης (επίπεδα XY , XZ , YZ)



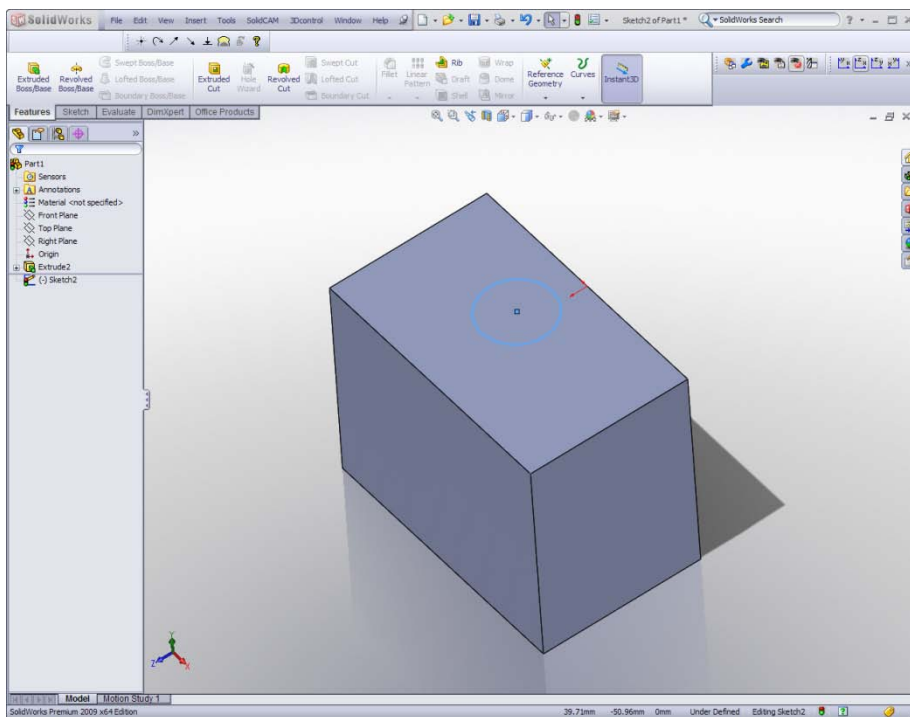
2. Σχεδίαση 2Δ περιγράμματος , καμπυλών κτλ



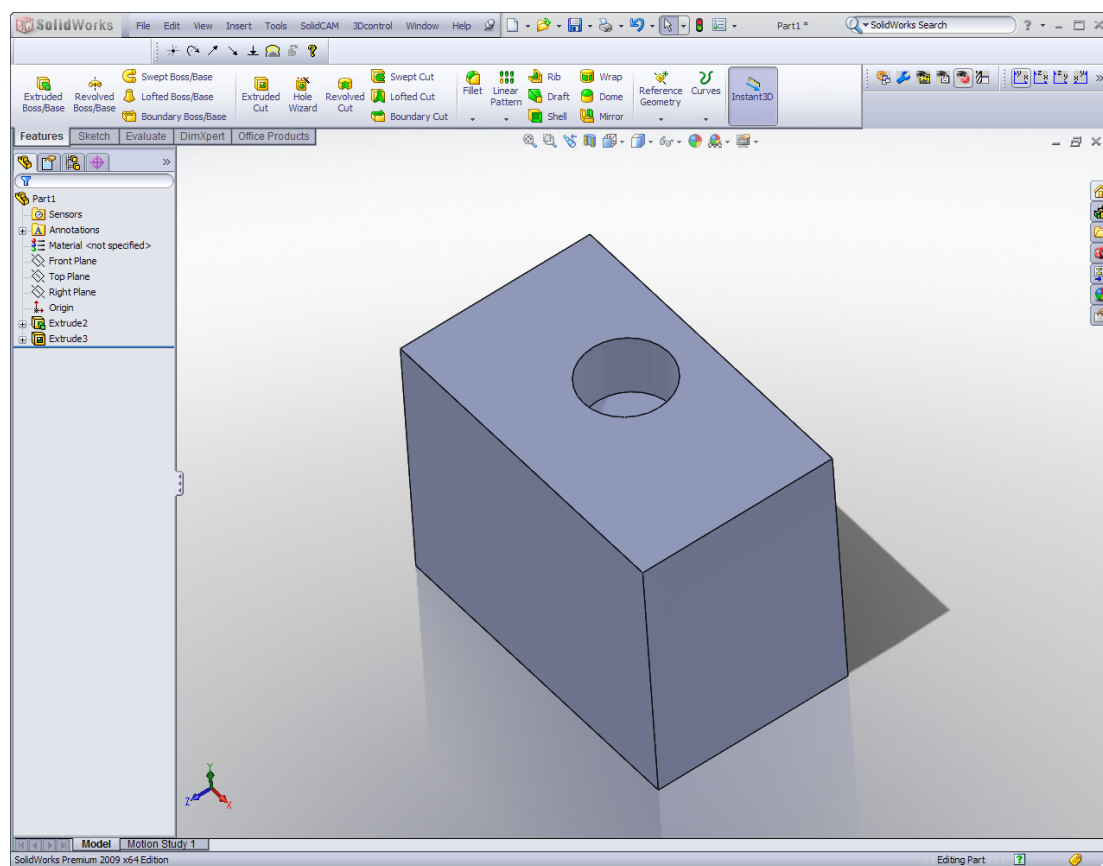
3. Εξώθηση στο χώρο για τη δημιουργία του βασικού στερεού π.χ. με προβολή κατά Z (Εδώ κατά π.χ. 60mm).



4. Επιλογή επιφάνειας του βασικού στερεού και δημιουργία σκίτσου 2Δ για δημιουργία μορφολογικού στοιχείου 3Δ. (sketch στο παραγόμενο τεμάχιο, π.χ. μπλε κύκλος).



5. Δημιουργία μορφολογικού στοιχείου τυφλής οπής (Extruded cut) στον άξονα Y κατά π.χ. 20mm



Στην αγορά υπάρχει πληθώρα συγγραμμάτων και ηλεκτρονικών μέσων με τα οποία μπορεί κανείς να εκπαιδευτεί στο εν λόγω λογισμικό CAD.

5.5 Λογισμικό SolidCAM

Το λογισμικό SolidCAM, στην έκδοση 2008 R12, εκπαιδευτική άδεια της οποίας διαθέτει το Εργαστήριο ΤΚΠ του ΕΜΠ, είναι το λογισμικό CAM που επελέγη για την υλοποίηση των σκοπών προετοιμασίας κατεργασιών επιτραπέζιου φρεζαρίσματος 3 αξόνων στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την εξαγωγή των σχετικών κωδικών και προγραμμάτων κοπής για υλοποίηση στην επιτραπέζια CNC φρέζα MT-Profi του Εργαστηρίου.

Οι λόγοι για αυτό, εκτός φυσικά από τη διαθεσιμότητά του στο Εργαστήριο, ήταν η άμεση και εντός του γραφικού περιβάλλοντος του Solidworks συνεργασία του με αυτό (Ενσωματωμένο μενού) και η πλήρης αναγνώριση των αρχείων-μοντέλων και λοιπών παραμέτρων του Solidworks. Γενικά θεωρείται ως ένα λογισμικό δημιουργίας μηχανουργικών κατεργασιών (CAM) ικανό για αποδοτικό και επωφελή προγραμματισμό εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC).

Οι βασικές δυνατότητες του SolidCAM περιλαμβάνουν:

- Κατεργασίες 2½ και 3 αξόνων για οριζόντιο και κάθετο κέντρο κατεργασίας.
- Κατεργασίες 4 και 5 αξόνων για κοπή σε πολλαπλές πλευρές εξαρτημάτων με ένα δέσιμο.
- Κατεργασίες με ταυτόχρονη κίνηση σε 4 άξονες.
- Κατεργασίες τόννου και με δυνατότητα χρήσης περιστρεφόμενων καθοδηγούμενων εργαλείων.
- Κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (wire EDM)
- Την δυνατότητα γραφικής δυναμικής απεικόνισης της κατεργασίας και του εναπομένοντος υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής (graphic simulation).

Φυσικά, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται εκμετάλλευση μόνο των πολύ βασικών (για 2½ και 3 αξόνων φρεζάρισμα) από αυτές τις εκτεταμένες δυνατότητες, που είναι και οι μόνες που αφορούν τον σήμερα εγκατεστημένο εξοπλισμό.

Χαρακτηριστικά της προηγμένης συνεργασίας με το SolidWorks:

Το SolidCAM ενσωματώνεται μέσω ενός ενιαίου παραθύρου και συνεργάζεται πλήρως με το αρχικό σχέδιο (τρισεδιάστατη γεωμετρία) που έχει δημιουργηθεί στο SolidWorks.

Το SolidCAM χρησιμοποιεί επίσης τα σχεδιαστικά εργαλεία του ίδιου του SolidWorks για να διαμορφώσει το μοντέλο κατεργασίας (CAM part) και να δημιουργήσει τις απαραίτητες γεωμετρίες που ορίζουν τις κατεργασίες κοπής. Όταν η γεωμετρία που χρησιμοποιείται, αλλάζει στο μοντέλο SolidWorks, το SolidCAM σε άμεση διασύνδεση συγχρονίζει αυτόματα όλες τις διαδικασίες κατεργασιών με την ανανεωμένη γεωμετρία.

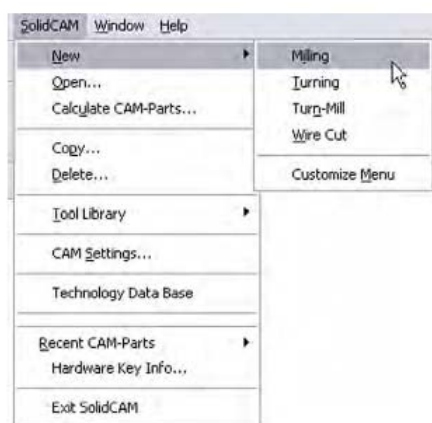
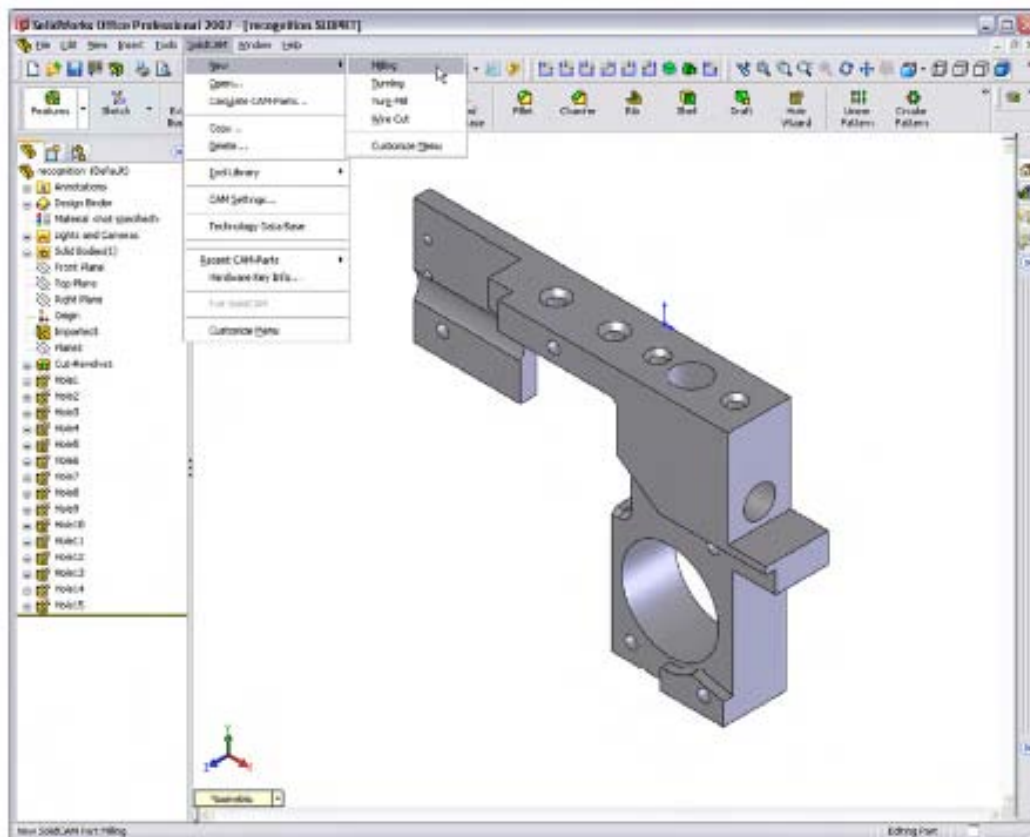
Η πλήρης αυτή συνεργασία του SolidCAM με το αρχικό μοντέλο SolidWorks, μειώνει δραστικά τα λάθη όταν υπάρχουν αλλαγές και βελτιώσεις στο βασικό CAD αρχείο του προς κατασκευή αντικειμένου και εξασφαλίζει τη δυνατότητα σωστής επανάληψης κατεργασιών σε μοντέλα που έχουν ήδη επεξεργαστεί και στα οποία έχουν γίνει μικροαλλαγές.

Βάση δεδομένων κατεργασιών:

Το SolidCAM προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μια βάση γνώσης για την αποτελεσματικότερη και γρηγορότερη εισαγωγή των κατεργασιών σε ένα μοντέλο. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί ξεχωριστή βάση γνώσης από την εμπειρία των εκάστοτε χρηστών. Έτσι ο χρήστης μπορεί να συλλέγει και αποθηκεύει τις μεθόδους και τις διαδικασίες ομάδων κατεργασιών, που χρησιμοποιεί περισσότερο στην παραγωγική μονάδα που λειτουργεί ή σε μια επαναλαμβανόμενη παραγωγική διαδικασία και να τις ανακαλεί και επαναχρησιμοποιεί, προς το συνολικό όφελος της παραγωγικότητας του.

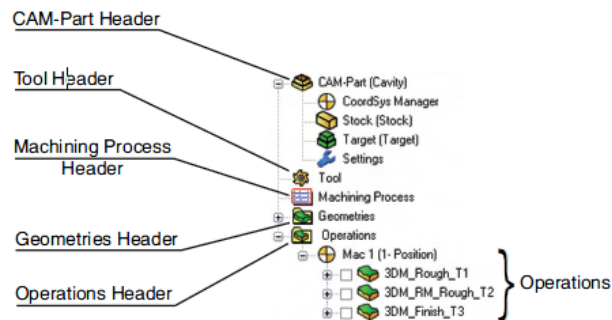
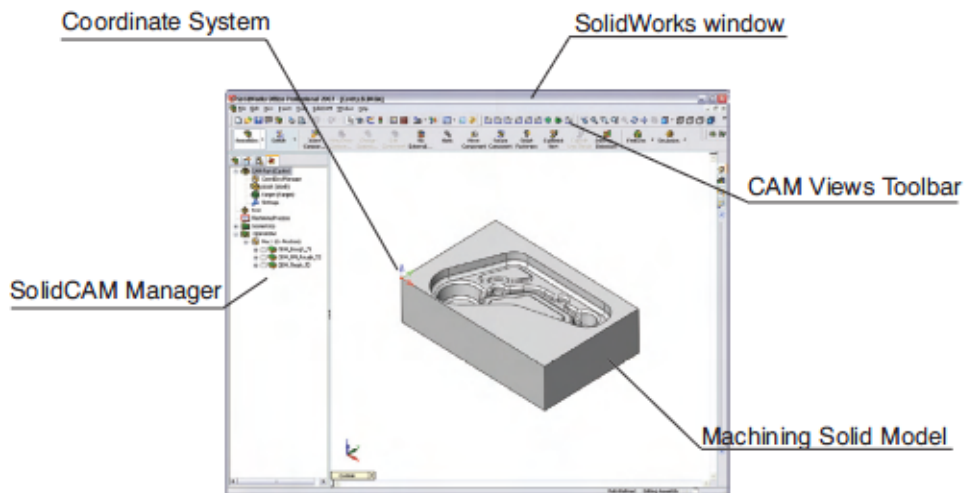
Σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος λογισμικού SolidCAM 2008 R12 για φρεζάρισμα:

Εκκινώντας από το περιβάλλον του Solidworks και με το αντικείμενο προς κατασκευή (part) ενεργό, από το γραφικό περιβάλλον του Solidworks επιλέγουμε το εικονίδιο SolidCAM και στη συνέχεια New > Milling .

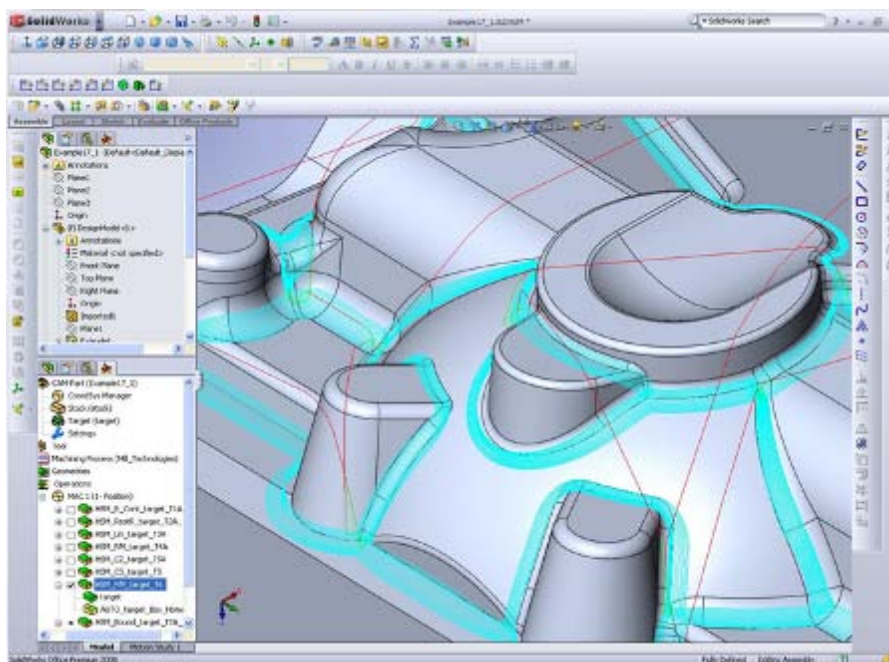


Σχήμα 5.13 Σύντομη περιγραφή της εκκίνησης του SolidCAM από το SolidWorks

Στη συνέχεια στο κοινό πλέον περιβάλλον CAD/CAM εμφανίζονται τα εργαλεία με τα οποία προσομοιάζουμε τις μηχανουργικές κατεργασίες και εξάγουμε κώδικα G.



Σχήμα 5.14 Σύντομη περιγραφή των εργαλείων του SolidCAM

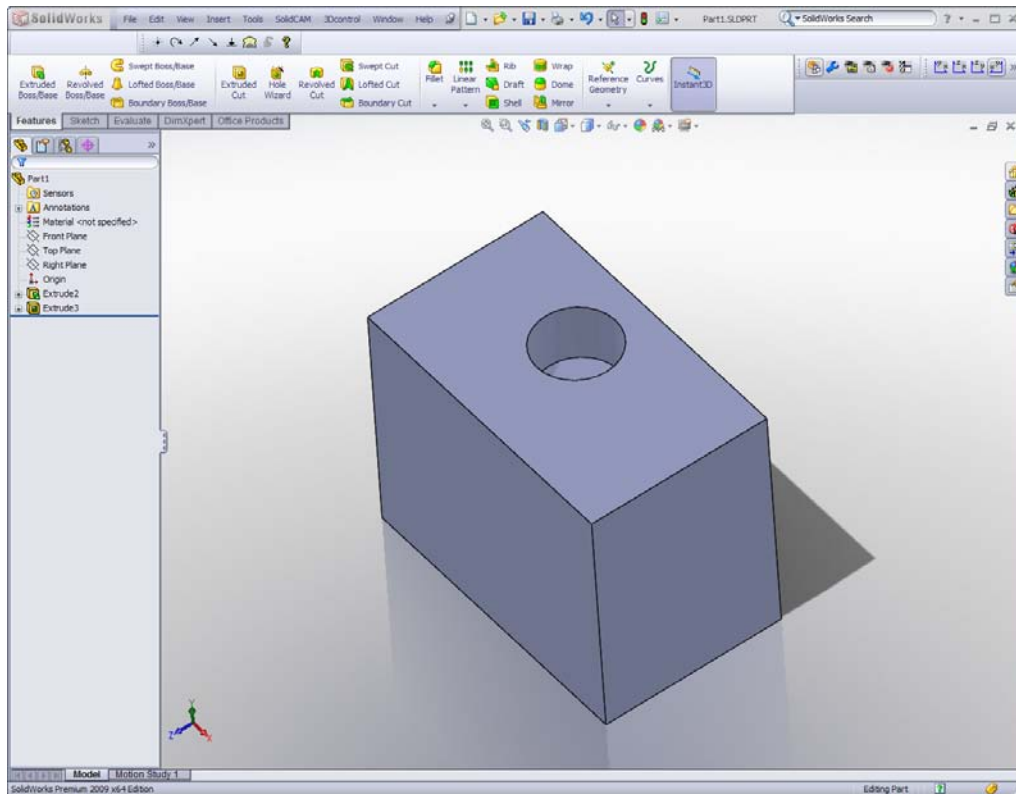


Σχήμα 5.15 Τροχιές κοπτικού εργαλείου στο λογισμικό SolidCAM

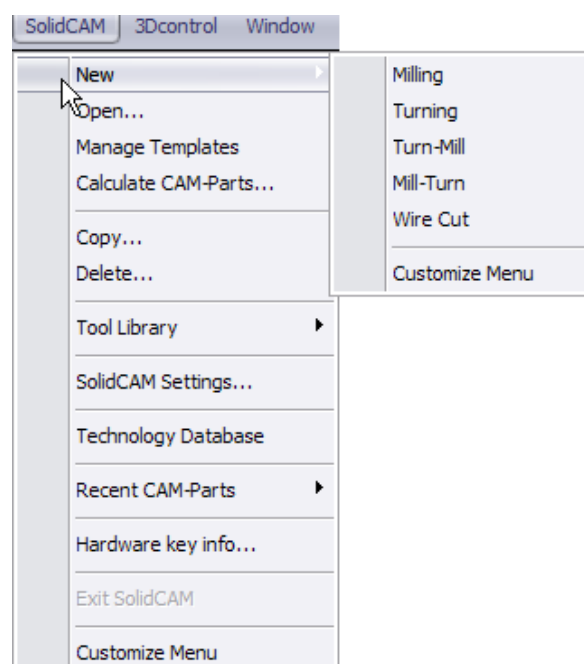
Βασικά βήματα δημιουργίας προγράμματος κοπής για milling – Παράδειγμα

Χρησιμοποιείται το παράδειγμα του πολύ απλού 3D αντικειμένου της προηγούμενης παραγράφου.

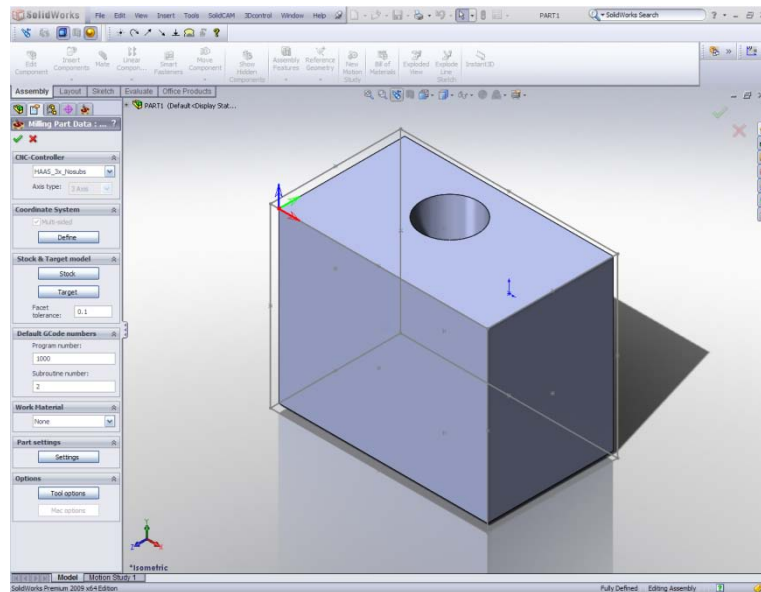
1. Αρχικά έχουμε το τρισδιάστατο στερεό στο γραφικό περιβάλλον του SolidWorks



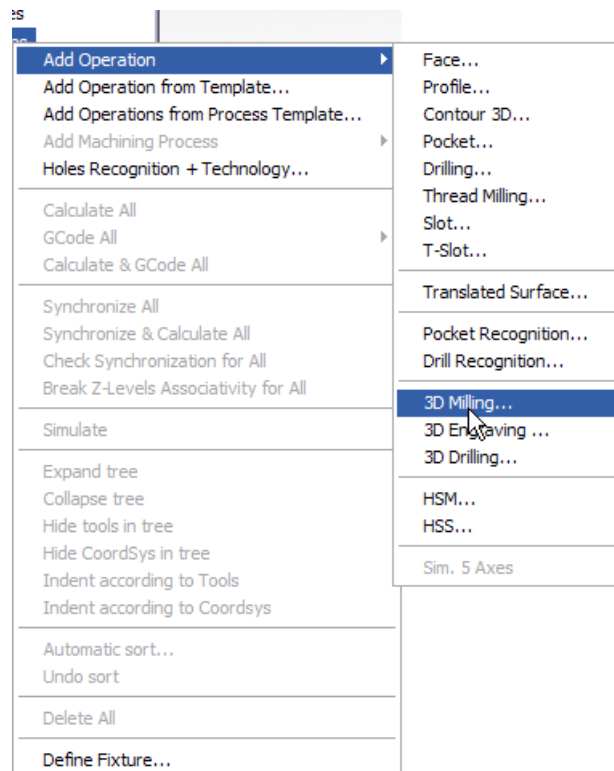
2. Ακολουθούμε την παρακάτω διαδρομή και επιλέγουμε new > milling, για να ορίσουμε νέα κατεργασία φρεζαρίσματος.



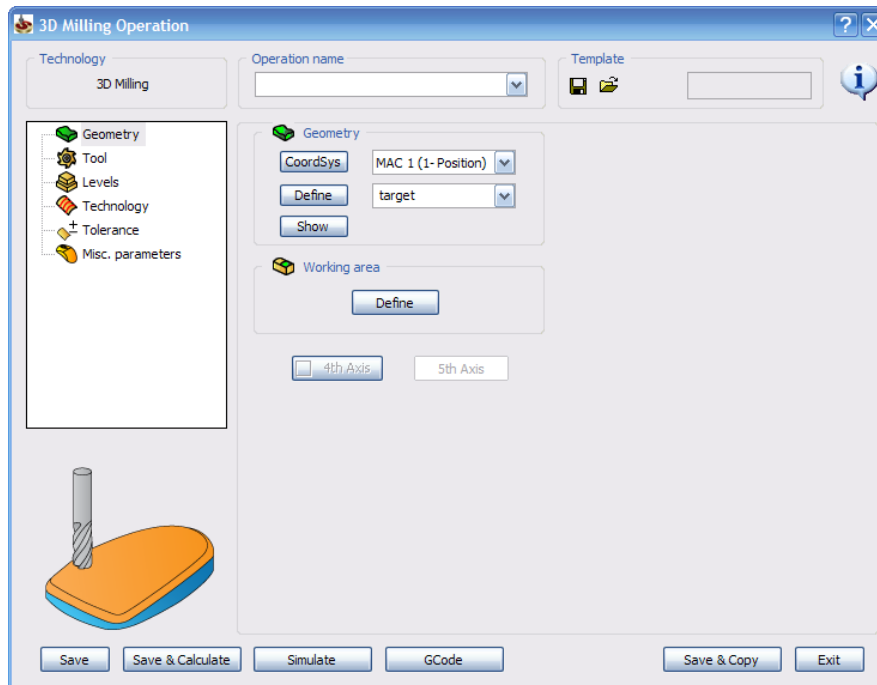
3. Μετά επιλέγουμε τον τύπο controller της μηχανής CNC που θα χρησιμοποιηθεί, τα απαραίτητα συστήματα συντεταγμένων , τις διαστάσεις της πρώτης ύλης (stock model), τη γεωμετρία του τελικού αντικειμένου (target model) και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά που αφορούν τις μονάδες μέτρησης , τα συστήματα συντεταγμένων , το είδος του υλικού που κατεργαζόμαστε (εάν βέβαια έχει οριστεί προηγουμένως μια βιβλιοθήκη υλικών)



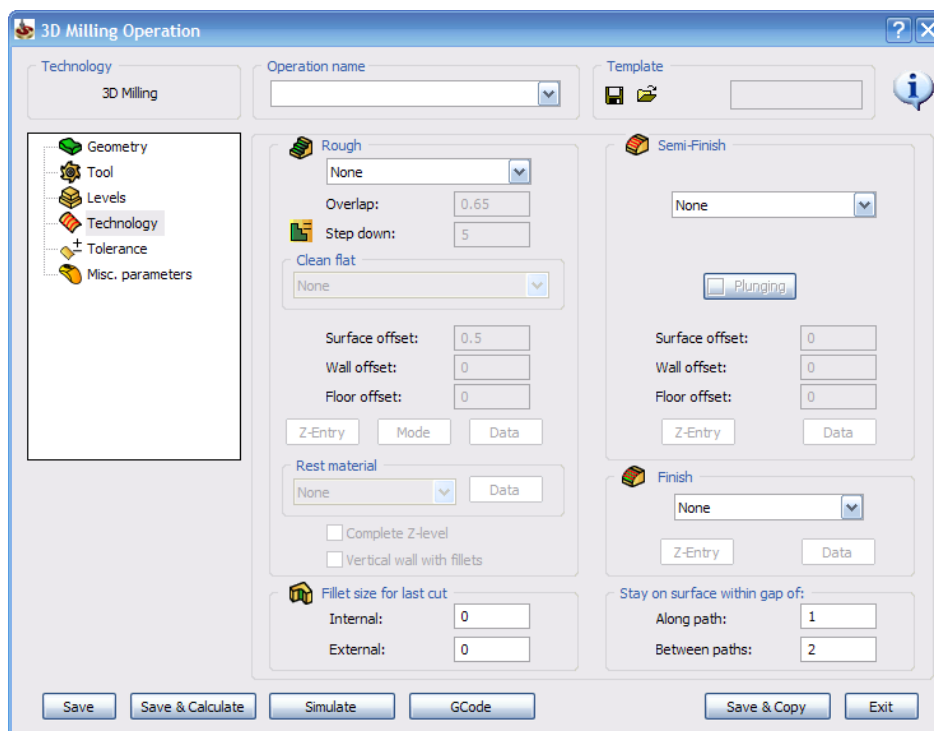
4. Εν συνεχεία επιλέγουμε τον τύπο κατεργασίας που θέλουμε να διεξάγουμε. Παρακάτω φαίνονται οι κατεργασίες που μπορούν να προγραμματισθούν στο SolidCAM.



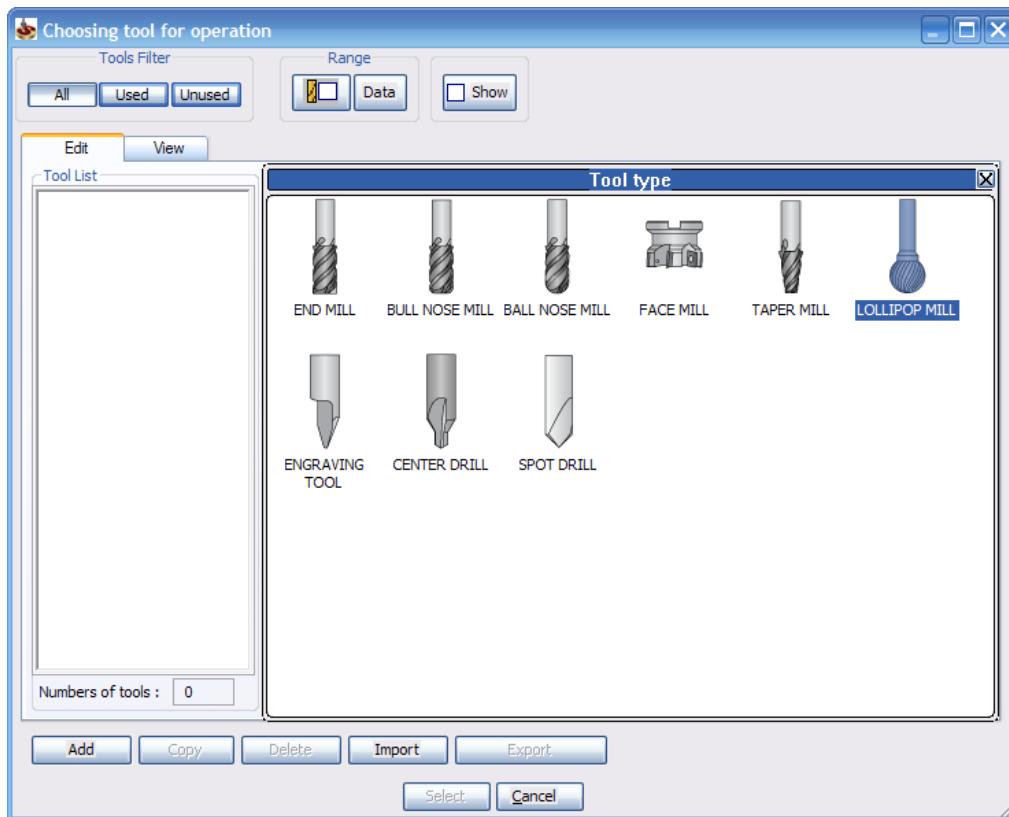
5. Σε τελευταίο βήμα, στα ανάλογα πεδία δίνονται οι απαραίτητες τιμές του κοπτικού/κοπτικών που θα χρησιμοποιηθούν και των παραμέτρων κοπής (ταχύτητες, προώσεις κλπ), ορίζονται-εξάγονται τροχιές κοπής (ομόκεντρες, ζιγκ-ζαγκ κλπ), προσομοιάζονται σε γραφικό περιβάλλον, και εξάγεται ο τελικός κώδικας κοπής (συνήθως σε μορφή αρχείου «*.cnc»).



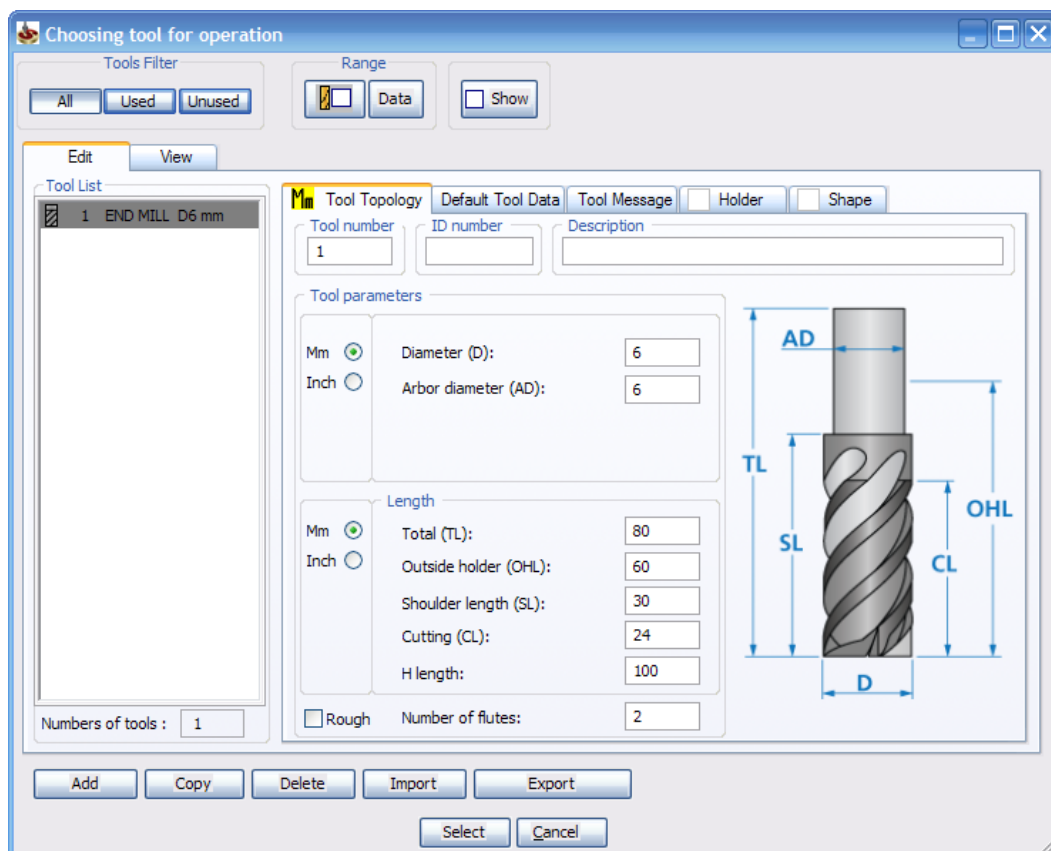
Σχήμα 5.16 Κεντρικό μενού για την κατεργασία 3D φρεζαρίσματος



Σχήμα 5.17 Γραφικό περιβάλλον για την εισαγωγή παραμέτρων κοπής



Σχήμα 5.18 Επιλογή κοπτικών εργαλείων



Σχήμα 5.19 Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν το κοπτικό εργαλείο (ΚΕ)

Για αναλυτικότερες πληροφορίες και εκπαιδευτικό υλικό όσον αφορά την εκμάθηση του λογισμικού SolidCAM ο αναγνώστης μπορεί να εγγραφεί στην σελίδα της εταιρείας SolidCAM (www.SolidCAM.com) και στη συνέχεια να μεταφορτώσει δωρεάν τα ηλεκτρονικά βιβλία του λογισμικού, καθώς επίσης και να παρακολουθήσει τα ηλεκτρονικά μαθήματα εκμάθησης του λογισμικού. Για τους φοιτητές δίνεται η δυνατότητα να εγκαταστήσουν στον Η/Υ τους τη δωρεάν έκδοση του SolidCAM ,η οποία είναι πλήρης με τη μόνη διαφορά ότι δεν εξάγει κώδικα G. Ο φοιτητής θα πρέπει να έχει πρώτα εγκατεστημένη στον Η/Υ του μια φοιτητική γνήσια έκδοση του SolidWorks.

5.6 Προ και Μετα-επεξεργαστής (Pre- & Post-processor) στο SOLIDCAM για την φρέζα COMAGRAV MT-Profi

Έχει ήδη αναφερθεί ότι για την ορθή μεταφορά κατασκευαστικών δεδομένων από το περιβάλλον CAM στην εκάστοτε εργαλειομηχανή CNC είναι απαραίτητη η γραφή-επεξεργασία, κατάλληλου ζεύγους προ- και μετά-επεξεργαστή (pre- & post-processor) δια των οποίων κάθε φορά θα μεταφράζονται τα δεδομένα αυτά σε αναγνωρίσιμη από τη μηχανή CNC μορφή G κώδικα.

Στο λογισμικό Solidcam ο προ-επεξεργαστής είναι ένα αρχείο της μορφής «***.mac», όπου mac, υπονοεί το “machine”, ο δε μετά-επεξεργαστής είναι ένα αρχείο της μορφής «***.gpp», όπου gpp, υπονοεί τη χρήση γλώσσας επεξεργασίας “gprl”, [5.13].

Και τα δυο αυτά αρχεία μπορούν να τροποποιηθούν με οποιοδήποτε επεξεργαστή κειμένου (text-editor) , κατά επιλογή του χρήστη.

Για την τροποποίηση του ζεύγους Pre & Post Processors του λογισμικού SolidCAM, υπάρχει όμως και το εργαλείο «GPPTool» μέσω του οποίου μπορούμε να διεξάγουμε τα παρακάτω:

1. Να καθορίσουμε τις παραμέτρους του προ-επεξεργαστή (pre-processor) , που μεταξύ άλλων ορίζουν τις υποστηριζόμενες από την εκάστοτε CNC μηχανή τροχιές του κοπτικού εργαλείου στο SolidCAM.
2. Να καθορίσουμε τις παραμέτρους του μετά-επεξεργαστή (post-processor) οι οποίες ορίζουν με ποιο τρόπο οι εντολές που δημιουργούν την πορεία τροχιάς του κοπτικού εργαλείου στο SolidCAM μεταφράζονται σε απλό αναγνωρίσιμο κώδικα G για τον ελεγκτή (controller) της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης CNC.

Περισσότερες πληροφορίες για το GPPTool ο αναγνώστης μπορεί να βρει στο σχετικό εγχειρίδιο [5.13].

Για τη μηχανή COMAGRAV MT-Profi του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε ως βάση για αρχικές δοκιμές διασύνδεσης με το Solidworks το ζεύγος προ- & μετά-επεξεργαστών για μηχανή 3 αξόνων HAAS, συγκεκριμένα ο «HAAS_3x_Nosubs».

Μετά από αρκετές δοκιμές και τροποποιήσεις των σχετικών αρχείων (κυρίως του αρχείου mac του pre-processor) διαπιστώθηκε ότι:

- Ο controller της μηχανής COMAGRAV MT-Profi, δια μέσου του λειτουργικού λογισμικού του PILOT, αναγνωρίζει μόνο ευθύγραμμες κινήσεις και άλλες τροχιές προσεγγιζόμενες από αλληλουχίες μικρών ευθυγράμμων τμημάτων. Αν οι τροχιές αυτές ανήκουν σε τόξα ,τότε το ίδιο το λογισμικό PILOT έχει τη δυνατότητα «εσωτερικά» να τις αναγνωρίσει ως τόξα, απλοποιώντας έτσι τον G-κώδικα που του έχει δοθεί (λειτουργία optimization).
- Δεν αναγνωρίζονται απευθείας τόξα ή ανώτερης τάξης καμπύλες τροχιές. Σε επίπεδο λειτουργικού λογισμικού PILOT εμφανίζονται σφάλματα και επικίνδυνες αλλοιώσεις του προγράμματος κοπής (κίνδυνος συγκρούσεων).

Το τροποποιημένο για χρήση στην μηχανή COMAGRAV MT-Profi αρχείο προεπεξεργαστή, τύπου “mac”, δίνεται στο Παράρτημα Δ.

5.7 Επιλογή, προμήθεια κατάταξη κοπτικών και υλικών για τη φρέζα COMAGRAV MT-Profi

5.7.1 Κοπτικά Εργαλεία

Για να είναι εφικτή η υλοποίηση κατασκευής με επιτραπέζιο φρεζάρισμα μιας ευρείας γκάμας αντικειμένων, κυρίως για σκοπούς πρωτοτυποποίησης, είναι απαραίτητο μια επιτραπέζια CNC φρέζα να είναι εφοδιασμένη με μια ικανή γκάμα κοπτικών εργαλείων (κονδυλίων), με τα οποία να μπορούν να πραγματοποιηθούν κατεργασίες στα υλικά για τα οποία είναι κατάλληλη η μηχανή, με τις ανάλογες προώσεις και βάθη κοπής, αλλά και να μπορούν με αυτά να επιτυγχάνονται κάποιες δύσκολες γεωμετρίες (π.χ. μικρά ράδια σε μεγάλα βάθη).

Τα κοπτικά αυτά σε επίπεδο επιτραπέζιου φρεζαρίσματος για πρωτοτυποποίηση πρέπει κατά κύριο λόγο να μπορούν να υλοποιηθούν:

- Ξεχόνδρισμα
- Ημι-φινιρίσματα (Μόνο για μεταλλικά υλικά, π.χ. Αλουμίνιο, ορείχαλκο)
- Φινιρίσματα

και δευτερευόντως:

- Χαράξεις
- Διατρήσεις-Γλυφάνσεις
- Σπειροτομήσεις

Από την άλλη μεριά, δεδομένου και του κόστους των ΚΕ, πρέπει να αποφεύγεται σε επίπεδο κατασκευής πρωτοτύπων ο εφοδιασμός με υπερβολικά πολλά ή σπάνια στη χρήση εργαλεία, Κάτι τέτοιο πρέπει να γίνεται μόνο αν το καλεί συγκεκριμένη εφαρμογή.

Με βάση τις παραπάνω αρχές, τη θεωρία και την τυποποίηση που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 και με βάση καταλόγους προμηθευτών από την εγχώρια αγορά, πέραν από πολύ λίγα βασικά εργαλεία που τη συνόδευαν κατά την αρχική της προμήθεια, η μηχανή COMAGRAV MT-Profi, εξοπλίστηκε τον Οκτώβριο του 2008 με τα εργαλεία που συνολικά φαίνονται στην παρακάτω φωτογραφία και παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2 .

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ / ΤΕΜΑΧΙΟ (χωρίς ΦΠΑ 19%)
1	COLLETS ER 20 Φ8	1	17,00€
2	COLLETS ER 20 Φ10	1	17,00€
3	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ1	1	6,50€
4	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ2	1	5,80€
5	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ3	1	5,80€
6	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ4	1	5,80€
7	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ5	1	5,80€
8	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ6	1	5,80€
9	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ8	1	9,50€
10	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ COB 8% Φ10	1	9,50€
11	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ BALL ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ Φ1.5	1	14,00€
12	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ BALL ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ Φ2	1	13,00€
13	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ BALL ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ Φ3	1	13,00€
14	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ BALL ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ Φ4	1	13,00€
15	ΚΟΝΔΥΛΙ ΔΙΠΤΕΡΟ BALL ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ Φ6	1	19,00€
16	ΚΟΝΔΥΛΙ ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑΤΟΣ RIPPER Φ8	1	14,38€
17	ΚΟΝΔΥΛΙ ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑΤΟΣ RIPPER Φ10	1	14,38€
18	ΤΡΥΠΑΝΙ Φ1	2	5,50€
19	ΤΡΥΠΑΝΙ Φ2	1	3,10€
20	ΤΡΥΠΑΝΙ Φ4	1	1,95€

Πίνακας 5.2 Βασικά χαρακτηριστικά & κόστος των κοπτικών εργαλείων του εργαστηρίου ΤΚΠ του Ε.Μ.Π.

Ο κατασκευαστής των παραπάνω κοπτικών εργαλείων είναι η εταιρεία Europatool , από την ιστοσελίδα της οποίας (<http://www.europatool.co.uk>) μπορεί κανείς να ενημερωθεί για όλη τη γκάμα των κοπτικών εργαλείων που παράγει , τις τυποποιήσεις που ακολουθεί και τις παραμέτρους κοπής που προτείνει.

5.7.2 Υλικά Πρωτοτυποποίησης

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώθηκε στη χρήση της φρέζας COMAGRAV MT-Profi για κατασκευή πρωτοτύπων μορφών και αντικειμένων. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο η εκκίνηση της λειτουργίας της και ο αρχικός εφοδιασμός της να γίνει με υλικά προσανατολισμένα σε αυτή την κατεύθυνση.

Λόγω των πολύ καλών ποιοτικών χαρακτηριστικών τους, της υψηλής τους κατεργασιμότητας, της μικρής φθοράς που προκαλούν στα κοπτικά εργαλεία και της ποιότητας επιφανειών των παραγομένων αντικειμένων, επελέγη να χρησιμοποιηθούν πολυμερή υλικά σε μορφή σανίδων μοντελισμού (modeling boards), σε διάφορα πάχη ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου που μπορεί να κατασκευασθεί, όπως αυτά έχουν αναλυτικά παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 4, της οικογένειας προϊόντων Renshape και Cibatool.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν με ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα προϊόντα του παρακάτω πίνακα.

Cibatool BM 5460
Cibatool BM 5440
Cibatool 4ST
Renshape BM 5440
Renshape MB 5470

Πίνακας 5.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών και άλλων παρόμοιων της ίδιας οικογένειας δίνονται αναλυτικά στο φύλλο τεχνικών προδιαγραφών τους στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.

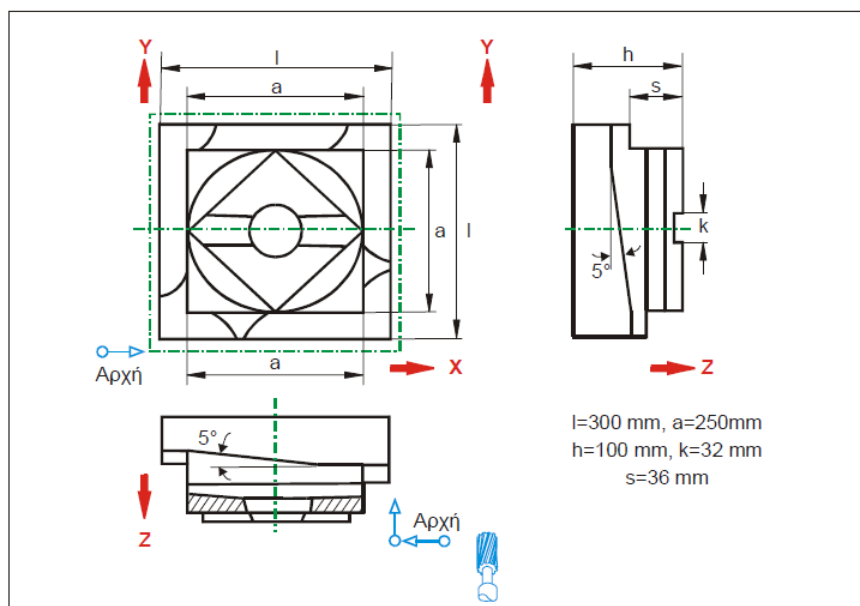
5.8 Αποτίμηση αποδιδόμενης ακρίβειας και ποιότητας επιφανειών για τη CNC φρέζα COMAGRAV MT-Profi

Οι προδιαγραφές και απαιτήσεις ακρίβειας των μεγάλων και ακριβών παραγωγικών εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης επιβάλλουν τη διεξαγωγή ελέγχου παραλαβής, αμέσως μετά την εγκατάστασή τους. Οι μηχανές αυτές υποτίθεται ότι έχουν ελεγχθεί και ρυθμιστεί κατά τη διάρκεια του ποιοτικού ελέγχου από τον κατασκευαστή τους και δεν θα πρέπει να πωλούνται, εάν δεν έχουν περάσει από τις συγκεκριμένες δοκιμασίες. Παρ' όλα αυτά, οι μηχανές συχνά διατίθενται σε επιχειρήσεις μακριά από το εργοστάσιο παραγωγής τους, κατόπιν μεταφοράς με αεροπλάνα, πλοία, τρένα και φορτηγά, σε αποστάσεις πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, η κοντινότερη στην Ελλάδα χώρα κατασκευής (μεγάλων συστημάτων) είναι η Ιταλία, ενώ εισάγονται μηχανές από τη Γερμανία, την Αμερική, την Κορέα, την Τσεχία και την Ιαπωνία.

Παρά το γεγονός της προσεγγμένης τους συσκευασίας σε ειδικά ξύλινα κιβώτια μεταφοράς με ελαστικές βάσεις και ελατήρια, είναι προφανές ότι, κατά τη μεταφορά, υπάρχει πιθανότητα κραδασμοί, πτώσεις, χτυπήματα και άλλες αιτίες να προκαλέσουν βλάβες σε κάποια υποσυστήματα μιας μηχανής, προκαλώντας απορρυθμίσεις ή ακόμα και βλάβες που επηρεάζουν, λίγο ή πολύ, την ακρίβεια κατεργασίας.

Στη βιομηχανία, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται συνήθως με τη διενέργεια δοκιμών παραλαβής (acceptance tests). Μάλιστα, για να μην υπάρχουν διαφωνίες μεταξύ του κατασκευαστή και του πελάτη, τυποποιήθηκαν συγκεκριμένες δοκιμασίες ελέγχου, ανάλογα με την εργαλειομηχανή. Οι έλεγχοι αυτοί βασίζονται κυρίως στην παραγωγή ενός συγκεκριμένου τεμαχίου (acceptance ή test part), ανά τύπο εργαλειομηχανής. Μετά την κατεργασία αυτού του τυποποιημένου τεμαχίου, ο μετροτεχνικός έλεγχος πρέπει αποφανθεί ότι οι διαστάσεις του είναι εντός του προβλεπόμενου πεδίου ανοχών για κάθε μία.. Τότε και μόνο τότε, ο πελάτης δέχεται να παραλάβει την εργαλειομηχανή. Σε αντίθετη περίπτωση, ο κατασκευαστής ή ο αντιπρόσωπός του ανά χώρα ή ανά πόλη είναι υποχρεωμένος να επισκευάσει ή να αντικαταστήσει τη μηχανή, ώστε να περνά με επιτυχία το acceptance test.

Τέτοια τυποποιημένα τεμάχια έχουν προδιαγραφεί από διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης, όπως είναι οι ISO, DIN και NAS. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα από τα τυποποιημένα αυτά τεμάχια, για τον έλεγχο παραλαβής ψηφιακά καθοδηγούμενων φρεζών τριών αξόνων.



Σχήμα 5.20 Δοκιμαστικό τεμάχιο για τον έλεγχο παραλαβής ψηφιακά καθοδηγούμενων φρεζών [3.1] .

Στην περίπτωση χαμηλού κόστους επιτραπέζιων εργαλειομηχανών, δυστυχώς πολύ λίγοι κατασκευαστές ή αντιπρόσωποι διενεργούν έλεγχο παραλαβής. Απλά εγγυώνται την επίδοση του προϊόντος τους βάσει προδιαγραφών, αφήνοντας το χρήστη να διαπιστώνει τελικά (εφόσον διαθέτει και τα μέσα) αν το προϊόν καλύπτει τελικά τις ανάγκες ακρίβειας των επαγγελματικών του δραστηριοτήτων.

Το ίδιο συνέβη και στην περίπτωση της επιτραπέζιας φρέζας αριθμητικού ελέγχου COMAGRAV Mt Profi του ΕΜΠ. Δεν κρίθηκε όμως τόσο σκόπιμο, ακόμα και εκ των υστέρων, να κατασκευασθεί από το ίδιο το Εργαστήριο ένα τυποποιημένο τεμάχιο παραλαβής για την διαπίστωση της ακρίβειας των αποδιδόμενων μορφών με χρήση της συγκεκριμένης μηχανή. Αντίθετα και μέσα στα πλαίσια της ομαλής ένταξης του εξοπλισμού COMAGRAV MT-Profi στις δραστηριότητες του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ, κρίθηκε περισσότερο σκόπιμο έναν από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας να αποτελέσει και η καταρχήν διαπίστωση και αποτίμηση συνολικά των βασικών επιδόσεων της μηχανής αυτής σε επίπεδο αποδιδόμενης ακρίβειας αλλά και ποιότητας επιφανείας στα κατασκευαζόμενα αντικείμενα. Αποφασίστηκε μάλιστα, σε αυτό το στάδιο η διερεύνηση να γίνει μόνο σε επίπεδο υλικών για κατεργασίες πρωτοτυποποίησης, όπως τα πολυμερή υλικά CIBATOOL.

Ένας ακόμα στόχος ήταν να μπορεί να γίνει μια καταρχήν σύγκριση και με τον αντίθετης αρχής λειτουργίας (εναπόθεση υλικού) υφιστάμενο εξοπλισμό του Εργαστηρίου, δηλαδή τη μηχανή LOM 1015, για την οποία έχει προϋπάρξει παρόμοια διερεύνηση. Τέλος θα ήταν χρήσιμο πιθανές αποκλίσεις να μπορούσαν να συσχετισθούν με πιθανά αίτια (π.χ. το αν υποβαθμίζεται ή όχι η ακρίβεια σε κοπές με παρεμβαλλόμενες τροχιές στις κινήσεις τους), ακόμα και ως ένδειξη για περαιτέρω έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση.

Για όλα τα παραπάνω, επελέγη η κατασκευή με τη CNC φρέζα του εργαστηρίου δοκιμών ελέγχου εστιασμένων στον έλεγχο αποδιδόμενης ακρίβειας με τρεις τρόπους:

- Ακρίβειες σε διαστάσεις μορφών που αποδίδονται στο επίπεδο XY (παράλληλα της τράπεζας εργασίας)
- Ακρίβειες σε διαστάσεις κατά τον άξονα Z, αλλά και σε επίπεδο XY
- Ακρίβειες σε ελεύθερης γεωμετρίας μορφές, που ιδιαίτερος ενδιαφέρουν το φρεζάρισμα 3 αξόνων (π.χ. για κατασκευή μητρών κλπ).

Για τη λήψη των μετρήσεων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα κατάλληλα μετρητικά μέσα και εργαλεία υπολογισμού που έχει στη διάθεση του το Εργαστήριο ΤΚΠ και στα οποία γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε κάθε αντίστοιχη παράγραφο.

5.8.1 Κατασκευή Δοκιμίου για την ακρίβεια στο επίπεδο XY

Χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο με πρότυπες ονομαστικές διαστάσεις στο επίπεδο XY, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Κλιμακούμενες προσανατολισμένες με τον άξονα X εξωτερικές και εσωτερικές γραμμικές διαστάσεις.
- Κλιμακούμενες προσανατολισμένες με τον άξονα Y εξωτερικές και εσωτερικές γραμμικές διαστάσεις.
- Κλιμακούμενες προσανατολισμένες κατά 45 μοίρες από τον άξονα X εξωτερικές και εσωτερικές διαγώνιες γραμμικές διαστάσεις.
- Κλιμακούμενες προσανατολισμένες κατά 45 μοίρες από τον άξονα Y εξωτερικές και εσωτερικές διαγώνιες γραμμικές διαστάσεις.
- Κλιμακούμενες εξωτερικές και εσωτερικές κυκλικές διαμέτροι σε διάφορες θέσεις

και τέλος

- Σταθερά πάχη των 5mm σε διάφορες θέσεις (όλα τα τοιχώματα).

Το εν λόγω δοκίμιο είχε χρησιμοποιηθεί για παλαιότερη έρευνα του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ [5.14] για την εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων για τη μηχανή LOM 1015 του Εργαστηρίου, οπότε αποτελεί και καλή βάση σύγκρισης των δύο συστημάτων.

Το μοντέλο προετοιμάστηκε σε επίπεδο CAD στοSolidworks και αμέσως μετά προετοιμάστηκε ο κώδικας κοπής του για κατεργασία σε δύο φάσεις (ξεχόνδρισμα και φινίρισμα) σε Solidcam, με τις ακόλουθες παραμέτρους για κάθε φάση:

Ξεχόνδρισμα

Επίπεδο κονδύλι $D = 3 \text{ mm}$

Πάσο κοπής : 1.5 mm

Στροφές : 5000 RPM

Πρόωση κοπής : 20 mm/sec

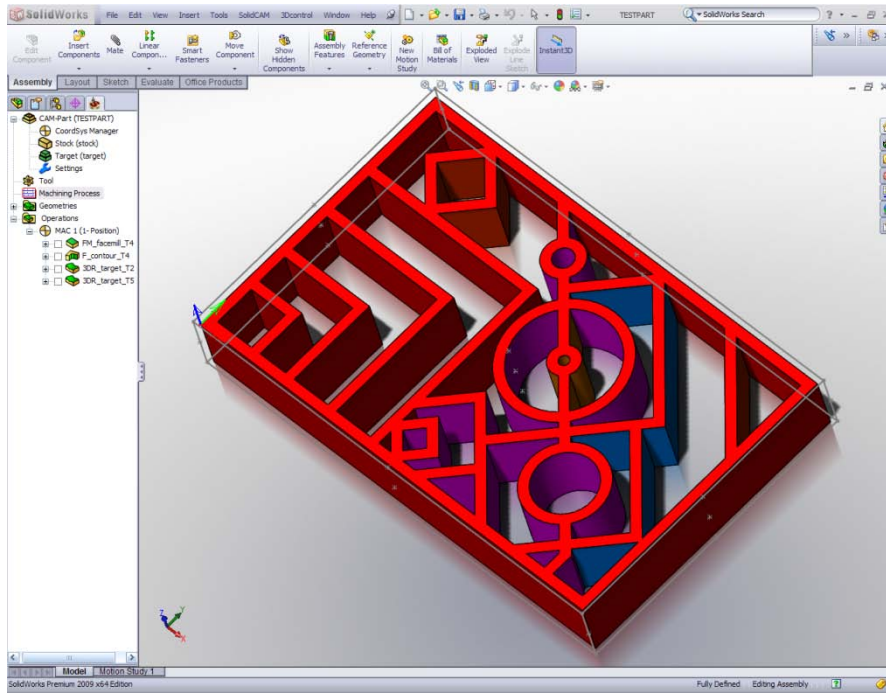
Φινίρισμα

Πάσο κοπής : 0.5

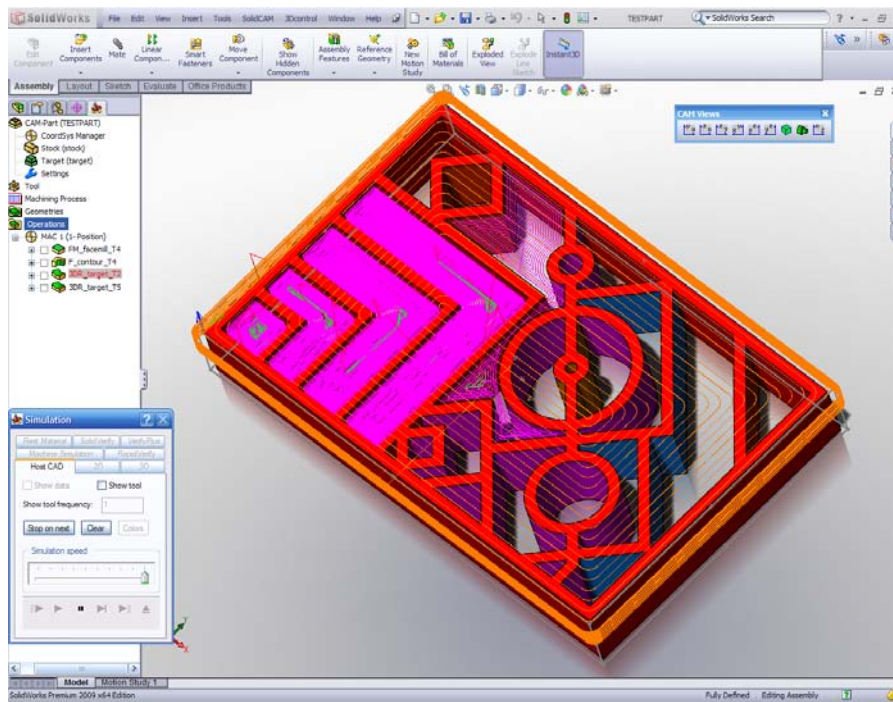
Στροφές: 15000 RPM

Επίπεδο κονδύλι $D = 2 \text{ mm}$

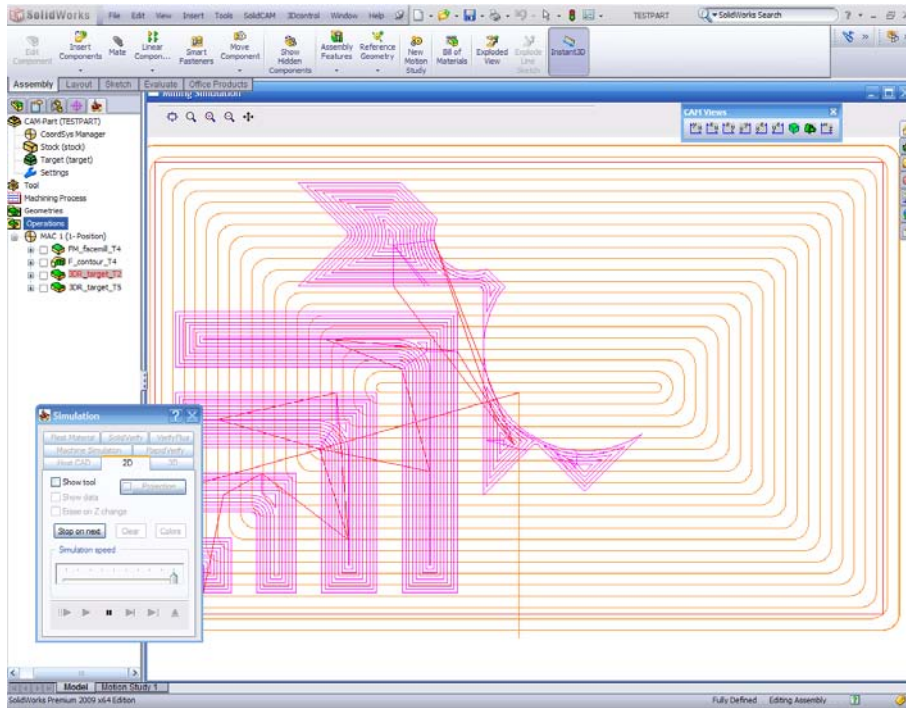
Πρόωση κοπής : 25 mm/sec



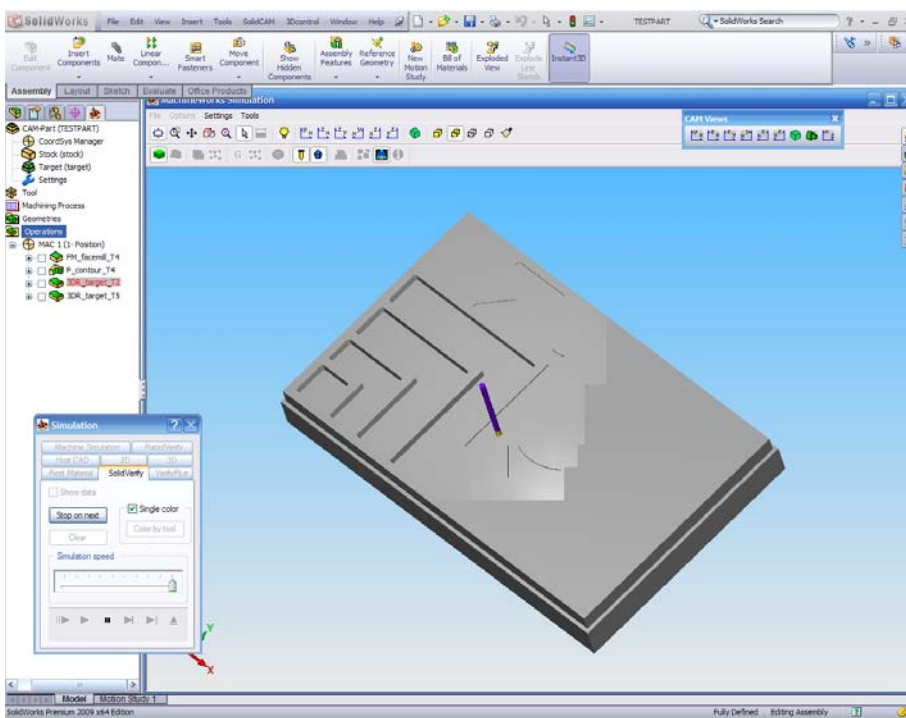
Σχήμα 5.21 Προγραμματισμός στο SolidCAM



Σχήμα 5.22 Προσομείωση τροχιάς εργαλείου στο SolidCAM



Σχήμα 5.23 2D Προσομοίωση τροχιάς εργαλείου στο SolidCAM



Σχήμα 5.24 Προσομείωση της κοπής στο SolidCAM (επιλογή Solid Verify)

Εν συνεχεία κατασκευάστηκε σε υλικό Cibatool 25x500x1500 4ST στη μηχανή MT-Profi, Σχήμα 5.25 .



Σχήμα 5.25 Το δοκίμιο για την ακρίβεια στο επίπεδο XY

Ακολούθησε αναλυτική μέτρηση όλων των στοχευόμενων εσωτερικών και εξωτερικών γραμμικών και διαμετρικών διαστάσεων, αλλά και των παχών σε διάφορες θέσεις, με τη CMM μηχανή DEA Mistral του Εργαστηρίου.

Τα αποτελέσματα από τη μέτρηση του δοκιμίου και η αποτίμησή τους γίνονται στο κεφάλαιο 6 των συμπερασμάτων.

5.8.2 Κατασκευή Δοκιμίου για την ακρίβεια στο επίπεδο XY και στον άξονα Z

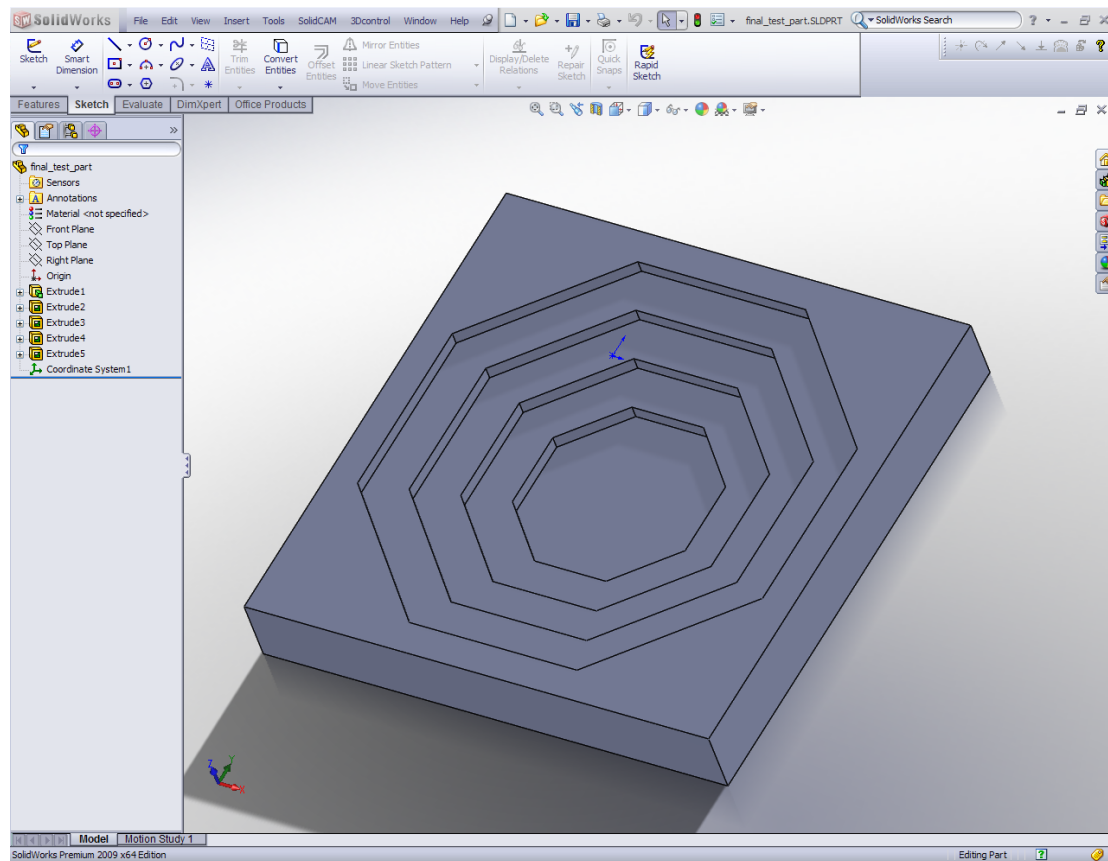
Εδώ επιπλέον των συμπερασμάτων που επιδιώχθηκαν με το δοκίμιο διαστάσεων κατά XY, στόχους αποτέλεσαν:

- Η αποτίμηση της ακρίβειας απόδοσης συγκεκριμένης διάστασης κατά τον άξονα Z (του κοπτικού) σε διαφορετικές θέσεις επί του αντικειμένου

και

- Η μέτρηση σε διάφορες θέσεις συγκεκριμένης διάστασης κείμενης κατά XY, σε διαφορετικά όμως ύψη, προσανατολισμούς και θέσεις (Μορφή οκτάγωνου σκαλοπατιού)

Σχεδιάστηκε σε Solidworks και προετοιμάστηκε για κοπή με Solidcam ένα οκταγωνικής μορφής βαθμιδωτό δοκίμιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.26 .



Σχήμα 5.26 Δοκιμίου για την ακρίβεια στο επίπεδο XY και στον άξονα Z

Λόγω της απλότητας και πρισματικότητας της μορφής του, το μοντέλο προγραμματίστηκε με το λογισμικό Solidcam, για κατεργασία σε μια φάση αυτή τη φορά, με ένα δίφτερο κοπτικό ξεχονδρίσματος διαμέτρου 10mm.

Οι παράμετροι κοπής στο Solidcam και το χρησιμοποιούμενο υλικό :

Υλικό: Renshape BM70

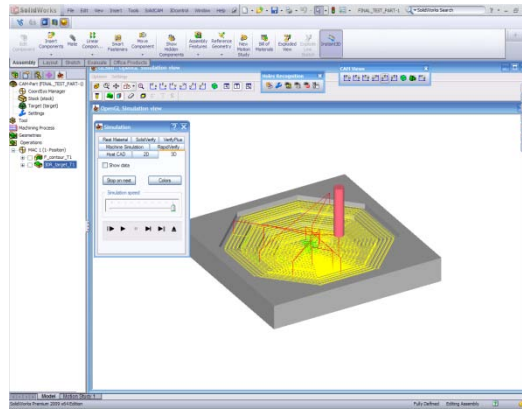
Ξεχόνδρισμα

Επίπεδο κονδύλι $D = 10 \text{ mm}$

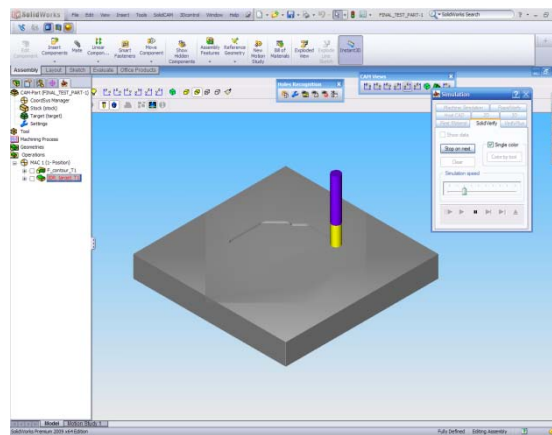
Πάσο κοπής : 2 mm

Στροφές : 3000 RPM

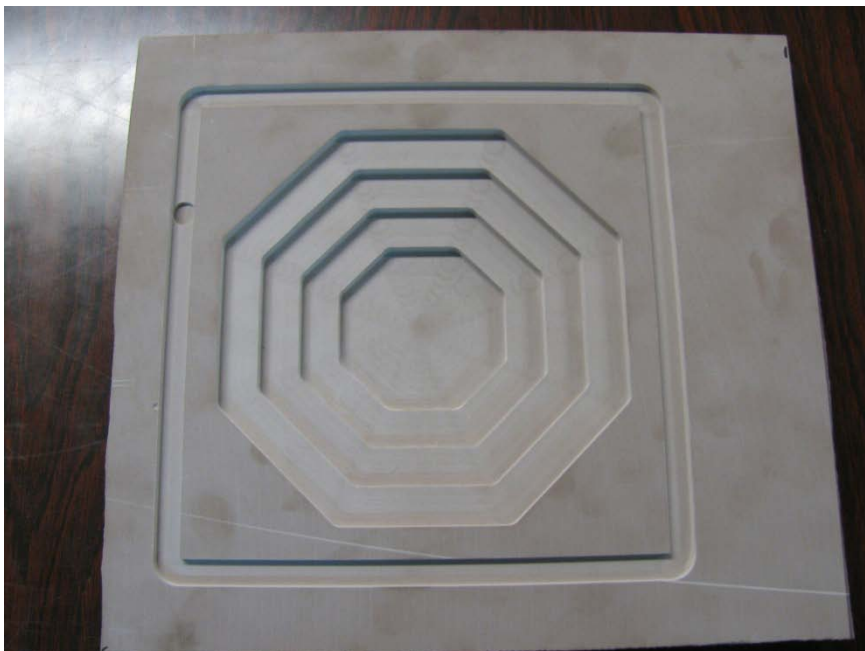
Πρώση κοπής : 15 mm/sec



Σχήμα 5.27 Προσομείωση τροχιάς εργαλείου στο SolidCAM



Σχήμα 5.28 Προσομείωση της κοπής στο SolidCAM (επιλογή Solid Verify)



Σχήμα 5.29 Το δοκίμιο για την ακρίβεια στο επίπεδο XY και στον άξονα Z

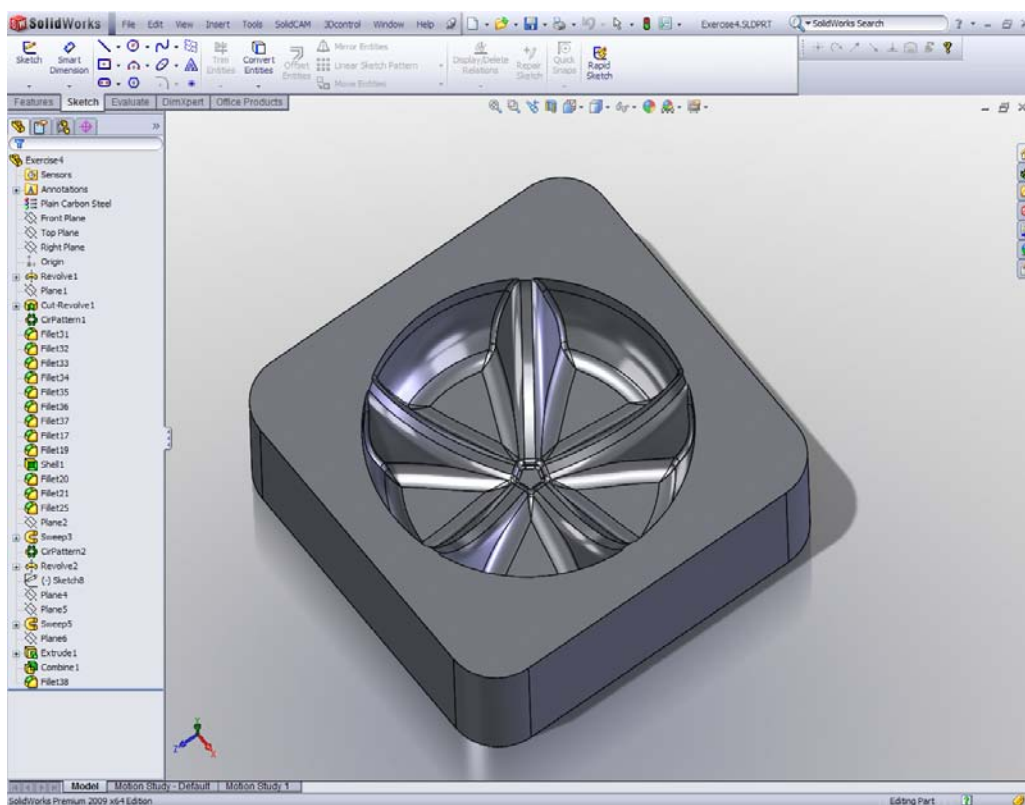
Ακολούθησε αναλυτική μέτρηση όλων των κατακόρυφων και οριζόντιων διαστάσεων ενδιαφέροντος του αντικειμένου σε διάφορες θέσεις, με τη CMM μηχανή DEA Mistral του Εργαστηρίου. Πέραν μάλιστα από τις διαστάσεις που αποτελούσαν κύριο στόχο μέτρησης, για την πληρότητα του πράγματος μετρήθηκαν και οι συνολικές εσωτερικές διαστάσεις ανά κατεύθυνση για τις βαθμίδες διαφόρων επιπέδων που προέκυψαν, με ενδιαφέροντα αποτελέσματα η αποτίμησή και ερμηνεία των οποίων γίνεται στο κεφάλαιο 6 των συμπερασμάτων.

5.8.3 Κατασκευή Δοκιμίου ελεύθερης γεωμετρικής μορφής

Στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή πληθαίνουν συνεχώς τα προϊόντα που ενσωματώνουν ελεύθερες, δηλαδή μη επακριβώς μαθηματικά και γεωμετρικά περιγράψιμες, μορφές και γεωμετρίες. Ο σχεδιασμός τέτοιων προϊόντων υποβοηθείται σημαντικά από τα σύγχρονα CAD λογισμικά, και η κατασκευή πρωτοτύπων τους, εργαλείων παραγωγής τους (μητρών), ακόμα και των ίδιων των αντικειμένων, υποστηρίζεται στενά από τις CNC κατεργασίες 3 ή περισσότερων αξόνων.

Για το Εργαστήριο ΤΚΠ θα είχε λοιπόν ιδιαίτερη αξία, η διερεύνηση της πιστότητας απόδοσης τέτοιων μορφών από την μηχανή MT-Profi, για εφαρμογές πρωτοτύπων, και η διαπίστωση της τάξης μεγέθους αλλά και της τοπικής γεωμετρίας των τυχόν εμφανιζόμενων αποκλίσεων σε τέτοια αντικείμενα.

Ως δοκίμιο-δοκιμαστική γεωμετρία για το σκοπό αυτό επελέγη ένα ελεύθερης τρισδιάστατης γεωμετρίας αντικείμενο, μορφής μήτρας, από τη βιβλιοθήκη αντικειμένων του λογισμικού Solidcam, μορφής μήτρας για λεμονοστύφη, Σχήμα 5.30 .



Σχήμα 5.30 Το δοκίμιο ελεύθερης γεωμετρικής μορφής

Το μοντέλο προετοιμάστηκε σε επίπεδο CAD στο Solidworks και αμέσως μετά προετοιμάστηκε ο κώδικας κοπής του για κατεργασία με δύο κοπτικά σε δύο φάσεις (ξεχόνδρισμα και φινίρισμα) σε Solidcam με τις ακόλουθες παραμέτρους για κάθε φάση:

Ξεχόνδρισμα

Επίπεδο κονδύλι $D = 5 \text{ mm}$

Πάσο κοπής : 1 mm

Στροφές : 8000 RPM

Πρόωση κοπής : 20 mm/sec

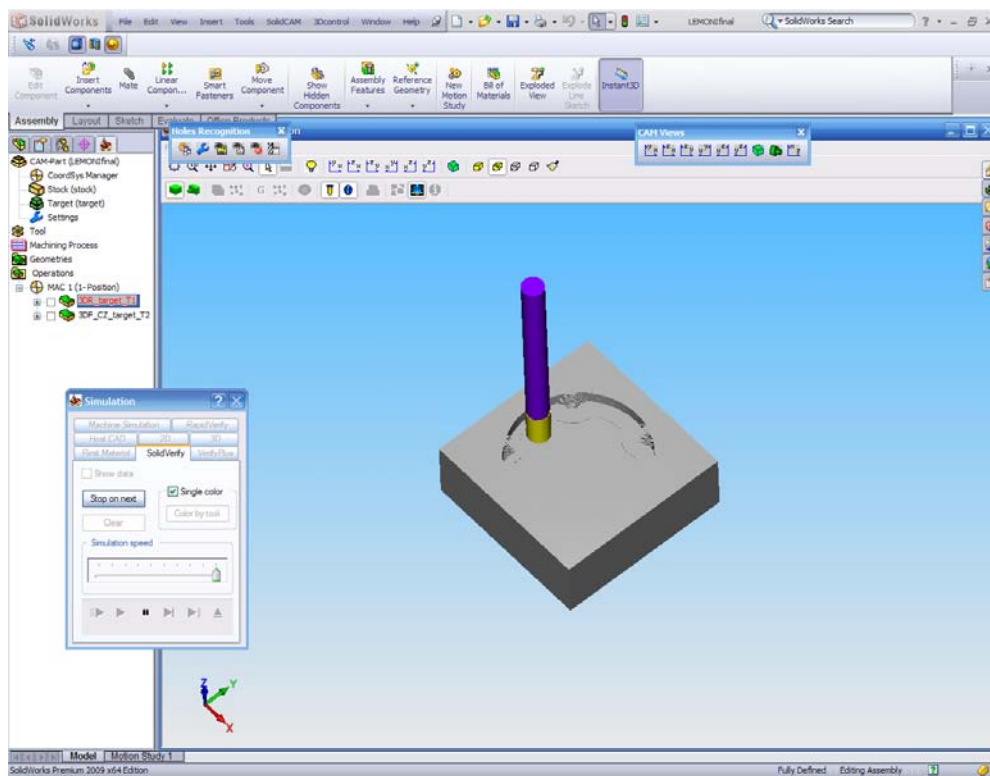
Φινίρισμα

Πάσο κοπής : 0.1 mm

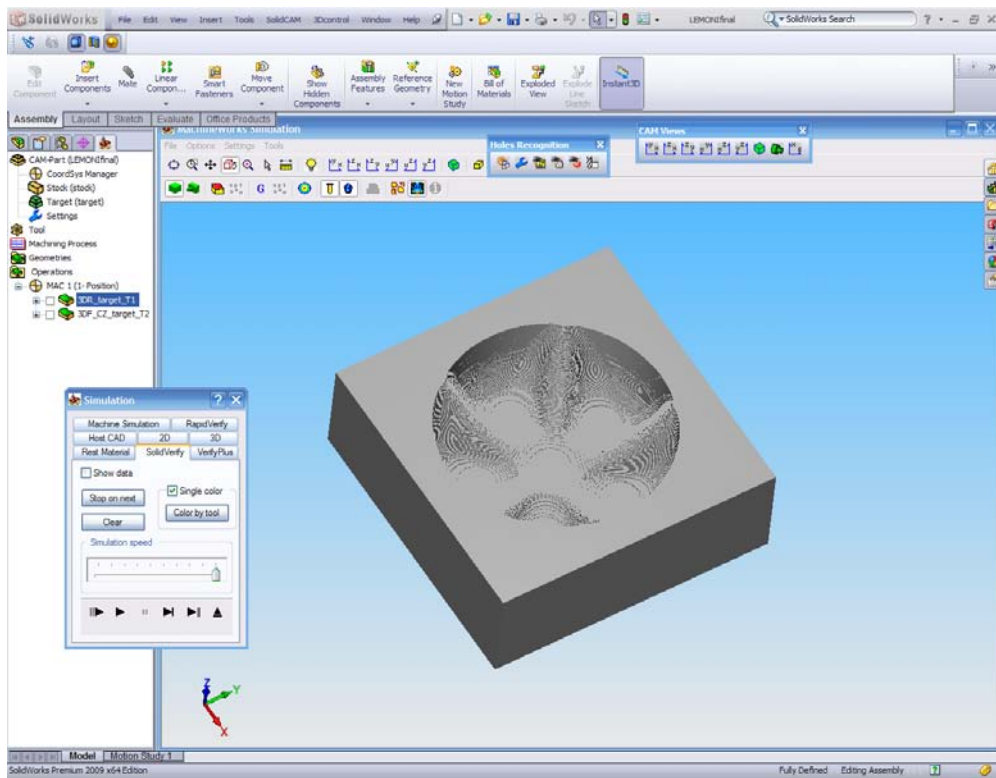
Στροφές: 15000 RPM

Σφαιρικό κονδύλι $D = 3 \text{ mm}$

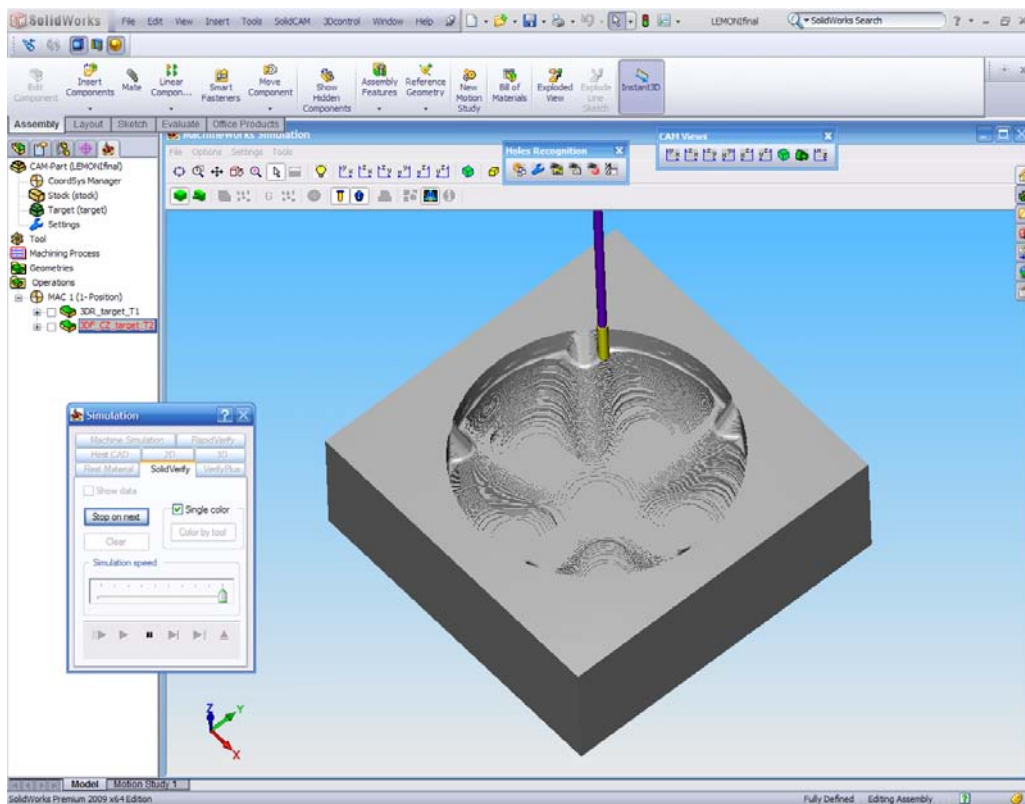
Πρόωση κοπής : 25 mm/sec



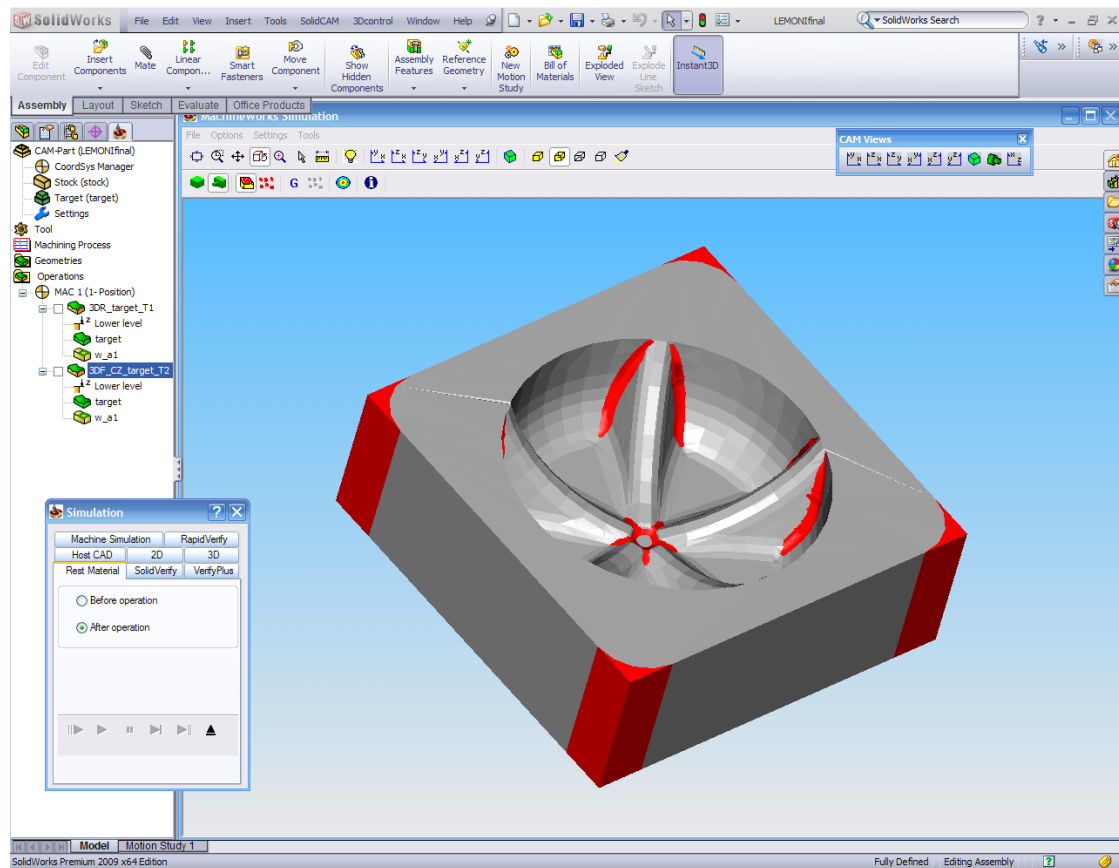
Σχήμα 5.31 Προσομείωση του ξεχονδρίσματος στο SolidCAM



Σχήμα 5.32 Ολοκλήρωση της προσομοίωσης του ξεχονδρίσματος στο SolidCAM



Σχήμα 5.33 Προσομοίωση της αποπεράτωσης στο SolidCAM



Σχήμα 5.34 Υπόλειμμα της «ψηφιακής» κατεργασίας στο SolidCAM

Όπως είναι σαφές και από τα σχήματα που προηγήθηκαν από περιβάλλον Solidcam, λόγω της διαμέτρου του κοπτικού φινιρίσματος που χρησιμοποιήθηκε (3mm), αναμένεται να εναπομένει μετά την κατεργασία κάποιο «υπόλειμμα» υλικού στο τελικό αντικείμενο. Για να εξαλειφθεί αυτό, θα απαιτείτο ιδιαίτερα μικρής διαμέτρου (έως 1mm) και μεγάλου μήκους (τουλάχιστον 57mm) κοπτικό εργαλείο, που δεν είναι εύκολο να βρεθεί σε μια συνήθη γκάμα κοπτικών, ειδικά για σκοπούς κατασκευής πρωτοτύπου. Η επίδραση και η τάξη μεγέθους του «υπολείμματος» αυτού στη συνολική απόδοση της επιφάνειας και της πιστότητας του αντικειμένου, αποτελεί στόχο διαπίστωσης και αναλύεται-σχολιάζεται στο σχετικό κεφάλαιο συμπερασμάτων.

Εν συνεχεία το αντικείμενο κατασκευάστηκε περισσότερες από μια φορές, σε Cibatool 4ST και σε Renshape BM70, στη μηχανή MT-Profi.



Σχήμα 5.35 Το δοκίμιο από Renshape BM70



Σχήμα 5.36 Το δοκίμιο από Cibatool 4ST

Εδώ φυσικά δεν ήταν δυνατόν να παρθούν μετρήσεις συγκεκριμένων διαστάσεων. Αυτό που ενδιέφερε, ήταν να μπορεί να διαπιστωθεί η πιστότητα της απόδοσης της μορφής στα πραγματικά αντικείμενα, εν συγκρίσει με τα ονομαστικά CAD αρχεία από τα οποία προήλθαν (Inspection Process).

Για να καταστεί αυτό χρησιμοποιήθηκε το laser scanner της φορητής CMM μηχανής FARO ARM Platinum του Εργαστηρίου ΤΚΠ, τεχνικές πληροφορίες για την οποία δίνονται σε επόμενη παράγραφο σε συνδυασμό με εξειδικευμένο λογισμικό ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας GEOMAGIC, το Geomagic Qualify v.11, περιορισμένη διάρκειας άδεια χρήσης του οποίου ευγενικά παραχώρησε προς το Εργαστήριο ΤΚΠ για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας η εταιρία αντιπροσώπευσης του στην Ελλάδα, INFOCAD S.A.

Αξίζει τέλος σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι για την διαπίστωση της αποδιδόμενης από την επιτραπέζια κλίμακας κατεργασία φρεζαρίσματος ποιότητα επιφανείας στα αντικείμενα, ελήφθησαν από όλα τα τεμάχια-δοκίμια της παρούσας παραγράφου που κατασκευάστηκαν ενδεικτικές τραχυμετρήσεις, με κατάλληλο εξοπλισμό τραχυμέτρου επαφής που παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο. Τα αποτελέσματα για την ποιότητα επιφάνειας που προέκυψε, επίσης παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

5.9. Συνθήκες & Μέσα Διεξαγωγής Μετρήσεων- Ποιοτικού Ελέγχου - Ψηφιακής Αποτύπωσης - Τραχυμέτρησης

Στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθοριστικό ρόλο έπαιξαν οι μετρήσεις των κατασκευαζόμενων δοκιμίων και αντικειμένων, η αποτίμηση της ακρίβειας και πιστότητάς τους και η διαπίστωση της τελικής ποιότητας επιφανειών τους. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί για τους σκοπούς αυτούς χρησιμοποιήθηκαν μέσα, εξοπλισμός και λογισμικό του εργαστηρίου ΤΚΠ ΕΜΠ, αλλά και λογισμικό που ευγενικά παραχωρήθηκε από τις κατασκευάστριες εταιρίες-αντιπροσώπους (GEOMAGIC Qualify).

Για τις συνθήκες τα μέσα και τα χρησιμοποιούμενα λογισμικά μετρήσεων και ποιοτικού ελέγχου ίσχυσαν γενικά τα παρακάτω:

5.9.1. Μετρήσεις με Μηχανή CMM DEA Mistral

Οι εργασίες που αφορούν σε μετρήσεις των κρίσιμων διαστασιολογικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών (διαστάσεις μεγέθους, συντεταγμένες θέσης, σφάλμα μορφής, κ.λπ.) των εξαρτημάτων που ελέγχθηκαν, πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση σταθερής μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (*Coordinate Measuring Machine - CMM*) τύπου γέφυρας, που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Εργαλείων του Τομέα ΜΚ&ΑΕ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.



Σχήμα 5.37 Η μηχανή CMM είναι τύπου *Mistral 070705*

Η εν λόγω μηχανή CMM είναι τύπου *Mistral 070705*, s/n 00808 της DEA – B&S με αβεβαιότητα μέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360–2:

$$U3 (\mu\text{m}) = \text{MPE}_E = 3 + L (\text{mm})/250 \text{ (Volumetric length measuring uncertainty)}$$

$$R (\mu\text{m}) = \text{MPE}_P = 3 \text{ (Volumetric probing uncertainty)}$$

όπου L (σε mm) η μετρούμενη διάσταση και U3, R (σε μm) η αβεβαιότητα στο χώρο μέτρησης, ανεξαρτήτως διευθύνσεως, κατά τη μέτρηση διαστάσεων και σφάλματος μορφής αντίστοιχα. (Πιστοποιητικό διακρίβωσης MI808070705297 – DEA spa).

Για την καταγραφή των σημείων χρησιμοποιήθηκε κεφαλή Renishaw PH10M (s/n L96618) σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου TP2 (s/n M50597) του οίκου Renishaw Ltd., επέκταση μήκους 10 mm και απολήξει (tip) τύπου “ruby-ball tip” μήκους 20 mm και διαμέτρου 2 mm (*tip2 by 20*).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του εργαστηρίου ΤΚΠ, ο οποίος είναι θερμοκρασιακά σταθερός (θερμοκρασία χώρου: $20 \pm 1.5^\circ \text{C}/12\text{h}$, καταγραφικά ελέγχου: TESTO 175H2, s/n 20038973/408, ακρίβεια ένδειξης $\pm 0.2^\circ \text{C}$ και LT Lutron TM 916, (s/n P842776) $\pm [1\% +1^\circ \text{C}]$). Ο χώρος είναι επίσης ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης κ.α. παραγόντων που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων .

Κατά τη συνολική διεξαγωγή και επεξεργασία των μετρήσεων με την παραπάνω μηχανή CMM χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **PC - DMIS v. 3.7 MR2** του οίκου Wilcox Assoc. Inc. στο οποίο οι αλγόριθμοι μαθηματικής προσαρμογής των μετρούμενων σημείων σε γεωμετρικά στοιχεία (features) είναι πιστοποιημένοι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360-5 από το ινστιτούτο PTB (Physicalish-Technische Bundesanstalt).

Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης σταθερότητας και επαναληψιμότητας κατά την ψηφιακή αποτύπωση, η τοποθέτηση, στήριξη και πρόσδεση του εξαρτήματος στην τράπεζα εργασίας της μηχανής CMM έγινε με ειδικά διαμορφωμένη ιδιοσυσκευή συγκράτησης που συγκροτήθηκε για το σκοπό αυτό.

5.9.2. Μετρήσεις – Αποτυπώσεις επιφάνειας με τη μηχανή FARO ARM PLATINUM

Οι μετρητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν με στόχο τον έλεγχο απόκλισης μορφής έγιναν με τον φορητό αρθρωτό μετρητικό βραχίονα FARO PLATINUM ARM (2007), επτά βαθμών ελευθερίας, με εργόσφαιρα μέτρησης 2.4m και ακρίβεια μέτρησης $\pm 0.030\text{mm}$ (ANSI B89), υποστηριζόμενο από κατάλληλο λογισμικό μέτρησης / ψηφιακής αποτύπωσης (Geomagic Qualify), το οποίο ευγενικά παραχωρήθηκε από την εταιρία GEOMAGIC και τον αντιπρόσωπό της INFOCAD S.A. με άδεια περιορισμένης διάρκειας για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Για την λήψη σημείων χρησιμοποιήθηκε η laser camera FARO LASER LINE PROBE υποστηριζόμενη από κατάλληλο λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης (Geomagic Studio v.9).

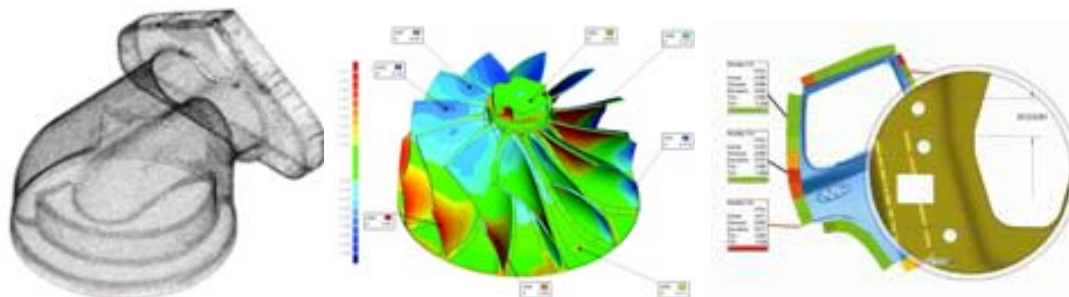


Σχήμα 5.38 Η laser camera FARO LASER LINE PROBE

5.9.3. Επεξεργασία Αποτυπώσεων Δοκιμίου Ελεύθερης επιφάνειας σε περιβάλλον GEOMAGIC QUALIFY

Το λογισμικό πακέτο GEOMAGIC Qualify, είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο εργαλείων για αξιοποίηση δεδομένων από ψηφιοποίηση αντικειμένων σε μορφή νέφους σημείων (συνήθως με laser scanning), με τελικό στόχο την ποιοτική τους αξιολόγηση όσον αφορά την πιστότητα των αποδιδόμενων επιφανειών εν συγκρίσει με τις ονομαστικές τους μορφές. Πρόκειται ουσιαστικά δηλαδή για εργαλείο **ποιοτικού ελέγχου (inspection)** σε μεθόδους παραγωγής.

Εκκινεί από νέφος σημείων, ή ακόμα και από μοντέλο πολυγώνων ή και επιφανειών που έχουν προκύψει από τα παραπάνω νέφη σημείων με κατάλληλη επεξεργασία στο «αδελφό» λογισμικό GEOMAGIC Studio. Γίνεται εισαγωγή σε μορφή ουδέτερου πρωτοκόλλου CAD του ονομαστικού αρχείου του αντικειμένου και μετά από κατάλληλη συσχέτιση θέσης των δύο ομάδων πληροφορίας, και ενδεχομένως πιθανό φιλτράρισμα αυτών, υπολογίζεται πλήρως και καθολικά για το αντικείμενο η ανά θέση απόκλιση του πραγματικού αντικειμένου από το ονομαστικό του. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται γραφικά, μπορούν να υπολογισθούν και παρασταθούν σε 3 διαστάσεις ή και σε επιλεγμένες τομές 2 διαστάσεων του αντικειμένου και τέλος για αυτές εξάγεται πλήρης αναφορά με πλήρη στατιστική επεξεργασία (full report). Τέλος είναι δυνατόν να προσδιορισθούν και γεωμετρικές ανοχές σε μαθηματικά ορισμένα μορφολογικά στοιχεία που μπορεί να ενσωματώνει το αντικείμενο (π.χ. επίπεδα, οπές, κυλίνδρους κλπ).



Σχήμα 5.39 Χαρακτηριστικές εικόνες του Geomagic qualify

Geomagic Qualify Technical Specifications

Scan Data Formats

Geomagic Qualify supports all 3D digitizers, cameras, and scanners in XYZ / ASCII format and handles ordered and unordered surface and volume data.

3PI - ShapeGrabber	ICV - Solutionix
AC - Steinbichler	MET, MTN - Metron
ASC - generic ASCII	MGP - Laser Design
BIN, SWL - Perceptron	NET - InSpeck
BRE - Breuckmann	OPD - Optimet
CDK, CDM, RGV, RVM, WVD -	OPT - Open Technologies
Konica Minolta	PIX - Roland
COP - Pulsetech	PMJX - 3D Digital
CWK - Kreon	SAB2 - 3D Scanners
DBT - Digibotics	SCN - LD/Idatasculpt
G3D, SURF - GOM	SCN - NextEngine
GPD - Geomagic	XYZ - Opton
GTI - Genex	XYZN - Cognitens
HYM - Hymarc	

Polygon Import/Export

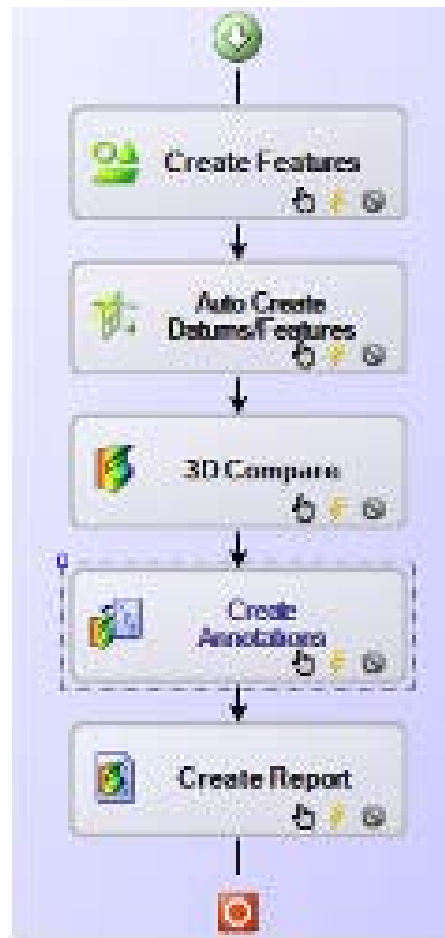
3DS	OBJ
DXF	PLY
IGS	STL
LWO	VRML
NAS	WRP

CAD Import/Export

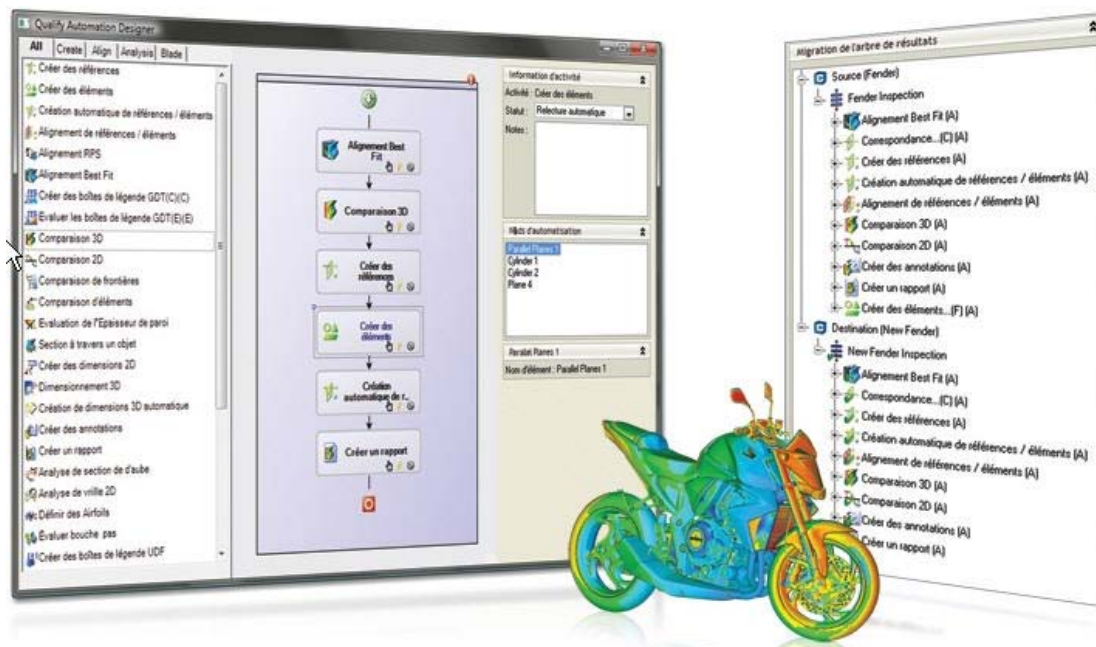
IGES	Pro/E PRT
STEP 203/214	SAT
Neutral	Parasolid x_t and x_b
VDA	

Available Translators

CATIA V4 & V5, Unigraphics, Solidworks



Σχήμα 5.40 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και ακολουθούμενη διαδικασία.



Σχήμα 5.41 Χαρακτηριστικές εικόνες του Geomagic qualify

5.9.4. Τραχυμετρήσεις δοκιμίων – αντικειμένων με το Τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+

Για τη διαπίστωση της ποιότητας επιφάνειας - τραχύτητα των δοκιμίων και αντικειμένων που κατασκευάστηκαν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο επαφής Taylor Hobson Surtronic 3+, που διαθέτει το εργαστήριο ΤΚΠ του ΕΜΠ.

Λεπτομερείς τεχνικές προδιαγραφές του ο αναγνώστης μπορεί να βρει στο τεχνικό εγχειρίδιο, [5.12] .



Σχήμα 5.42 Το τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+

Για την αποτίμηση της ποιότητας επιφανειών, επελέγη να μετρηθεί στα αντικείμενα σε διάφορες θέσεις και προσανατολισμούς το ευρέως διαδεδομένο μέγεθος της μέσης τραχύτητας Ra, [5.15].



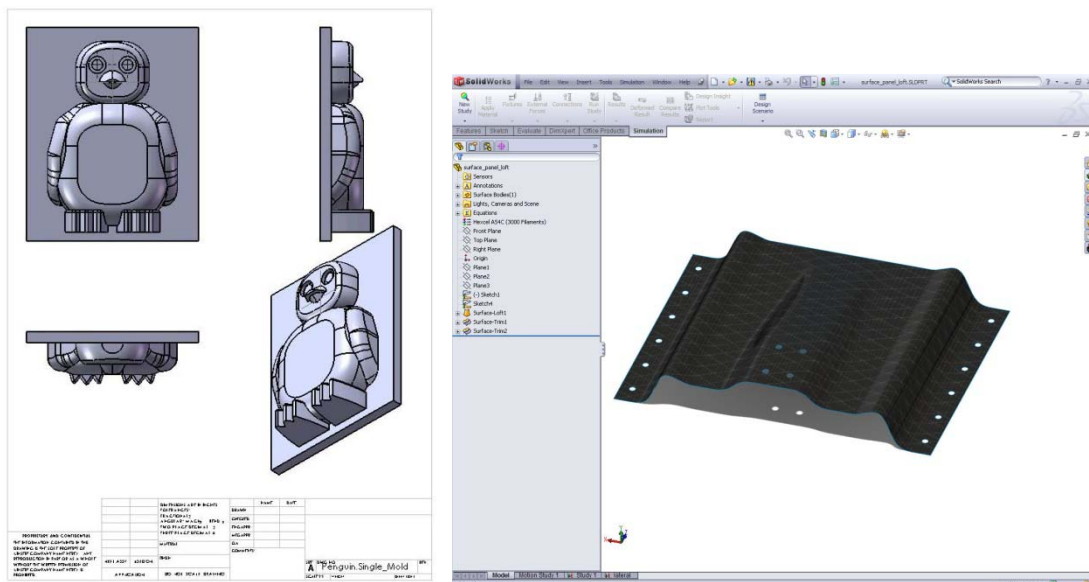
Σχήμα 5.43 Τραχυμέτρηση με το τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+



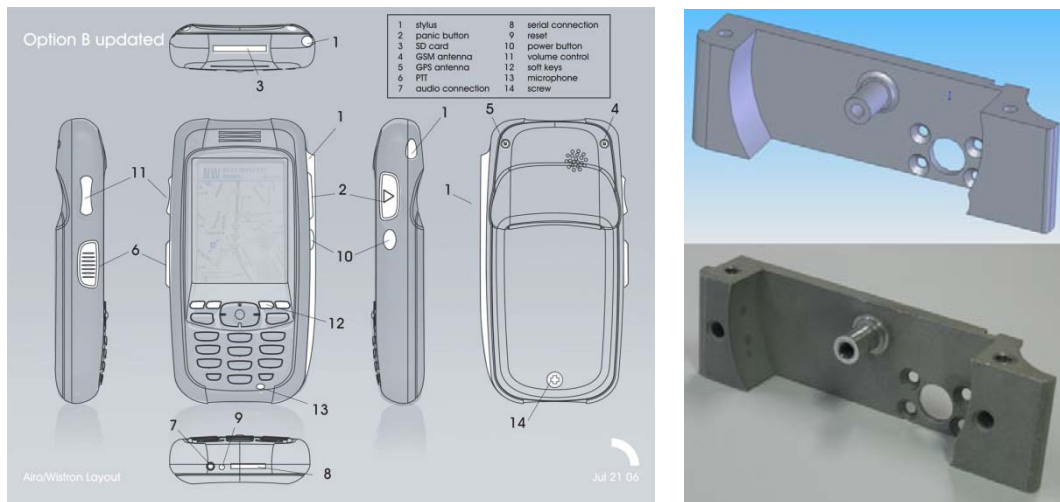
Σχήμα 5.44 Τραχυμέτρηση με το τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+

5.10 Απόπειρα κατασκευής πλήρως τρισδιάστατου αντικειμένου με τη φρέζα COMAGRAV Mt-Profi

Στις παραγωγικές διαδικασίες που χρησιμοποιούν κατεργασίες φρεζαρίσματος, αν και σε πολλές περιπτώσεις κατεργάζονται τρισδιάστατες μορφές σε ένα πρόσωπο (π.χ. κατασκευή μητρών χύτευσης, με ξεχωριστά αντικείμενα για core & cavity), συχνά χρειάζεται επίσης να κατασκευασθούν πλήρως τρισδιάστατα αντικείμενα (full 3D objects), αντικείμενα δηλαδή διαμορφωμένα-κατεργασμένα σε κάθε τους πλευρά, εσωτερικά και εξωτερικά, ώστε να αποτελούν ένα τελικό αντικείμενο – προϊόν.



Σχήμα 5.45 Κατεργασίες με ένα πρόσωπο



Σχήμα 5.46 Πλήρως τρισδιάστατα αντικείμενα- προϊόντα
(κατεργασία σε περισσότερα πρόσωπα)

Στην περίπτωση αυτή η κυριότερη δυσκολία έγκειται στο ότι απαιτείται τουλάχιστον μια φορά, η αναστροφή και ακριβής και ευθυγραμμισμένη επανατοποθέτηση του κατεργαζόμενου αντικείμενου στην τράπεζα της εργαλειομηχανής.

Επίσης πιθανώς να απαιτείται ο επανακαθορισμός του συστήματος συντεταγμένων επί του αντικείμενου για την κατεργασία του νέου «προσώπου», συνηθέστερα με κώδικα κοπής από CAM σε συμμετρική – αντικατοπτρική θέση.

Τέλος απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η πρώτη ύλη να έχει προετοιμαστεί-προκατεργασθεί σε μορφή όσο το δυνατόν κοντινότερη σε ένα «τέλειο» παραλληλεπίπεδο και να έχει διαστάσεις ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές του τελικού αντικείμενου, ώστε να μπορεί το τελικό αντικείμενο να «φιλοξενείται» σε ένα πλαίσιο συγκράτησης και υποστήριξης του από την πρώτη ύλη, χωρίς να καταρρέει κατά την κατεργασία. Επίσης σε επίπεδο CAD-CAM θα πρέπει να έχουν δημιουργηθεί και οι κατάλληλες δομές διασύνδεσης-συγκράτησης στο παραπάνω πλαίσιο της πρώτης ύλης

Στη συνήθη βιομηχανική πράξη, οι κατεργασίες δύο ή περισσότερων προσώπων με φρέζα επιτυγχάνονται με:

- Ιδιοσυσκευές συγκράτησης (fixtures) τύπου πλάκας (plate) ή κατεργασίας πολλαπλών αντικείμενων (Multistation) (Βλ. και Κεφ. 4), στην περίπτωση ευρείας βιομηχανικής παραγωγής.
- Άλλες συνδυασμένες ιδιοσυσκευές, με τα πλεονεκτήματά τους ή μειονεκτήματά τους κάθε φορά, όπως διαιρέτες, μέγγενες, πλακίδια και γωνιές, πλευρικούς περιοριστές (side stops) κλπ., στην περίπτωση πιο μεμονωμένων ή εξατομικευμένων αντικείμενων.

Στο Εργαστήριο ΤΚΠ του ΕΜΠ, σε επίπεδο ιδιοσκευών συγκράτησης για την CNC φρέζα, υπάρχουν σήμερα τα παρακάτω μέσα με τους ακόλουθους περιορισμούς για το κάθε ένα:

- Μέγγενη VERTEX μέγιστου ανοίγματος 80mm, πλάτους κεφαλών 47mm και ύψους συγκράτησης 30mm, με διακριτά πλάτη σύσφιξης (όχι συνεχή) και σπειροτομημένη τη μια κεφαλή (για προσαρμογή side stop).



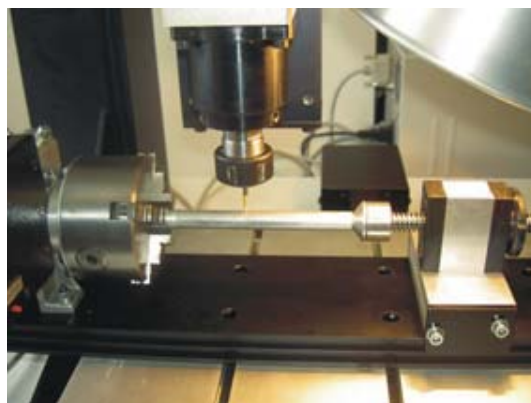
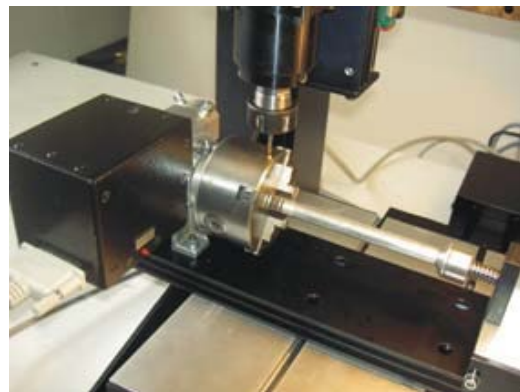
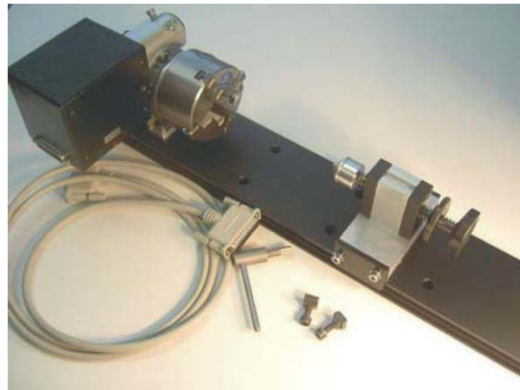
Σχήμα 5.47 Μέγγενη της εταιρείας Vertex

- Περιορισμένος αριθμός από συγκρατητήρες (clamps) τύπου T-Slot, σε διάφορα μήκη και ύψη, κυρίως πλαστικούς.



Σχήμα 5.48 Μηχανή Comagran της σειράς Mt Profi με δεμένα πλαστικά clamps στην τράπεζα της

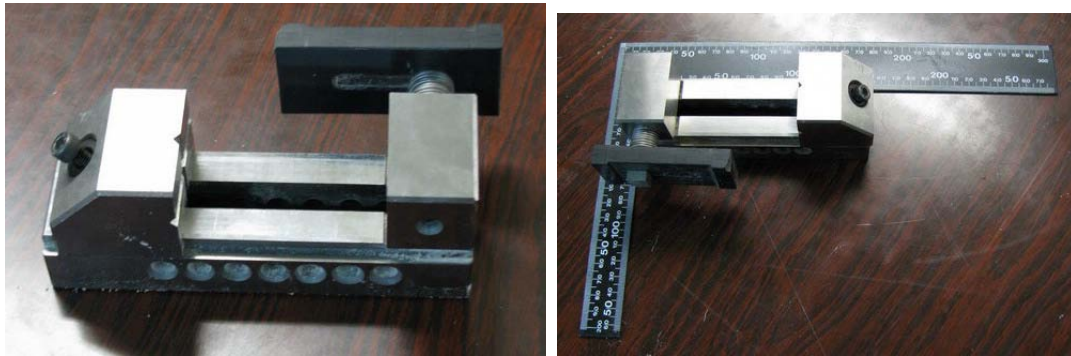
- Μέσα στο 2008, αποκτήθηκε από το Εργαστήριο ΤΚΠ επίσης και ένας διαιρέτης (περιστροφικός άξονας) που όμως δεν αποτέλεσε αντικείμενο στην παρούσα εργασία. Πέραν όμως αυτού γενικά οι διαιρέτες περιορίζουν γεωμετρικά από τη φύση τους το ωφέλιμο ύψος κατά Z της κατεργασίας σε λιγότερο από το μισό της πλήρους διαδρομής του άξονα κύριας ατράκτου (Z), εν προκειμένω για την MT-Profi, συμπεριλαμβανομένου και του μήκους κοπτικού σε τιμή μικρότερη των 40mm.



Σχήμα 5.49 Ο διαιρέτης της μηχανής Comagrav Mt Profi

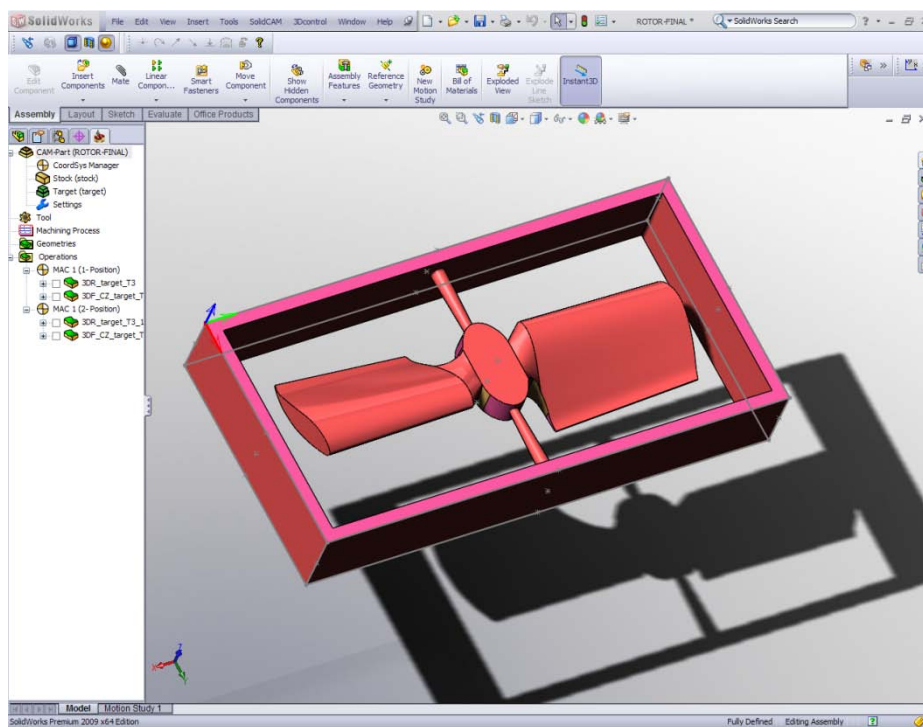
Είναι προφανές ότι για επιτυχημένη κατεργασία μορφών και αντικειμένων σε περισσότερα πρόσωπα οι παραπάνω ιδιοσκευές πρέπει στο μέλλον να συμπληρωθούν.

Για τη διαπίστωση όμως της εφικτότητας ή μη τέτοιων κατεργασιών με τα υφιστάμενα μέσα, επιχειρήθηκε η κατασκευή μιας full 3D μορφής προσομοιάζοντας σε προπέλα (propeller), με χρήση απλών στοιχείων ευθυγράμμισης της μέγγενης με τους κύριους άξονες της μηχανής (Απλός γωνιακός χάρακας), των βασικών clamps για την συγκράτηση της μέγγενης, απλού συμβατού σπειρώματος κοχλία με ροδέλες και clamp για χρήση ως side stop και απλών φύλλων χαρτιού ως προσαρμογείς-«μάγουλα» συγκράτησης της πρώτης ύλης στη διακριτού ανοίγματος υπάρχουσα μέγγενη.

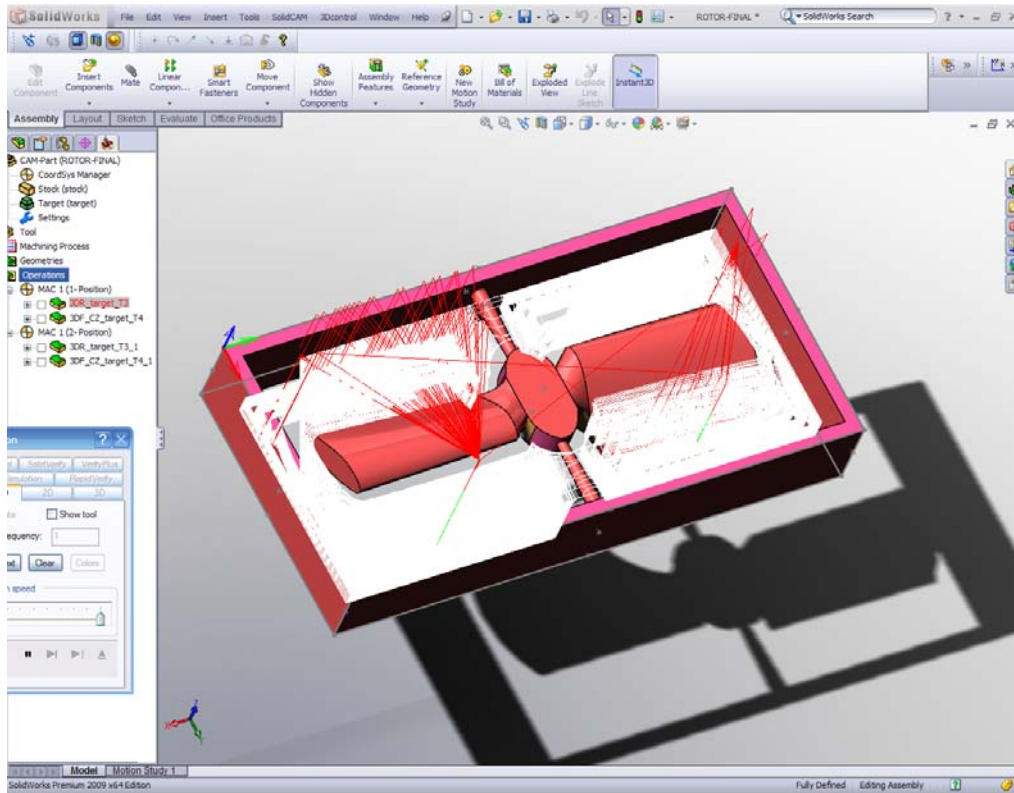


Σχήμα 5.50 Η μέγγενη του εργαστηρίου ΤΚΠ με αυτοσχέδιο side stop

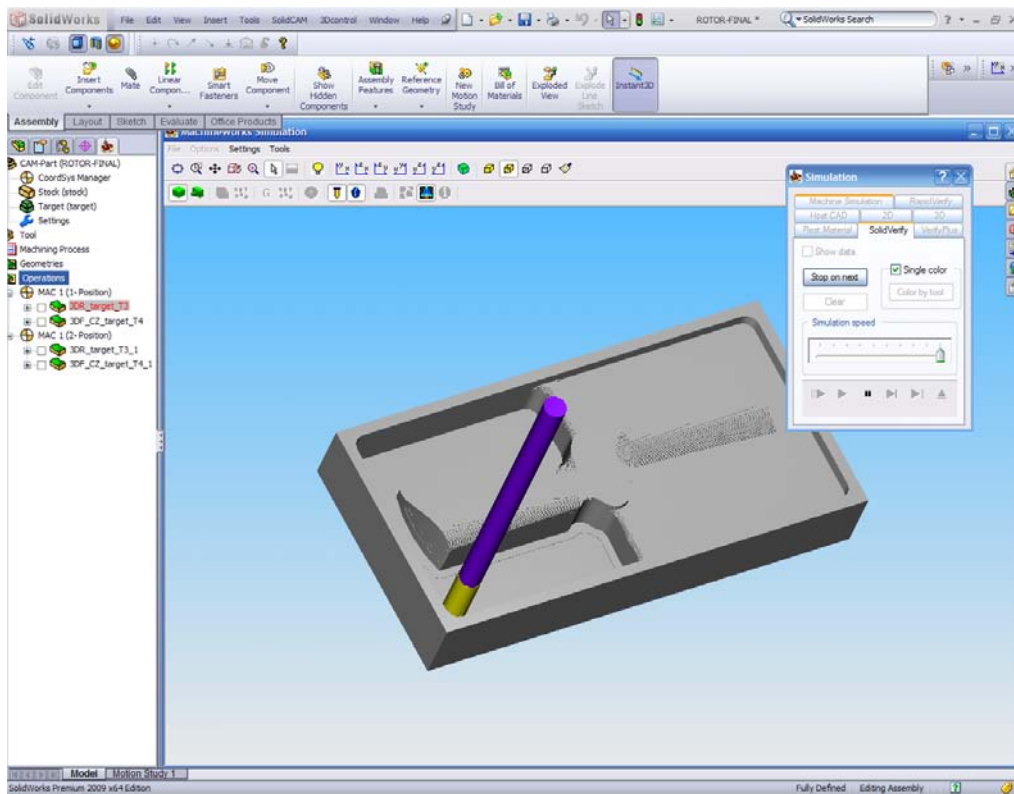
Σε επίπεδο CAD-CAM προετοιμάστηκαν τέσσερα (4) διακριτά προγράμματα-φάσεις κατεργασίας (Ξεχονδρίσματα – Φινιρίσματα), δύο ανά πρόσωπο κατεργασίας, ενώ στο αντικείμενο ενσωματώθηκαν δύο δομές σύνδεσής του με το πλαίσιο πρώτης ύλης στην κατεύθυνση του άξονα X.



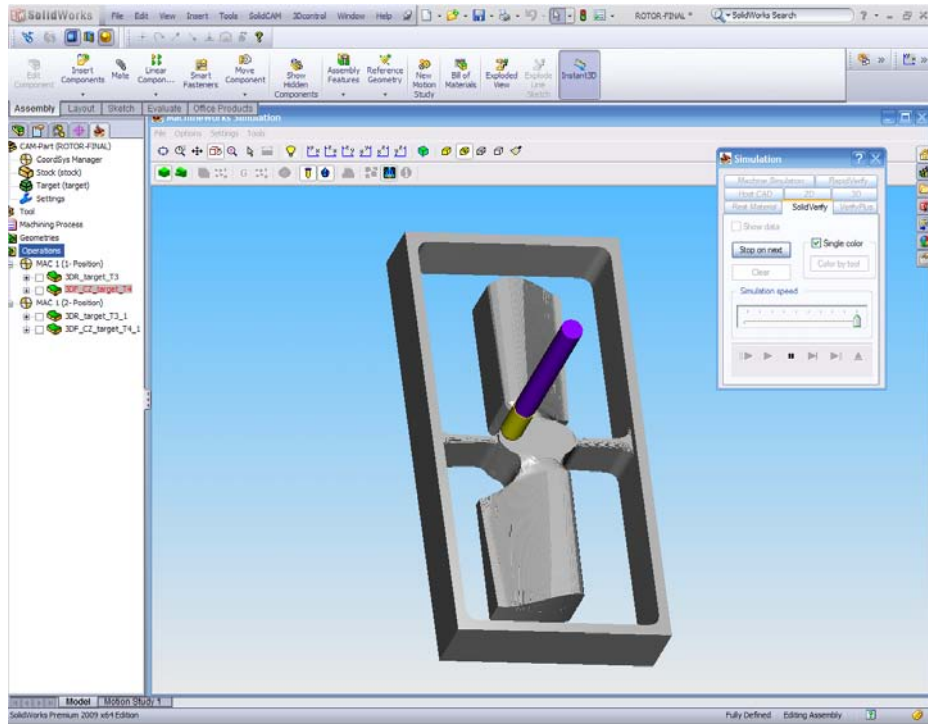
Σχήμα 5.51 Τροποποιημένο CAD μοντέλο με δυο δομές σύνδεσης με το πλαίσιο της πρώτης ύλης



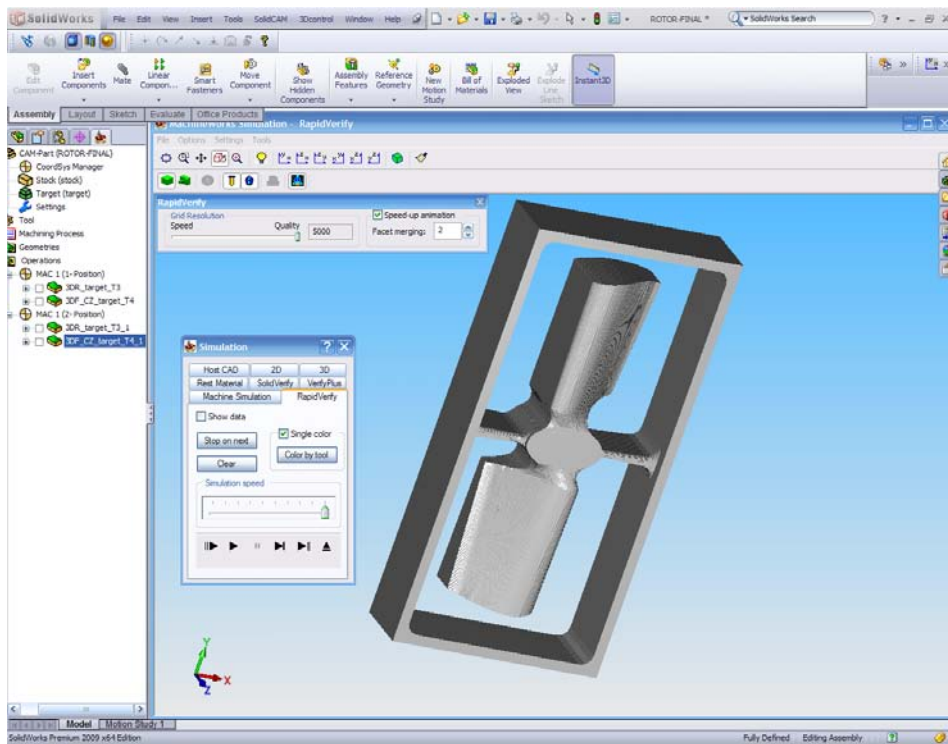
Σχήμα 5.52 Προσομοίωση της τροχιάς κοπτικού εργαλείου στο SolidCAM



Σχήμα 5.53 Προσομοίωση κοπής της μιας πλευράς (one face)



Σχήμα 5.54 Προσομείωση κοπής της πίσω πλευράς (two face)



Σχήμα 5.55 Τέλος προσομοίωσης (ξεχόνδρισμα – αποπεράτωση)

Εν συνεχεία επιχειρήθηκε η κατεργασία ξεχονδρίσματος-φινιρίσματος σε ένα πρόσωπο, με σκοπό να ακολουθήσει η αναστροφή και ανάλογη κατεργασία σε δεύτερο πρόσωπο για την επίτευξη της πλήρως τρισδιάστατης μορφής. Η διαδικασία όμως δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς καθώς σημειώθηκε θραύση της μιας από τις συνδέσεις του κατεργαζόμενου αντικείμενου με το πλαίσιο πρώτης ύλης.



Σχήμα 5.56 Το αποτέλεσμα της δοκιμής κοπής

Οι λόγοι που ερμηνεύουν το γεγονός αυτό αναλύονται σε σχετική παράγραφο του Κεφαλαίου 6, όπου προτείνεται και οι σχετικές λύσεις. Παρόλα αυτά κρίνεται ότι ακόμα και από αυτή την «αποτυχημένη» απόπειρα, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την βέλτιστη αξιοποίηση του υφιστάμενου εξοπλισμού.

5.11 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- 5.1] William E. Howard, Joseph C. Musto: “Introduction to solid modeling using Solidworks”, Mc Graw Hill 2006
- [5.2] David C.Planhard and Marie P.Planhard: “Drawing and Detailing with SolidWorks 2006”, Schroff Development Corporation 2006
- [5.3] SolidWorks User’s Guide, SolidWorks Corporation, 2009
- [5.4] SolidWorks Reference Guide, SolidWorks Corporation, 2009
- [5.5] Matt Lombard: “SolidWorks 2007 Bible”, Wiley Publishing, Inc 2007
- [5.6] SolidCAM2008 R12 Milling Training Course 3D Milling
- [5.7] SolidCAM2008 R12 Milling Training Course 2.5D Milling
- [5.8] SolidCAM 2008R12 Recordings (video tutorials)
- [5.9] SolidCAM 2008R12 Milling User Guide
- [5.10] SolidCAM 2008R12 HSM Module User Guide
- [5.11] SolidCAM 2008R12 Advanced Training Course
- [5.12] Sutronic 3+ Operator’s Handbook, Taylor Hobson Precision, Publication No. THP-HB-103 issued February 1993
- [5.13] SolidCAM GPPTool User Guide 2005
- [5.14] S. Polydoros, M.Sfantsikopoulos, “On the accuracy performance of the LOM technology”, 10th European Conference on RP&M/Euro RP 2001 Conference, Paris, France
- [5.15] Μ.Μ Σφαντζικόπουλου , Ε.Δ. Παπαδανιήλ : «Μηχανολογικό Σχέδιο» , έκδοση Ε.Μ.Π Αθήνα 2004
- [5.15] www.SolidCAM.com
- [5.16] www.Solidworks.com
- [5.17] www.alfasolid.gr

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

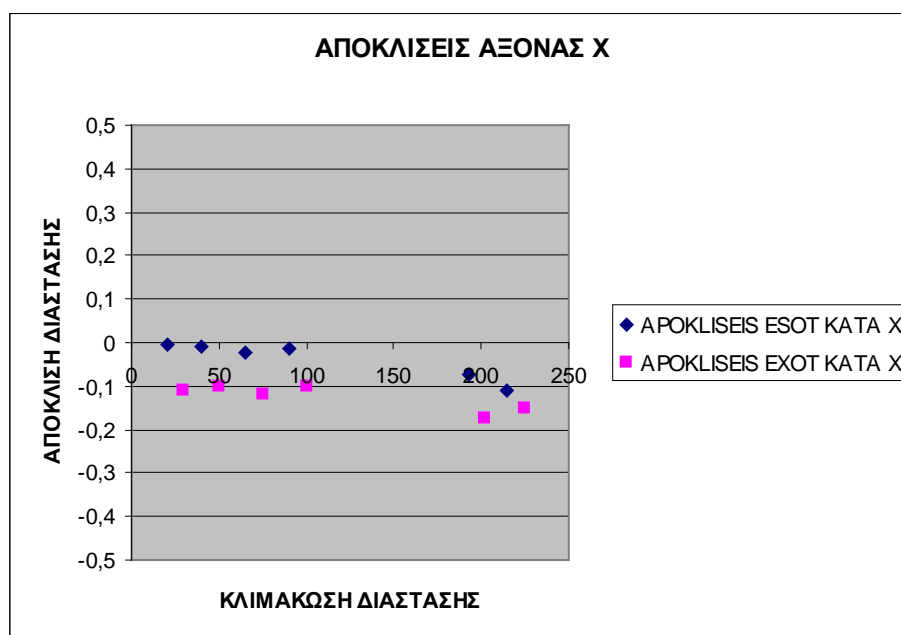
6.1 Αποτίμηση Αποτελεσμάτων αποδιδόμενης ακρίβειας διαστάσεων και ποιότητας επιφάνειας - Συμπεράσματα

Παρακάτω κατά περίπτωση παρουσιάζονται, σχολιάζονται, αποδίδονται πιθανές αιτίες και συγκρίνονται με τη μέθοδο LOM, τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που ελήφθησαν για τα δοκίμια της παραγράφου 5.8 της παρούσας εργασίας.

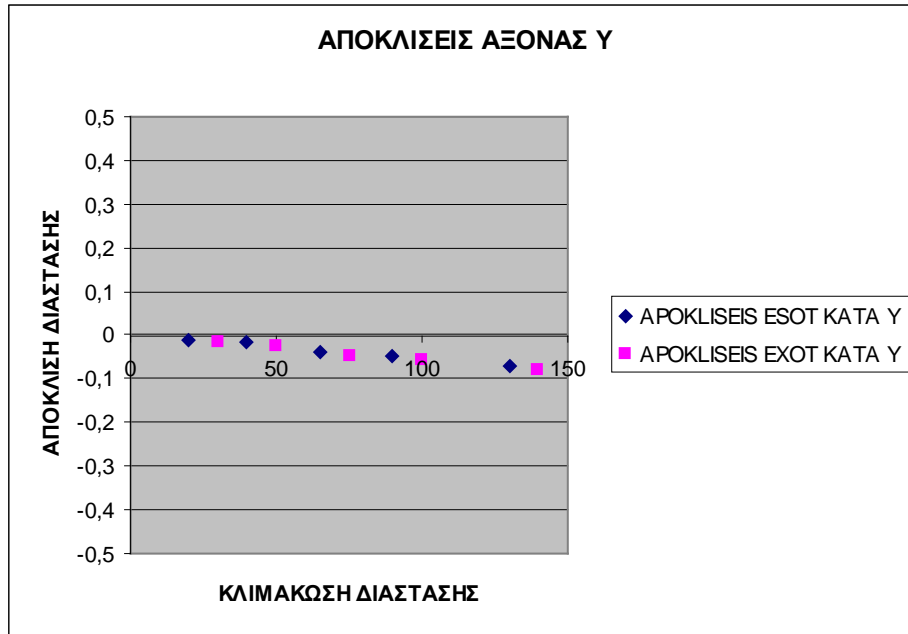
6.1.1 Δοκίμιο για την ακρίβεια στο επίπεδο XY

Διαγράμματα

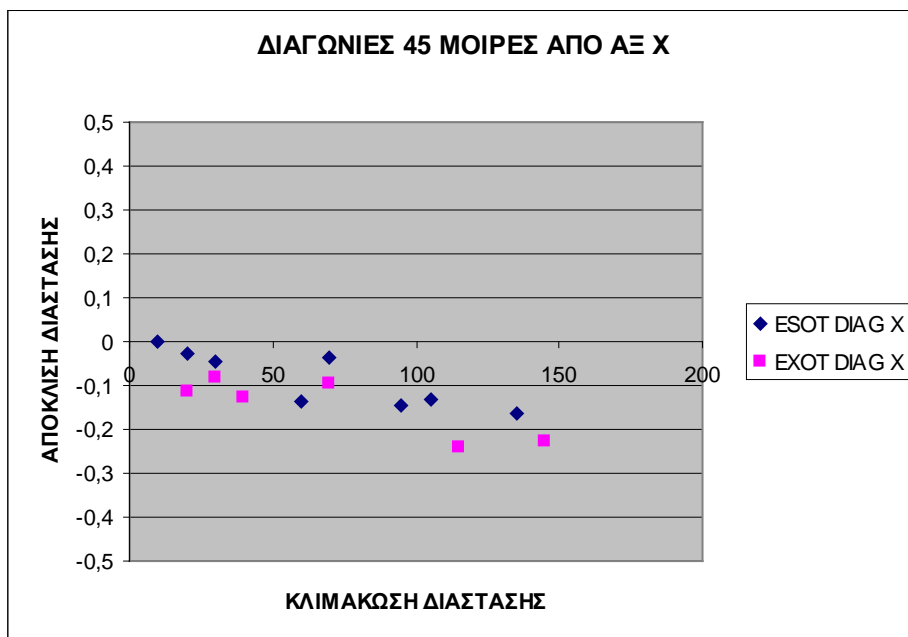
Από την επεξεργασία σε περιβάλλον Excel των μετρήσεων των διαστασιολογικά κλιμακούμενων διαστάσεων του δοκιμίου για διαπίστωση της αποδιδόμενης ακρίβειας κατά το επίπεδο XY, που ελήφθησαν από τη CMM DEA Mistral προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα αποκλίσεων διαστάσεων, ανά μετρούμενη θέση.



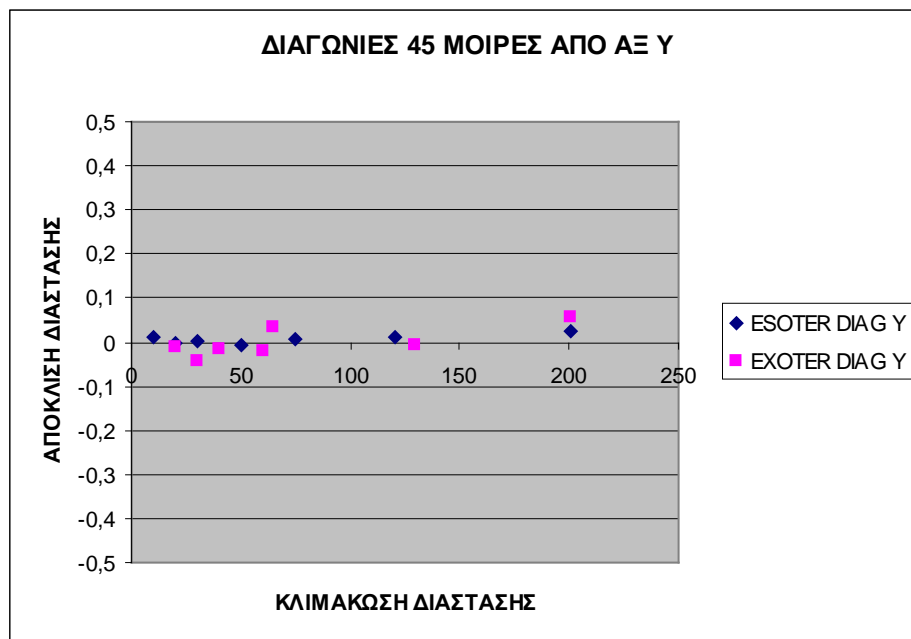
Διάγραμμα 6.1 Αποκλίσεις άξονα X (τεμάχιο XY)



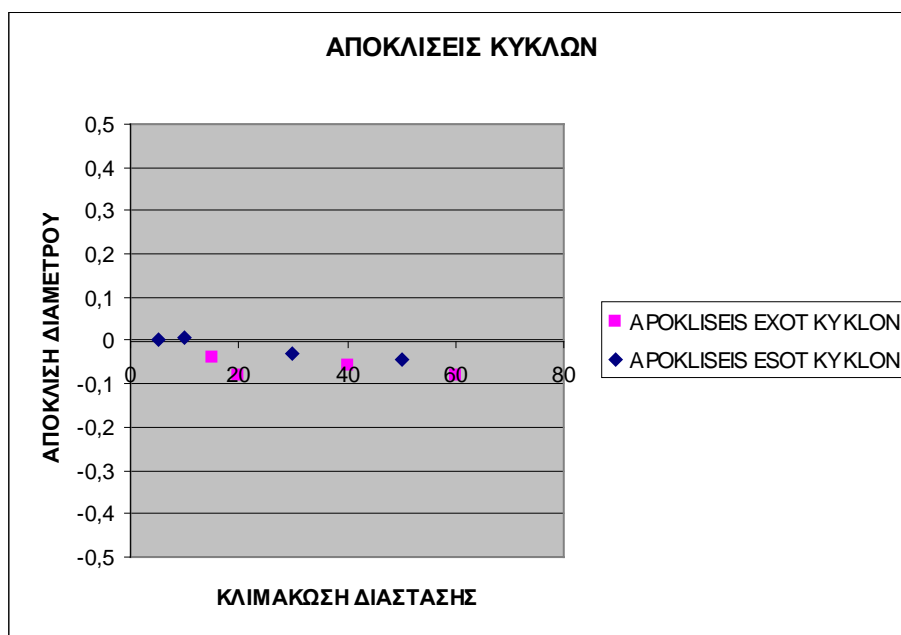
Διάγραμμα 6.2 Αποκλίσεις άξονα Υ (τεμάχιο ΧΥ)



Διάγραμμα 6.2 Αποκλίσεις διαγωνίων 45° από άξονα Χ (τεμάχιο ΧΥ)



Διάγραμμα 6.3 Αποκλίσεις διαγωνίων 45° από άξονα Y (τεμάχιο XY)

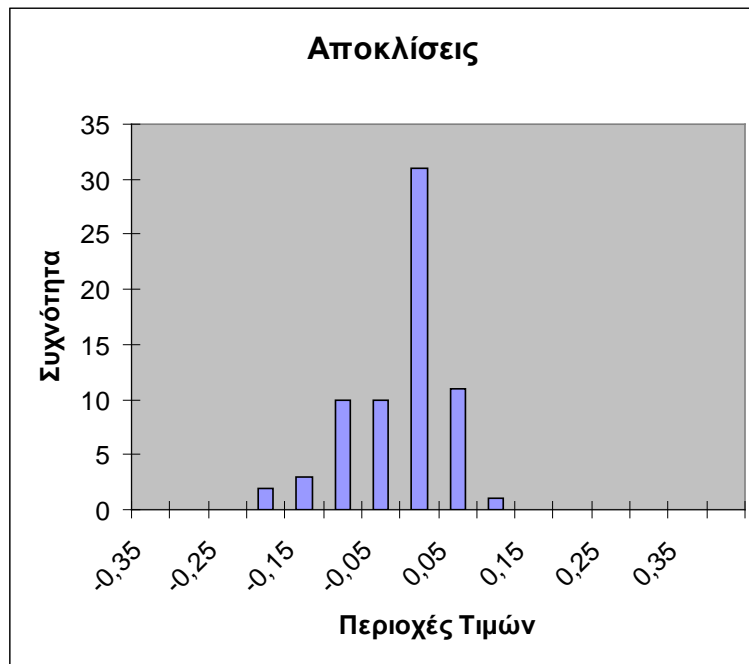


Διάγραμμα 6.4 Αποκλίσεις κύκλων (τεμάχιο XY)

Στα παραπάνω διαγράμματα παρίσταται η μετρημένη απόκλιση κάθε εσωτερικής ή εξωτερικής διάστασης σε σχέση με την ονομαστική της τιμή.

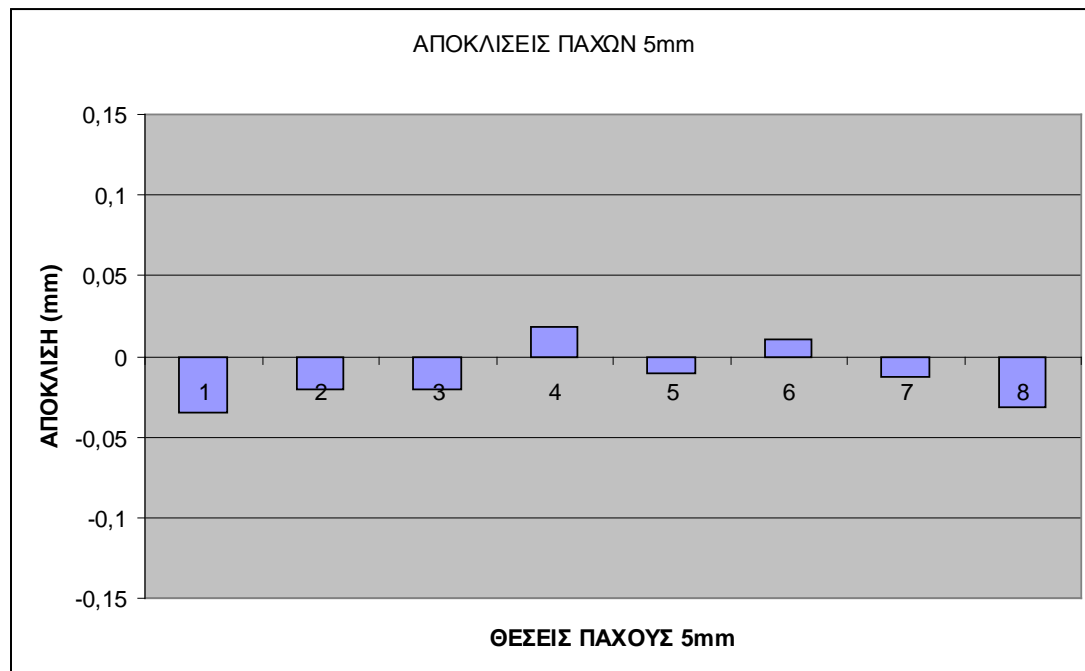
Όλες μαζί οι παραπάνω αποκλίσεις όλων των διαστάσεων, εσωτερικών ή εξωτερικών και γραμμικών ή κυκλικών, αν κατανεμηθούν στατιστικά ανά συχνότητα εμφάνισής τους μεταξύ της περιοχής (-0,35 έως 0,35mm) σε ίσα διαστήματα των 0,05mm, προκύπτει το παρακάτω χαρακτηριστικό ιστόγραμμα.

Διάστημα	Συχνότητα
-0,35	0
-0,3	0
-0,25	0
-0,2	2
-0,15	3
-0,1	10
-0,05	10
0	31
0,05	11
0,1	1
0,15	0
0,2	0
0,25	0
0,3	0
0,35	0
More	0



Διάγραμμα 6.5 Ιστόγραμμα αποκλίσεων

Τέλος, τα αποτελέσματα μετρήσεων επί του δοκιμίου σε οκτώ διαφορετικές θέσεις με σταθερό πάχος 5mm, δίνουν τα αποτελέσματα αποκλίσεων του παρακάτω διαγράμματος.



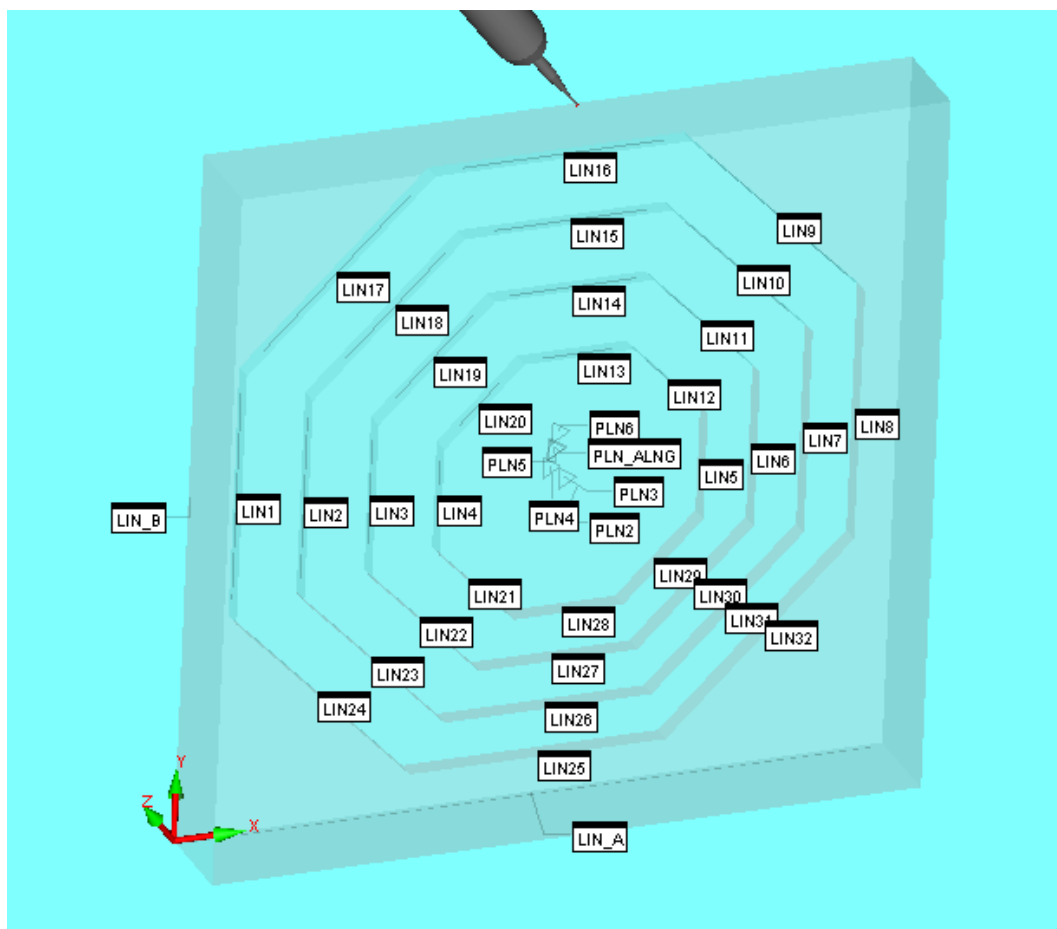
Διάγραμμα 6.6 Αποκλίσεις παχών 5mm (τεμάχιο XY)

Σχολιασμός-Συμπεράσματα

Από τη μελέτη – αξιολόγηση των διαγραμμάτων για την απόδοση διαστάσεων στους άξονες του επιπέδου XY προκύπτει:

- Απόλυτη τιμή μέγιστης εμφανιζόμενης απόκλισης σε όλο το δοκίμιο **0,239mm**. Η απόκλιση υφίσταται με αρνητικό πρόσημο (απομείωση διάστασης) σε ονομαστική εξωτερική διάσταση 115mm διαγώνιας κατεύθυνσης 45 μοιρών ως προς X.
- Παρόμοια συμπεριφορά (τάση) και με πολύ μικρή έως καθόλου απόσταση μεταξύ τους (στα διαγράμματα) εσωτερικών και εξωτερικών αποκλίσεων, ανά μετρούμενη κατεύθυνση-άξονα.
- Για περιοχές τιμών διαστάσεων έως 100mm (ανεξαρτήτως είδους ή κατεύθυνσης) καμιά απόκλιση μεγαλύτερης απόλυτου τιμής από 0,15mm.
- Παρά την παρεμβαλλόμενη κίνηση για την δημιουργία τους, πολύ καλό αποτέλεσμα σε όλους τους κύκλους (Εσωτερικούς-εξωτερικούς) με μέγιστη παρατηρούμενη απόλυτη απόκλιση **μικρότερη από 0,1mm**.
- Πάρα πολύ καλές επιδόσεις στην απόδοση του σταθερού πάχους των 5mm σε διάφορες θέσεις με μέγιστη απόλυτη μετρημένη απόκλιση στις οκτώ (8) θέσεις **0,035mm**.
- Η κατανομή των αποκλίσεων που μετρήθηκαν συνολικά στο δοκίμιο δείχνει να έχει μέση τιμή στην περιοχή 0 έως 0,05mm, αλλά με μια μεγαλύτερη τάση της κατανομής προς τις αρνητικές τιμές, που απομειώνουν την ονομαστική διάσταση, Διάγραμμα 6.5.
- Σύμφωνα με το ISO 286 / DIN 7151 και τις παρατηρούμενες επί του δοκιμίου αποκλίσεις, στην εργαλειομηχανή CNC COMAGRAV MT-Profi θα μπορούσε να αποδοθεί ποιότητα **IT12** για την μία και μόνη χειρότερα παρατηρημένη περίπτωση, ή **IT 10 με 11**, αν αξιολογηθεί σύμφωνα με τη γενικότερη στατιστικά τεκμηριωμένη συμπεριφορά της. Όπως και να έχει οι τιμές αυτές είναι εντός των γενικά παραδεκτών τιμών για φρεζάρισμα (milling - IT 7 έως 14), [5.15], και κρίνεται ικανοποιητική ειδικά για χρήσεις κατασκευής πρωτοτύπων.

6.1.2 Δοκίμιο για την ακρίβεια στο επίπεδο XY και στον άξονα Z



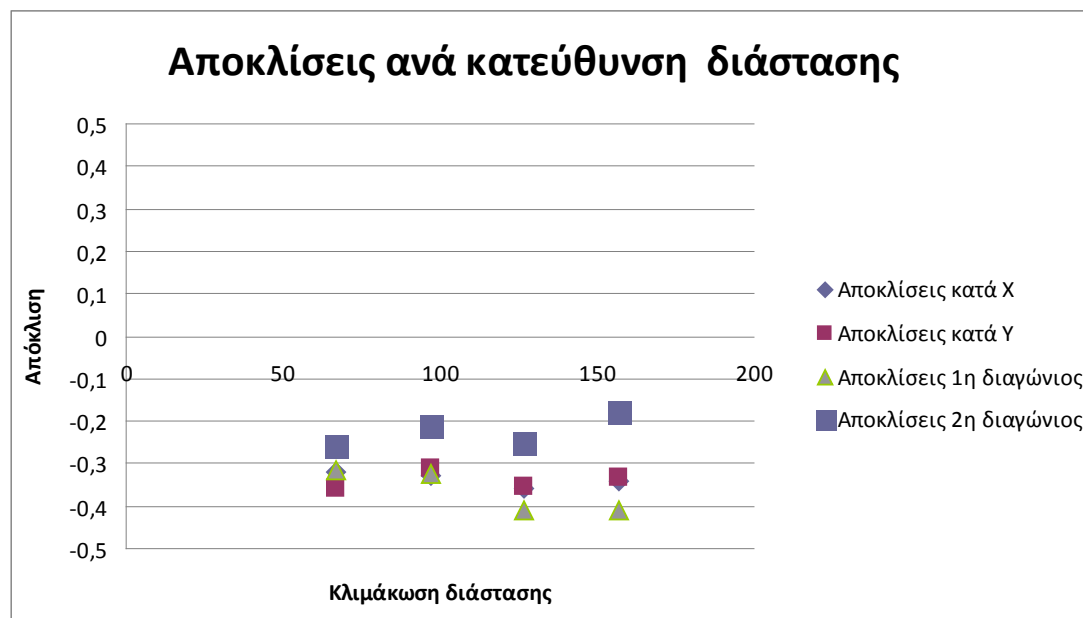
Σχήμα 6.1 Προσομοίωση και γραφική αναπαράσταση τη μέτρησης στη CMM του εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ με το λογισμικό PC - DMIS v. 3.7 MR2

Από την επεξεργασία των μετρήσεων το υ δο κμίο υ στη μηχανή CMM, που ελήφθησαν με βάση την κωδικοποίηση ακμών και επιπέδων του Σχήματος 6.1, των σταθερής τιμής-μεταβαλλόμενης κατεύθυνσης κατακόρυφων και οριζόντιων διαστάσεων του δοκιμίου για τη διαπίστωση απόδοσης ακρίβειας στο επίπεδο XY, αλλά και στον άξονα Z, προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες και διαγράμματα αποκλίσεων, κατά περίπτωση:

Συνολικές Διαστάσεις ανά ύψος στο επίπεδο XY (Απόλυτες Θέσεις επιπέδων μέτρησης)

Εδώ μετρώνται σε διάφορα ύψη και σε κάθε ξεχωριστή κατεύθυνση του οκτάπλευρου, οι συνολικές διαστάσεις πλάτους των κοιλοτήτων που προκύπτουν σε κάθε ύψος.

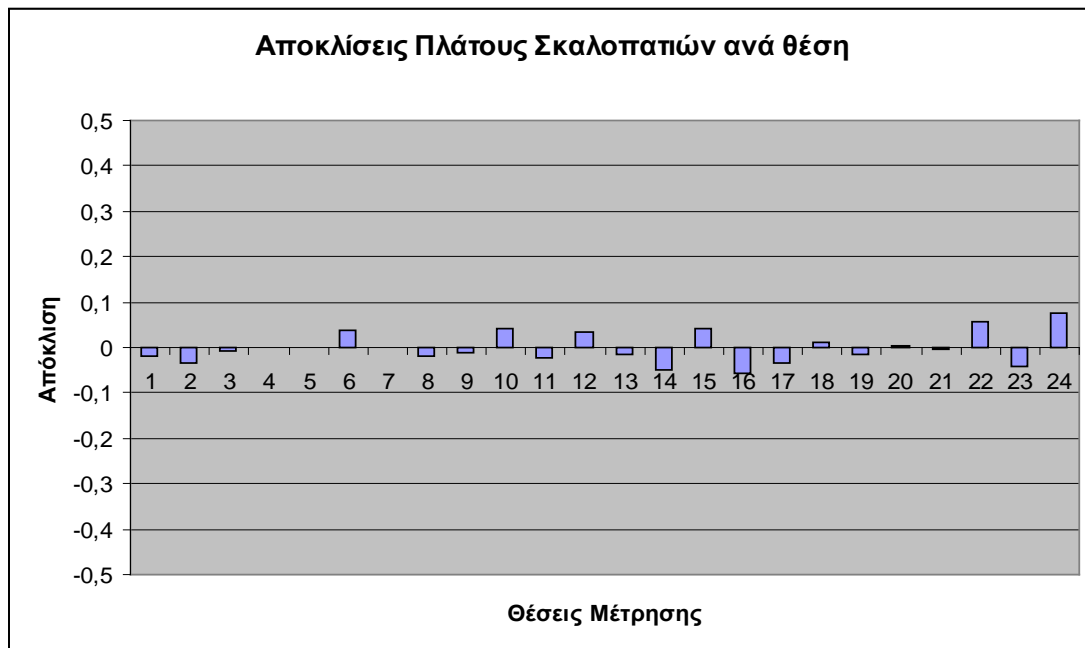
Οι αποκλίσεις που προκύπτουν, δείχνονται στο παρακάτω Διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.7 Αποκλίσεις ανά κατεύθυνση (τεμάχιο XYZ)

Πλάτος Σκαλοπατιών - επίπεδο XY (Σχετικές Θέσεις επιπέδων μέτρησης)

Αν για καλύτερη κατανόηση το δοκίμιο περιγραφεί σαν μια σκάλα με σκαλοπάτια, μετρήθηκε επίσης για κάθε σκαλοπάτι στις ίδιες με παραπάνω κατευθύνσεις και ύψη, το σταθερό σε ονομαστική τιμή και ίσο με **15mm** πλάτος του κάθε σκαλοπατιού. Το μέγεθος αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό σχετικό μέγεθος, που εκφράζει περισσότερο την ακρίβεια απόδοσης των οριζόντιων αποστάσεων μεταξύ των επιπέδων που ορίζουν τις βαθμίδες, και όχι τόσο την ακρίβεια απόδοσης του συνολικού πλάτους των κοιλοτήτων, που εξετάσθηκε παραπάνω. Με άλλα λόγια εκφράζει ποιοτικά τις αποδιδόμενες τροχιές του προγράμματος κοπής (toolpaths). Επειδή πρόκειται για σταθερής τιμής διάσταση μετρημένη σε 24 θέσεις, χρησιμότερο είναι να παρουσιασθούν για οι αποκλίσεις της ανά θέση και το χαρακτηριστικό ιστόγραμμα συχνοτήτων των αποκλίσεων σε διαστήματα των 0,05mm.



Διάγραμμα 6.8 Αποκλίσεις πλάτους σκαλοπατιών ανά θέση (τεμάχιο XYZ)

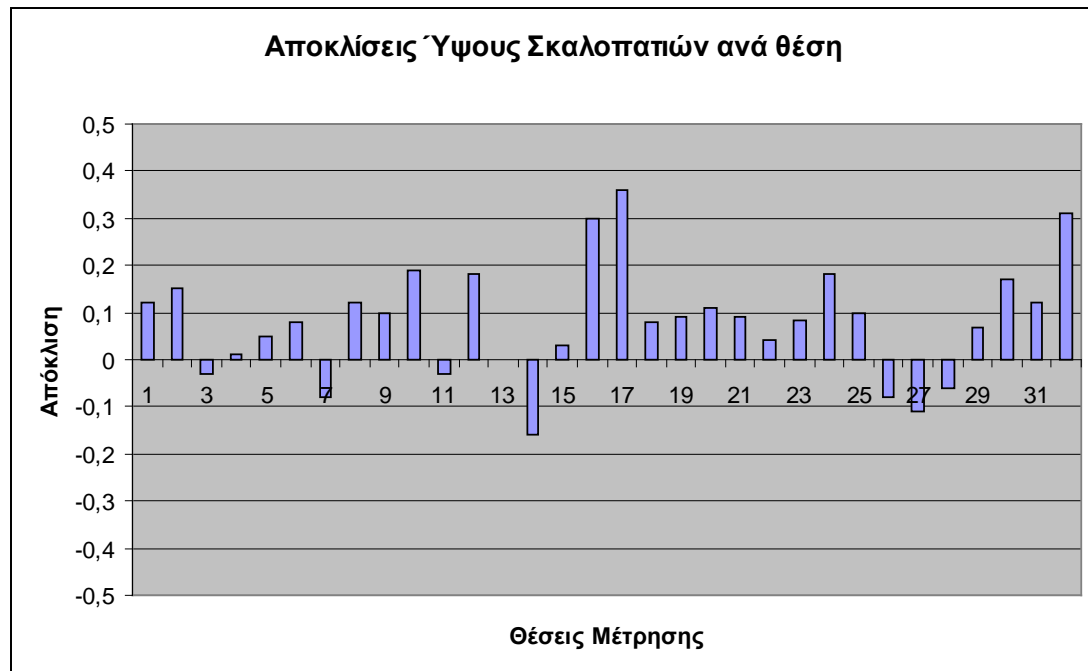
Bin	Frequency
-0,5	0
-0,45	0
-0,4	0
-0,35	0
-0,3	0
-0,25	0
-0,2	0
-0,15	0
-0,1	0
-0,05	2
0	14
0,05	6
0,1	2
0,15	0
0,2	0
0,25	0
0,3	0
0,35	0
0,4	0
0,45	0
0,5	0
More	0



Διάγραμμα 6.9 Συχνότητα εμφάνισης αποκλίσεων (τεμάχιο XYZ)

Ύψος Σκαλοπατιών κατά Z (Σχετικές Θέσεις επιπέδων μέτρησης)

Τέλος για κάθε σκαλοπάτι σε όλες τις παραπάνω κατευθύνσεις μετρήθηκε το σταθερό σε ονομαστική τιμή και ίσο με **5mm** ύψος του κάθε σκαλοπατιού. Η διάσταση αυτή είναι χαρακτηριστική για την αποτίμηση της απόδοσης στον άξονα Z που δεν έχει αξιολογηθεί κάπου αλλού σε αυτό ή σε άλλο δοκίμιο. Πρόκειται επίσης για σταθερή σε τιμή διάσταση, μετρημένη σε 32 θέσεις. Παρουσιάζονται και εδώ οι αποκλίσεις ανά θέση μέτρησης και το χαρακτηριστικό ιστόγραμμα συχνοτήτων των αποκλίσεων σε διαστήματα των 0,05mm.



Διάγραμμα 6.10 Αποκλίσεις ανά θέση (τεμάχιο XYZ)

<i>Bin</i>	<i>Frequency</i>	<i>Bin</i>	<i>Frequency</i>
-0,5	0	0,05	4
-0,45	0	0,1	8
-0,4	0	0,15	4
-0,35	0	0,2	5
-0,3	0	0,25	0
-0,25	0	0,3	1
-0,2	0	0,35	1
-0,15	1	0,4	1
-0,1	1	0,45	0
-0,05	3	0,5	0
0	3	More	0



Διάγραμμα 6.11 Συχνότητα εμφάνισης αποκλίσεων (τεμάχιο XYZ)

Σχολιασμός-Συμπεράσματα

Από τη μελέτη – αξιολόγηση των διαγραμμάτων για την απόδοση διαστάσεων στο δοκίμιο επιπέδου XY και άξονα Z προκύπτει:

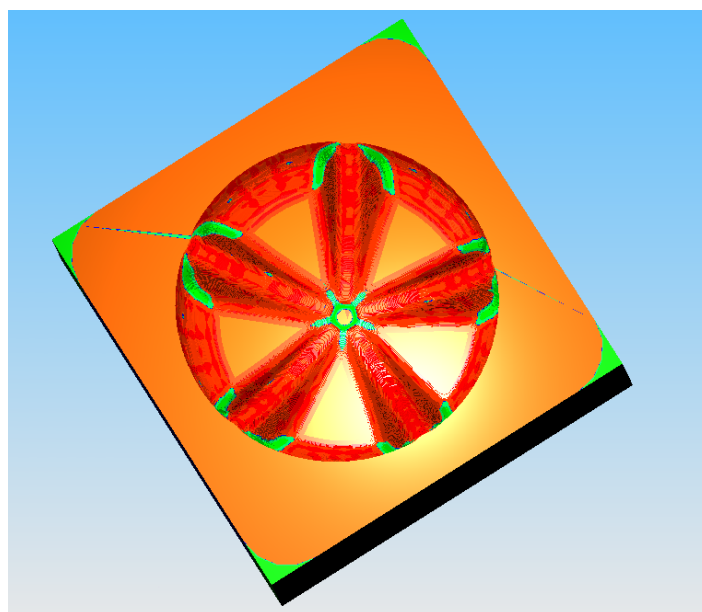
- Όλες οι διαστάσεις πλάτους κοιλοτήτων στο επίπεδο XY (Απόλυτα μετρούμενες διαστάσεις), σε όλες τις κατευθύνσεις προκύπτουν μικρότερες των ονομαστικών τιμών σε ένα εύρος τιμών αποκλίσεων από **-0,178 έως -0,411mm**, τιμές που κρίνονται μεγάλες, μη ικανοποιητικές και διαφορετικές από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παράγραφο 6.1.1. για διαστάσεις στο επίπεδο XY. Αν ληφθεί δε υπόψη ότι όλες αυτές οι διαστάσεις αφορούν εσωτερικές μορφές (κοιλοότητες) συμπεραίνεται ότι έχει εναπομείνει στο δοκίμιο υπόλειμμα πρώτης ύλης.
- Εν αντιθέσει, και πάλι για το επίπεδο XY, οι μετρήσεις πλάτους σκαλοπατιών (Σχετικές αποστάσεις μεταξύ κατακόρυφων επιπέδων - τροχιών κοπτικού), προκύπτουν πάρα πολύ καλές, ό ες κατ' από λτο τιμή κάτω του 0,1mm κυμαινόμενες σε εύρος από **-0,055 έως 0,077**. Αυτό ερμηνεύεται ως πειστήριο πολύ καλής απόδοσης από τη μηχανή των τροχών κοπής που εξήχθησαν με το λογισμικό CAM.
- Οι μετρήσεις ύψους σκαλοπατιών (συνδυασμός σχετικών θέσεων επιπέδων και απόλυτων θέσεων ως προς το ανώτατο μηδενικό επίπεδο κατεργασίας, Z=0), παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποικιλία αποκλίσεων από τα πλάτη, ευρισκόμενες σε εύρος από **-0,160 έως 0,360mm**. Πρέπει εδώ να σημειωθεί όμως, ότι οι αποκλίσεις αυτές όσον αφορά τις θέσεις που παρατηρούνται επιμερίζονται σε αυτές που παρατηρούνται στο ανώτατο επίπεδο (z=0) και είναι της τάξεως του 0,3mm και στα επίπεδα όλων των υπόλοιπων σκαλοπατιών, όπου κυμαίνονται σε εύρος από -0,160 έως 0,190mm.

- Οι ετερόκλητες αυτές συμπεριφορές στο δοκίμιο XYZ, αποδίδονται κατά περίπτωση και σε μια πρώτη προσέγγιση που γίνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στις παρακάτω αιτίες:
 - Το δοκίμιο αυτό κατασκευάστηκε με ένα δίφτερο κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 10mm, κύριας χρήσης ξεχονδρίσματος, για κατεργασία σε μία φάση με πάσο 2mm. Ενδέχεται λοιπόν όσον αφορά την απόδοση των απόλυτων διαστάσεων των κοιλοτήτων του δοκιμίου, λόγω της χρήσης του εν λόγω κοπτικού να έχει αφεθεί σταθερά υπόλειμμα πρώτης ύλης. Ενδεχομένως, αν ακολουθούσε φινίρισμα με κοπτικό εργαλείο μικρής διαμέτρου (όπως έγινε στο δοκίμιο της παραγράφου 6.1.1.), να εξαλείφεται το υπόλειμμα αυτό με αντίστοιχη βελτίωση των τιμών των απόλυτα μετρούμενων διαστάσεων πλάτους.
 - Ενδέχεται επίσης να χρειάζεται περαιτέρω ρύθμιση ή διερεύνηση της αντιστάθμισης διαμέτρου και των παραμέτρων στρογγυλοποίησης τιμών σε επίπεδο λογισμικού PILOT της εργαλειομηχανής.
 - Όσον αφορά την απόδοση από τη μηχανή των εξαγομένων από το λογισμικό CAM τροχιών κοπής και των σχετικών μεταξύ τους αποστάσεων και δεδομένης της απόδοσής τους με βηματικούς κινητήρες, τόσο για το επίπεδο XY, όσο και για τον άξονα Z, κρίνονται ως γενικά ικανοποιητικές και σύμφωνες με τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.1.1.
 - Όσον αφορά τη διαφορά υψών σκαλοπατιού στο ανώτατο ($Z=0$) επίπεδο κατεργασίας σε σχέση με τα υπόλοιπα σκαλοπάτια, θα πρέπει να διερευνηθεί παραπάνω η αξιοπιστία και ο τρόπος βέλτιστης χρήσης του πλακιδίου μηδενισμού ύψους (Auto-Z sensor). Προτείνεται επίσης πριν την απόδοση μηδενικής τιμής άξονα Z η τοποθέτηση και χρήση του σε παραπάνω από τρεις θέσεις της ανώτατης επιφάνειας του τεμαχίου και η χρήση της μέσης τιμής, ως τιμής μηδενισμού του άξονα Z. Δεν αποκλείεται δε για το εν λόγω δοκίμιο και τυχόν ανομοιομορφία ύψους κατά την πρόσδεση, λόγω της περιορισμένης σήμερα διατιθέμενης γκάμας ιδιοσκευών συγκράτησης τεμαχίων της μηχανής COMAGRAV MT-Profi του Εργαστηρίου.

Πέρα από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεράσματα, το τεμάχιο XYZ θα μπορούσε να ξανακατασκευασθεί με χρήση διαφορετικών παραμέτρων και κοπτικών εργαλείων, επαναμετρηθεί και αξιολογηθεί εκ νέου η αποδιδόμενη σε αυτό ακρίβεια.

6.1.3 Δοκίμιο ελεύθερης γεωμετρικής μορφής

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 5.8.3 της παρούσας εργασίας, για την διαπίστωση της πιστότητας απόδοσης 3D μορφών και της ποσοτικής αξιολόγησης του υπολείμματος κατεργασίας στις μορφές αυτές που έχει ήδη προεκτιμηθεί και σε επίπεδο λογισμικού CAM (Σχήμα 6.2), σε επιτραπέζιο φρεζάρισμα με χρήση κοινής γκάμας κοπτικών, κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν-αποτυπώθηκαν ψηφιακά με κατάλληλο εξοπλισμό δύο (2) δοκίμια ανάγλυφης μορφής, μιας μήτρας λεμονοστύφτη.



Σχήμα 6.2 Γραφική αναπαράσταση υπολείμματος (πράσινο χρώμα) στο SolidCAM.

Από την ψηφιακή αυτή αποτύπωση δημιουργήθηκαν δυο (2) αντίστοιχα σετ – «νέφη σημείων», κάθε ένα από τα οποία περιείχε πολλές χιλιάδες σημείων του κατασκευαζόμενου αντικειμένου.

Τα σημεία αυτά, αλλά και τα ονομαστικά CAD αρχεία του αντικειμένου εισήχθησαν στο περιβάλλον του λογισμικού GEOMAGIC Qualify v11, μετρήθηκαν, συσχετίστηκαν-ευθυγραμμίστηκαν μεταξύ τους και αξιολογήθηκαν στατιστικά με τα εργαλεία του λογισμικού αυτού.

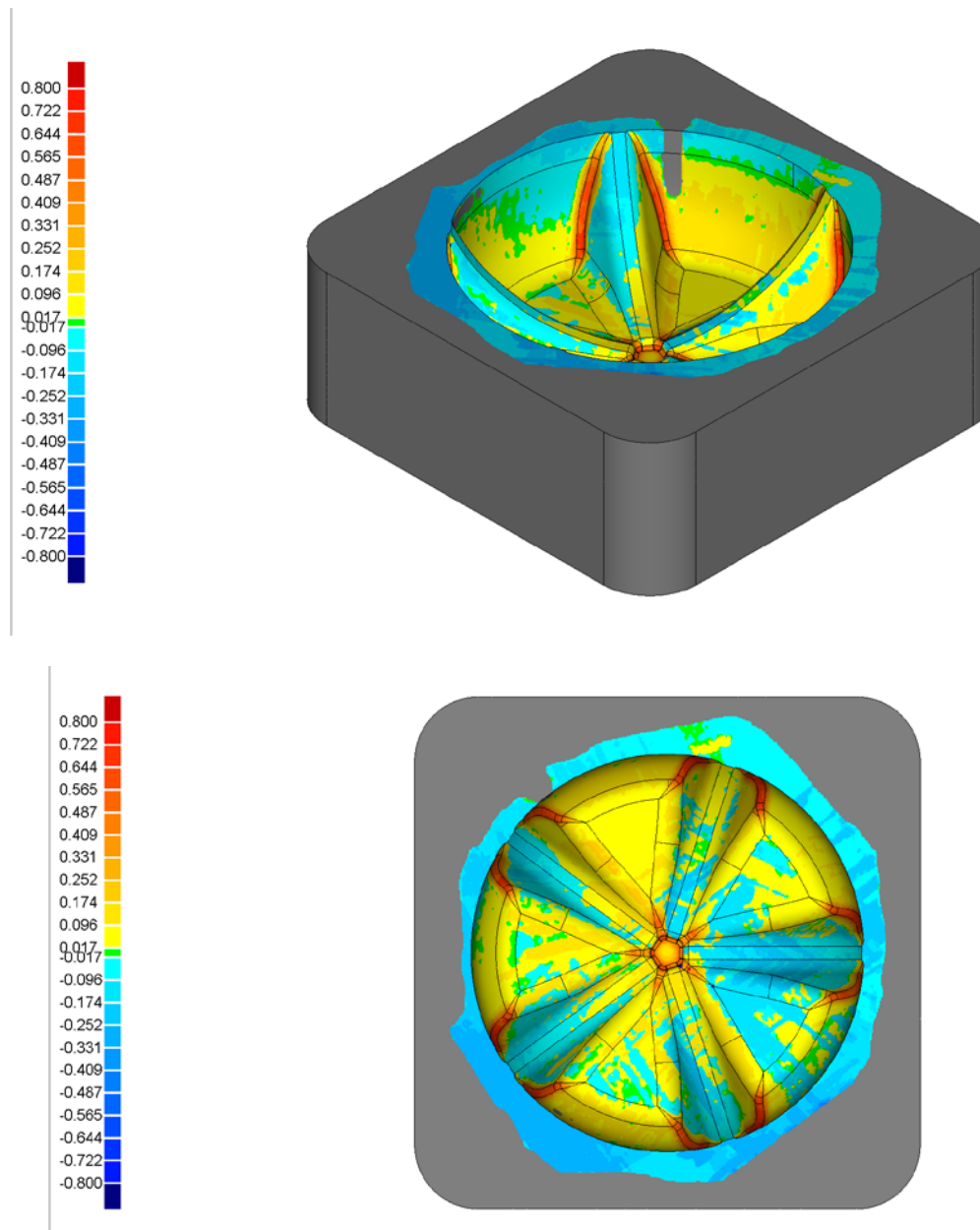
Τα αποτελέσματα, σε δύο μεγάλες ομάδες, μια για κάθε δοκίμιο, επελέγη να αξιολογηθούν με δύο τρόπους:

- Συνολικά για την τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου.
- Σε κατάλληλη τομή δύο διαστάσεων (2D Section) που θα περιελάμβανε χαρακτηριστικά μορφολογικά στοιχεία του στίφτη (πάτος & επαναλαμβανόμενο δόντι).

Οι πλήρεις αναφορές για τα δύο δοκίμια, όπως εξάγονται από το λογισμικό, δίνονται στο Παράρτημα Ζ . Γενικά μεταξύ των δύο δοκιμίων δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες διαφορές.

Εδώ, χάριν συντομίας, δίνονται μόνο χαρακτηριστικά διαγράμματα-απεικονίσεις-στατιστικά στοιχεία αποκλίσεων από το πρώτο δοκίμιο, για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Αποκλίσεις σε 3 διαστάσεις



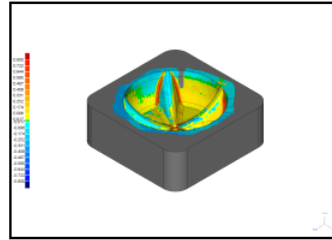
Σχήμα 6.3 Αποκλίσεις σε τρεις διαστάσεις (λογισμικό GEOMAGIC Qualify v11)

3D Comparison Results

Reference Model	Iemoni
Test Model	Scan 001
No. of Data Points	1523096
# Outliers	6813

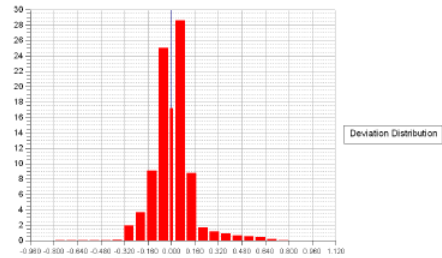
Tolerance Type	3D Deviation
Units	mm
Max. Critical	0.800
Max. Nominal	0.017
Min. Nominal	-0.017
Min. Critical	-0.800

Deviation	mm
Max. Upper Dev.	3.981
Max. Lower Dev.	-3.988
Average Deviation	0.090 /-0.080
Standard Deviation	0.134



Percentage Deviations

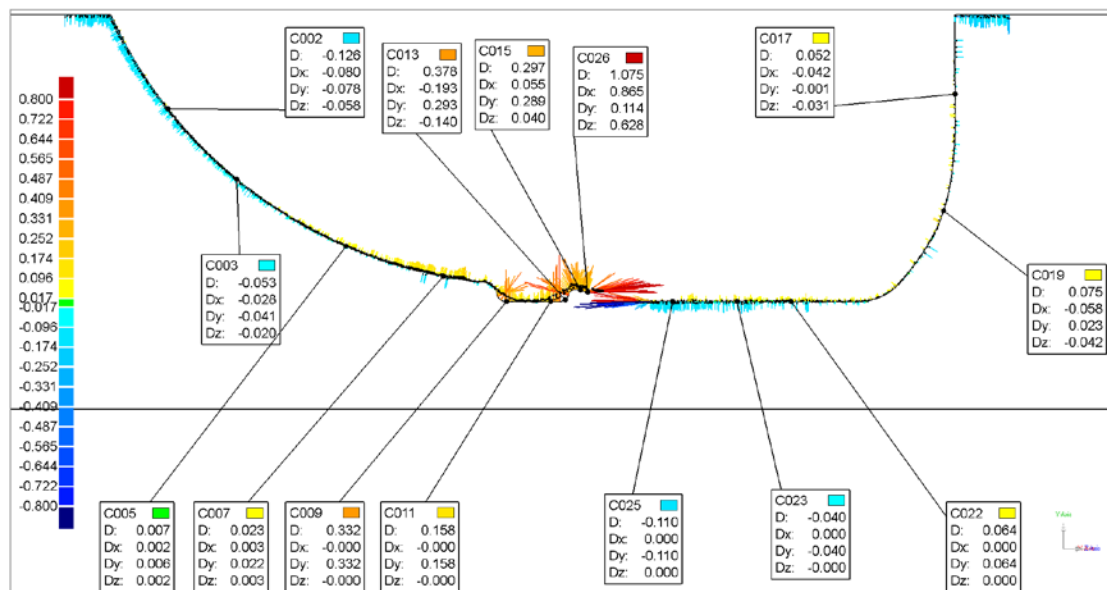
>=Min	<Max	# Points	%
-0.800	-0.722	1	0.000
-0.722	-0.644	7	0.000
-0.644	-0.565	16	0.001
-0.565	-0.487	46	0.003
-0.487	-0.409	381	0.025
-0.409	-0.331	897	0.059
-0.331	-0.252	29928	1.965
-0.252	-0.174	56500	3.710
-0.174	-0.096	137551	9.031
-0.096	-0.017	381440	25.044
-0.017	0.017	261316	17.157
0.017	0.096	435544	28.596
0.096	0.174	133775	8.783
0.174	0.252	26044	1.710
0.252	0.331	18177	1.193
0.331	0.409	13112	0.861
0.409	0.487	9633	0.632
0.487	0.565	7920	0.520
0.565	0.644	6114	0.401
0.644	0.722	3458	0.227
0.722	0.800	712	0.047



Out of Upper Critical	489	0.032
Out of Lower Critical	35	0.002

Διάγραμμα 6.12 Αποκλίσεις σε τρεις διαστάσεις (λογισμικό GEOMAGIC Qualify 11)

Αποκλίσεις σε δυο διαστάσεις



Σχήμα 6.4 Αποκλίσεις σε δυο διαστάσεις (λογισμικό GEOMAGIC Qualify v11)

Name	Dev	Status	Upper Tol.	Lower Tol.	Ref X	Ref Y	Ref Z	Dev Radius	Dev X	Dev Y	Dev Z	Test X	Test Y	Test Z	Normal X	Normal Y	Normal Z
C019	0.075				24.476	-87.936	17.783		-0.058	0.023	-0.042	24.418	-87.913	17.741			
C017	0.052				25.159	-79.379	18.279		-0.042	-0.001	-0.031	25.117	-79.380	18.248			
C002	-0.128				-21.456	-80.473	-15.589		-0.080	-0.078	-0.058	-21.537	-80.550	-15.647			
C003	-0.053				-17.399	-85.603	-12.641		-0.028	-0.041	-0.020	-17.427	-85.645	-12.661			
C022	0.064				15.441	-94.567	11.219		0.000	0.064	0.000	15.441	-94.503	11.219			
C023	-0.040				12.234	-94.567	8.889		0.000	-0.040	0.000	12.234	-94.607	8.889			
C025	-0.110				8.430	-94.567	6.124		0.000	-0.110	0.000	8.430	-94.677	6.124			
C026	1.075				3.384	-93.890	2.459		0.885	0.114	0.628	4.249	-93.776	3.087			
C015	0.297				2.964	-93.725	2.154		0.055	0.289	0.040	3.020	-93.436	2.194			
C013	0.378				2.084	-94.432	1.514		-0.193	0.293	-0.140	1.892	-94.139	1.374			
C011	0.158				1.202	-94.567	0.873		0.000	0.158	0.000	1.202	-94.409	0.873			
C009	0.332				-1.404	-94.567	-1.020		0.000	0.332	0.000	-1.404	-94.235	-1.020			
C007	0.023				-5.180	-92.730	-3.749		0.003	0.022	0.003	-5.156	-92.707	-3.748			
C005	0.007				-10.915	-90.525	-7.930		0.002	0.006	0.002	-10.913	-90.519	-7.929			

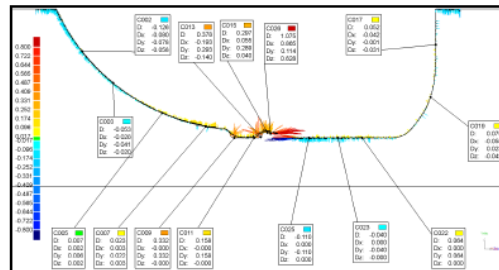
Διάγραμμα 6.13 Αποκλίσεις σε δυο διαστάσεις (λογισμικό GEOMAGIC Qualify v11)

Reference Model	Iemoni
Test Model	Scan 001

Name	2D Comparison 1
Location	
No. of Data Points	11711

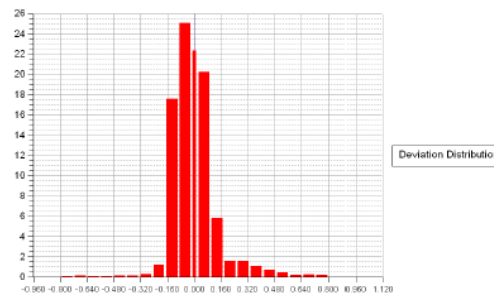
Units	mm
Max. Critical	0.800
Max. Nominal	0.017
Min. Nominal	-0.017
Min. Critical	-0.800

Deviation	mm
Max Dev +	1.133
Max Dev -	-1.122
Standard Deviation	0.183



Percentage Deviations

>=Min	<Max	# Points	%
-0.800	-0.722	11	0.094
-0.722	-0.644	16	0.137
-0.644	-0.565	8	0.068
-0.565	-0.487	8	0.068
-0.487	-0.409	14	0.120
-0.409	-0.331	14	0.120
-0.331	-0.252	31	0.265
-0.252	-0.174	141	1.204
-0.174	-0.096	2058	17.573
-0.096	-0.017	2934	25.053
-0.017	0.017	2811	22.295
0.017	0.096	2371	20.246
0.096	0.174	679	5.798
0.174	0.252	185	1.580
0.252	0.331	180	1.537
0.331	0.409	124	1.059
0.409	0.487	80	0.683
0.487	0.565	48	0.410
0.565	0.644	22	0.188
0.644	0.722	25	0.213
0.722	0.800	19	0.162



Out of Upper Critical +	95	0.811
Out of Lower Critical -	37	0.316

Διάγραμμα 6.14 Αποκλίσεις σε δυο διαστάσεις (λογισμικό GEOMAGIC Qualify)

Σχολιασμός-Συμπεράσματα

- Σε αποτυπώσεις μη επαφής (non-contact digitization) γεννώνται πάντα στα νέφη σημείων και εσφαλμένα-μετατοπισμένα σημεία (Outliers) από πληθώρα αιτιών (π.χ. ανακλάσεις, παραμορφώσεις κλπ). Αν και τέτοια σημεία δεν έλειπαν και από τα δείγματα που αξιολογήθηκαν με το Geomagic Qualify, η στατιστική επεξεργασία όλων των σημείων που προέκυψαν και των αποκλίσεών τους σε σχέση με την ονομαστική γεωμετρία κατέδειξε ότι σε διάστημα από **-0,268 έως 0,268 mm (αντίστοιχο σε 4σ της κατανομής των αποκλίσεων που προκύπτει)** βρίσκεται το 95% των αποκλίσεων των σημείων που αξιολογήθηκαν.
- Το παραπάνω συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι δεν έχουν εξαιρεθεί της αξιολόγησης τα «εξόφθαλα» μετατοπισμένα σημεία (outliers), αλλά κυρίως ούτε τα σημεία υπολείμματος πρώτης ύλης λόγω γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου. Τα δεύτερα, αν και σαφώς υπάρχουν, συμμετέχουν πολύ λίγο στην ποιότητα της τελικής επιφάνειας και οι μέγιστες αποκλίσεις που σημειώνονται σε αυτά **δεν ξεπερνούν τα 0,5mm**.
- Σε «ανοικτές», εύκολα προσβάσιμες από το κοπτικό εργαλείο επιφάνειες σημειώνονται αποκλίσεις που δεν ξεπερνούν στις περισσότερες περιπτώσεις κατά απόλυτη τιμή τα **0,1mm**, επίδοση που για τη μηχανή κρίνεται πολύ ικανοποιητική και σε γενική συμφωνία με τα αποτελέσματά της για κοπές πρισματικών 2D τεμαχίων.
- Σε ιδιαίτερα «κλειστές» μορφές και τοπικές γεωμετρίες που παρατηρήθηκαν οι πιο μεγάλες αποκλίσεις (της τάξης του 0,5mm), δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν γενικά ως μη κατασκευάσιμες, αλλά μόνο μη προσεγγίσιμες-κατασκευάσιμες από τα συνήθους γκάμας κοπτικά. Με χρήση ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών ΚΕ, και αυτές ακόμα οι μορφές μπορούν να αποδοθούν, ελέγχεται όμως αν κάτι τέτοιο είναι χρονικά και κοστολογικά συμφέρον, ειδικά για σκοπούς κατασκευής πρωτοτύπων.

6.1.4 Αποτελέσματα Τραχυμετρήσεων – Ποιότητα επιφάνειας

Από τις τραχυμετρήσεις που έγιναν σε διάφορα δοκίμια της παρούσας εργασίας από φρεζάρισμα στη μηχανή COMAGRAV MT-Profi σε υλικά της οικογένειας CIBATOOL, προκύπτει:

Πρισματικά τεμάχια (Lc=2.5mm)

Σε ακατέργαστη επιφάνεια του υλικού (προ κοπών): Ra: 4.78μm

Σε κατεργασμένη επιφάνεια:

- X διεύθυνση :

1^η μέτρηση : Ra=5.22μm

2^η μέτρηση : Ra=5.18μm

3^η μέτρηση: Ra=3.74μm

4^η μέτρηση: Ra=4.16μm

- XY(διαγώνια):Ra = 3.18 μm

- XY διαγώνιος (κάθετη διεύθυνση από την προηγούμενη) :Ra = 3.52 μm

- Πλάγια (τοιχώματα) XZ επίπεδο: Ra = 3.76 μm

3Δ Αντικείμενο (Μήτρα Λεμονοστύφτη) (Lc=0.8mm)

Σε επίπεδη ακατέργαστη επιφάνεια πάνω από την κατεργασία:

1η μέτρηση Ra = 7.2 μm

2^η μέτρηση Ra = 8 μm

3^η μέτρηση Ra = 7.6 μm

Σε ελεύθερη επιφάνεια (κατεργασμένη):

Ra = 5.2μm

Ra=4.8μm (σε κάθετη από την προηγούμενη θέση)

Σε Δόντι Λεμονοστύφτη :

Ra= 4.6μm

Ra= 5.2μm

Από τις παραπάνω τιμές συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι αποδιδόμενες ποιότητες επιφάνειας είναι πολύ ικανοποιητικές και εντός των συνήθων τιμών για κατεργασίες φρεζαρίσματος, ήτοι 0,8 έως 6,3μm [5.12]. Επίσης εμφανώς παρατηρείται βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας σε σχέση με μη κατεργασμένες περιοχές της πρώτης ύλης, όπως αυτές έχουν προκύψει από τη χύτευσή της.

6.1.5 Σύγκριση επιδόσεων ακρίβειας και ποιότητας επιφανειών με τη μέθοδο LOM

Με τις κατάλληλες αναγωγές, γίνεται παρακάτω εν συντομία σύγκριση αποτελεσμάτων αποδιδόμενης ακρίβειας και ποιότητας επιφανειών με τη μέθοδο LOM του Εργαστηρίου ΤΚΠ ΕΜΠ, βάσει προγενέστερης έρευνας.

- Σε επίπεδο απόδοσης διαστάσεων κατά XY, η CNC COMAGRAV MT-Profi, πλεονεκτεί παρουσιάζοντας συνολικά σταθερότερες και μικρότερες αποκλίσεις από τη μέθοδο LOM, στην οποία για διάφορους συστηματικούς και άλλους λόγους τα εύρη διακύμανσης των αποκλίσεων που έχουν μετρηθεί σε ανάλογο δοκίμιο είναι σχεδόν διπλάσια, τόσο για ευθύγραμμες, όσο και για κυκλικές μορφές, [5.14].
- Σε διαστάσεις ύψους κατά Z, δεν είναι σκόπιμο να γίνει σύγκριση. Η μεν μέθοδος LOM έχει βρεθεί, [5.14], να παρουσιάζει φαινόμενο «διόγκωσης» (swelling) των διαστάσεων των τελικών αντικειμένων της, της τάξεως του 1,3 έως 3% του ύψους του κατασκευαζόμενου αντικειμένου με τις συνηθέστερες τιμές γύρω στο 2%. Αυτό το φαινόμενο συνήθως αντισταθμίζεται πριν από την κατασκευή με εφαρμογή ανάλογης απομείωσης της διάστασης. Στην Comagrav, η απόδοση διαστάσεων ύψους, έχει παρόμοια συμπεριφορά με τους άξονες XY, χωρίς ανάλογα της LOM φαινόμενα.
- Σε επίπεδο τραχύτητας-ποιότητας επιφάνειας παρά τη δυνατότητα φινιρίσματος με βερνίκι ή άλλα λειαντικά μέσα, η μέθοδος LOM και πάλι υπολείπεται έναντι φρεζαρίσματος 3 αξόνων σε υλικά πρωτοτυποποίησης CIBATOOL, καθώς παρουσιάζει, [5.14], στην καλύτερη περίπτωση μέγιστη τραχύτητα Ra=15μm, που αν και καλή γενικά τιμή, υπολείπεται της κατεργασίας με την COMAGRAV MT-Profi.

- Στην απόδοση 3D μορφών, κρίνεται ότι εν μέρει πλεονεκτεί η κατεργασία φρεζαρίσματος, διότι υπάρχει σε αυτήν ευελιξία επιλογής βάθους κοπής έναντι της LOM που διακριτοποιεί τις 3D μορφές σε επίπεδες τομές πάχους 0,1mm (Φαινόμενο σκαλοπατιού). Έτσι στη LOM καθίσταται απαραίτητη αποπεράτωση με βερνίκι ή άλλα μέσα, εις βάρος της πιστότητας της επιφάνειας. Από την άλλη μεριά, η LOM και η ΤΚΠ γενικά πλεονεκτεί έναντι της 3 αξόνων κατεργασίας σε απόδοση μορφών όπως υποκοπές (undercuts), εσοχές, ανάποδες κλίσεις και άλλα, που δεν μπορούν καν να επιτευχθούν με κατεργασία.

6.2 Επιδόσεις – Συμπεράσματα Χρόνου-Κόστους

Επιχειρείται παρακάτω η καταγραφή χρόνων υλοποίησης και η εκτίμηση κόστους υλοποίησης για τα αντικείμενα-δοκίμια της παρούσας εργασίας. Κατόπιν επιχειρείται άμεση σύγκριση και εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων και για κατασκευή τους με τη μέθοδο LOM.

6.2.1 Δοκίμιο XY

Οι κύριοι χρόνοι που αναλώθηκαν συνίστανται σε:

Χρόνος προγραμματισμού σε περιβάλλον SolidCAM 2008 R12 :	~ 25min
Χρόνος επεξεργασίας και πρόσδεσης πρώτης ύλης:	~ 25min
Χρόνος για ξεχόνδρισμα :	~ 45min
Χρόνος για αποπεράτωση:	~ 35min
Σύνολο Χρόνου:	~ 2,5 ώρες

Λαμβάνοντας υπόψη κόστος ώρας προγραμματισμού και εργασιών 50€/ώρα και κόστος εργαλειομηχανής 100€/ώρα, προσθέτοντας δε κόστος πρώτης ύλης 25€, προκύπτει συνολικό κόστος κατασκευής του δοκιμίου περίπου, **155€**

6.2.2 Δοκίμιο XYZ

Οι κύριοι χρόνοι που αναλώθηκαν συνίστανται σε:

Χρόνος προγραμματισμού σε περιβάλλον SolidCAM 2008 R12 :	~ 15min
Χρόνος επεξεργασίας και πρόσδεσης πρώτης ύλης:	~ 15min
Χρόνος για ξεχόνδρισμα :	~ 35min
Σύνολο Χρόνου:	~ 1 ώρα

Λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες τιμές με παραπάνω και κόστος πρώτης ύλης 30€, προκύπτει συνολικό κόστος κατασκευής του δοκιμίου περίπου, **100€**.

6.2.3 Δοκίμιο 3D γεωμετρίας

Οι κύριοι χρόνοι εδώ υπολογίζονται σε:

Χρόνος προγραμματισμού σε περιβάλλον SolidCAM 2008 R12 : ~ 65min

Χρόνος επεξεργασίας και πρόσδεσης πρώτης ύλης: ~ 20min

Χρόνος για ξεχόνδρισμα : ~ 60min

Χρόνος για αποπεράτωση: ~ 30min

Σύνολο Χρόνου: ~ 3ώρες

Λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες τιμές με παραπάνω και κόστος πρώτης ύλης 15€, προκύπτει συνολικό κόστος κατασκευής του 3D δοκιμίου περίπου, **240€**

6.2.4 Συγκρίνοντας με την τεχνολογία LOM

Στην μηχανή LOM 1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ ΕΜΠ, έχει στο παρελθόν κατασκευασθεί το δοκίμιο XY. Με βάση την υπάρχουσα εμπειρία των στελεχών του εργαστηρίου μπορεί να προεκτιμηθεί χρόνος & κόστος και κατασκευής και για τα υπόλοιπα δοκίμια όπως στον παρακάτω πίνακα:

Δοκίμιο	Χρόνος (ώρες)	Κόστος (Ευρώ)
XY	3	150
XYZ	11	200
3Δ	7	190

Πίνακας 6.1 Πίνακας Χρόνων-Κόστους

Από τον πίνακα χρόνων – κόστους για κατασκευή με την τεχνολογία LOM, συνεκτιμώντας τους χρόνους – κόστη για κατασκευή με επιτραπέζιο φρεζάρισμα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο τρόπος και οι παράμετροι υπολογισμού και κοστολόγησης μεταξύ των δύο τεχνολογιών διαφέρουν αισθητά και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες.
- Στο επιτραπέζιο φρεζάρισμα τα απλά πρισματικά αντικείμενα ευνοούνται στο επίπεδο του χρονικού προγραμματισμού τους σε επίπεδο CAD – CAM έναντι άλλων αντικείμεμων 3Δ μορφής και σύνθετης γεωμετρίας.

- Για επιτραπέζιο φρεζάρισμα καθοριστικός παράγοντας είναι τόσο ο όγκος του προς απομάκρυνση υλικού όσο και οι φάσεις και τα απαραίτητα κοπτικά για να επιτευχθεί αυτό. Όσο πιο σύνθετο κομμάτι, τόσο περισσότερες φάσεις στον προγραμματισμό, αλλαγές κοπτικών και φάσεις στην κατεργασία.
- Οι τεχνολογίες ΤΚΠ εν γένει και η LOM εν προκειμένω, δεν κάνει διάκριση ως προς την συνθετότητα του αντικειμένου στο επίπεδο της προετοιμασίας του. Η LOM επηρεάζεται μόνο εν μέρει από τη συνθετότητα αυτή, κυμαινόμενη αντίστοιχα σε ένα εύρος ρυθμού κατασκευής της τάξης του 1 έως 5 min/αποδιδόμενη στρώση. Κυριότερος παράγοντας επηρεασμού του χρόνου-κόστους κατασκευής είναι το τελικό ύψος Z του κατασκευαζόμενου αντικειμένου, καθώς άμεσα προκαθορίζει τον αριθμό των στρώσεων.

6.3 Γενικότερη Σύγκριση Επιτραπέζιου Φρεζαρίσματος και τεχνολογιών ΤΚΠ

6.3.1 Πολυπλοκότητα τεμαχίου

Αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο και συγκαταλέγεται στα γενικότερα συμπεράσματα ότι το βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων RP έγκειται στο γεγονός ότι παράγουν γρήγορα και οικονομικά τεμάχια πολύπλοκων γεωμετριών, αντίθετα με τις επιτραπέζιες φρέζες CNC, όπου κάθε τμήμα του τεμαχίου θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά για προγραμματισμό κοπής, κάτι το οποίο προσθέτει κόστος και χρόνο. Στις επιτραπέζιες φρέζες CNC όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των τεμαχίων τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των απαιτούμενων χρόνων προετοιμασίας (setup) της μηχανής. Επιπλέον η πολυπλοκότητα των τεμαχίων απαιτεί περισσότερα κοπτικά εργαλεία με αποτέλεσμα να προστίθενται στην συνολική κατεργασία επιπλέον κόστος και χρόνος. Χαρακτηριστικά που εμφανίζονται πολύ συχνά σε καθημερινές κατασκευές, όπως βαθειά αυλάκια, σπές και τετράγωνες γωνίες μπορούν να είναι μια πρόκληση ακόμα και για την πιο ακριβή επιτραπέζια φρέζα CNC. Παρόλο αυτά μια 5D φρέζα CNC και ένας επινοητικός προγραμματιστής μπορούν να ξεπεράσουν τις δυσκολίες που παρουσιάζει η περιπλοκότητα κάποιων τεμαχίων.

Παρακάτω προτείνεται ένας συνοπτικός οδηγός με τον οποίο μπορεί να γίνει εποπτεία της κατεργασιμότητας ενός τεμαχίου κάνοντας χρήση επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου. Κάποιες συγκεκριμένες σχεδιαστικές αλλαγές επί των τεμαχίων μπορούν να επιτρέψουν στις επιτραπέζιες φρέζες CNC να γίνουν ανταγωνιστικές όσο αφορά στην ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων.

Τεμάχια με μικρές καμπυλότητες μεταξύ γωνιών
Οι μικρές καμπυλότητες μεταξύ γωνιών για να μορφοποιηθούν απαιτούν ειδικά κοπτικά εργαλεία και ενδεχομένως να είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατο να κατεργαστούν σε επιτραπέζιες τριαξονικές φρέζες CNC, ειδικότερα όταν υπάρχουν δυσκολίες στην κατεργασία του υλικού. Το θέμα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εάν οι καμπυλότητες στις γωνίες αυτές είναι λειτουργικές και απαραίτητες στο προϊόν που κατασκευάζουμε. Αν όχι κρίνεται απαραίτητο να τροποποιηθούν με στόχο να μειώσουμε το κόστος και το χρόνο της κατεργασίας.
Τεμάχια με σχισμές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπου εμφανίζονται σε διαφορετικές πλευρές του τεμαχίου
Κομμάτια με σχισμές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπου εμφανίζονται σε διαφορετικές πλευρές του τεμαχίου ενδεχομένως απαιτούν πολλαπλές αλλαγές στον προσανατολισμό του τεμαχίου και κατά πάσα πιθανότητα οδηγούν σε προβλήματα που σχετίζονται με το δέσιμο του τεμαχίου στο τραπέζι της μηχανής. Σε περιπτώσεις τέτοιων πρωτοτύπων μια 5D CNC εργαλειομηχανή θα μπορούσε να λύσει το πρόβλημα.
Τεμάχια όπου απαιτούν πολλές διεργασίες και διαφορετικά κοπτικά εργαλεία
Τεμάχια όπου απαιτούν πολλές διεργασίες και πλήθος διαφορετικών κοπτικών εργαλείων χρειάζονται περισσότερο χρόνο για προγραμματισμό και επέμβαση από το χρήστη, ειδικότερα στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει δυνατότητα αυτόματης αλλαγής των κοπτικών εργαλείων (σύνηθες στις επιτραπέζιες φρέζες CNC)

Πίνακας 6.2 Συνοπτικός οδηγός για το επιτραπέζιο φρεζάρισμα ως μεθόδου ΤΚΠ

6.3.2 Λεπτομέρειες επί του τεμαχίου

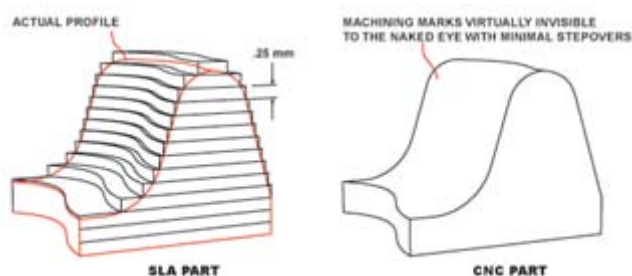
Σε αρκετές περιπτώσεις οι μέθοδοι RP παράγουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά που οι επιτραπέζιες φρέζες CNC δεν μπορούν να αποδώσουν. Για παράδειγμα οι μέθοδοι RP έχουν τη δυνατότητα να παράγουν αιχμές σε γωνίες, ανάποδες κλίσεις, εγκλείσματα, εσωτερικές κοιλότητες, υποκοπές και άλλα μορφολογικά στοιχεία με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως πολλές καμπυλότητες, βαθιά και στενά αυλάκια, λεπτά τοιχώματα, τόξα κτλ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου οι επιτραπέζιες φρέζες CNC υπερτερούν των μεθόδων RP. Για παράδειγμα σε τεμάχια με ομαλές ενώσεις και φαλτσογωνίες, τα συστήματα CNC υπερτερούν. Επιπλέον όταν η λεπτομέρεια ορίζεται σε όρους ακριβείας και πιστότητας επιφανείας οι φρέζες αριθμητικού ελέγχου πάλι υπερτερούν έναντι των συστημάτων RP, όπως κατεδείχθη και σε προηγούμενη παράγραφο.

6.3.3 Ακρίβεια

Στις μεθόδους RP η ακρίβεια εξαρτάται από την εκάστοτε μηχανή και τις διαστάσεις των πρωτοτύπων. Όσο αυξάνονται οι διαστάσεις των πρωτοτύπων τόσο στις περισσότερες περιπτώσεις υπαρχόντων συστημάτων αυξάνεται και η απόκλιση από την επιθυμητή γεωμετρία. Εάν και οι διατάξεις RP είναι πιθανόν να προσεγγίζουν ακρίβειες μεγαλύτερες από 0.125mm, το όριο μεταξύ 0.125mm-0.75mm είναι μια τυπική απόκλιση. Για τις επιτραπέζιες φρέζες CNC τα όρια ακριβείας κυμαίνονται μεταξύ 0.0125mm και 0.125mm. Αν και γενικά τα συστήματα CNC είναι πιο ακριβή από τα αντίστοιχα RP, η ακριβειά τους εξαρτάται και από το κόστος και την ποιότητα της μηχανής που χρησιμοποιείται.

6.3.4 Ποιότητα αποδιδόμενης τελικής επιφανείας

Και στα CNC συστήματα αλλά κυρίως στα RP, χωρίς καμία δευτερεύουσα επεξεργασία, μερικές, αν όχι όλες, οι επιφάνειες του τελικού τεμαχίου είναι τραχιές. Παρόλο που κάποιες μέθοδοι RP έχουν εξελιχθεί και προσφέρουν λεπτές στρώσεις από 0.0125mm μέχρι 0.025mm, οι επιστρώσεις και η βηματική προσθήκη βαθμίδων επηρεάζουν την τελική επιφάνεια του τεμαχίου. Αν είναι επιθυμητό και απαραίτητο, δευτερεύοντες διαδικασίες μπορούν να βελτιώσουν σε κάθε βαθμό την ομαλότητα της τελικής επιφάνειας, αλλά αυτό μπορεί να επηρεάσει την διαστασιολογική ακρίβεια του τεμαχίου. Φυσικά, αυτές οι διαδικασίες φινιρίσματος προσθέτουν κόστος και χρόνο. Εν αντιθέσει με τις μεθόδους RP οι επιτραπέζιες φρέζες CNC προσδίδουν καλύτερη πιστότητα επιφανείας και με κατάλληλες δευτερεύουσες κατεργασίες (τρόχισμα, ραφινάρισμα) μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω την τελική επιφάνεια του τεμαχίου, αλλά μειώνουν τη διαστασιολογική ακρίβεια και προσθέτουν χρόνο και χρήμα.



Σχήμα 6.5 Ποιότητα αποδιδόμενης τελικής επιφάνειας μεταξύ ΤΚΠ με εναπόθεση (SLA Part) και αφαίρεση υλικού (CNC)

6.3.5 Αξιοπιστία

Όπως και στις περισσότερες τεχνολογίες η αξιοπιστία των μεθόδων RP αυξάνεται ανάλογα με τα χρόνια που αναπτύσσονται και δοκιμάζονται. Οι ηλικίες των μεθόδων RP διαφέρουν από ένα μέχρι 15 χρόνια ζωής, κάτι το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να αναμένουμε διαφορετική αξιοπιστία για κάθε μέθοδο. Λόγω του μικρού χρόνου λειτουργίας μερικοί από τους κατασκευαστές RP μηχανών δεν έχουν ακόμα τον απαραίτητο χρόνο για να βελτιώσουν τα επιμέρους τμήματα και να βελτιώσουν την αξιοπιστία των μηχανών τους. Όσο αφορά τις επιτραπέζιες φρέζες CNC, αυτές είναι μέρος μιας τεχνολογίας που ξεπερνά τα 30 χρόνια έρευνας και ανάπτυξης, με αποτέλεσμα οι επιτραπέζιες φρέζες CNC να είναι πολύ αξιόπιστες και παραγωγικές.

6.3.6 Υλικά

Στην ΤΚΠ η ανάπτυξη στο χώρο των υλικών είναι ραγδαία και εξελίσσεται συνεχώς. Ένα διευρυμένο σε σχέση με το παρελθόν σύνολο από υλικά με προηγμένες ιδιότητες είναι πλέον διαθέσιμο. Σε αυτό περιλαμβάνονται πλαστικά, κεραμικά και συνθετικά προηγμένα υλικά. Σε συγκεκριμένες μεθόδους RP όμως, η επιλογή και η δυνατότητα χρήσης υλικών από το παραπάνω σύνολο εξακολουθεί έως σήμερα, συγκρινόμενη με μια διάταξη CNC αφαίρεσης υλικού, να είναι περιορισμένη. Ακόμα και οι μικρότερες επιτραπέζιες μηχανές CNC μπορούν να κατεργαστούν ένα ευρύ σύνολο από υλικά, όπως πλαστικά, κεραμικά, ξύλο, κεριά και φυσικά πολλά διαφορετικά είδη από σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα. Σε πολλές περιπτώσεις τα απόβλητα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ανακυκλώνονται.

6.3.7 Μέγιστο μέγεθος τεμαχίου

Παρόλο που οι εμπορικά διαθέσιμες RP μηχανές δεν μπορούν να κατεργασθούν έναν ολόκληρο πίνακα οργάνων ή ένα προφυλακτήρα αυτοκινήτου, οι περισσότερες από αυτές είναι κατάλληλες για να παράγουν πλήθος κοινών βιομηχανικών προϊόντων που επιλέγει η πλειοψηφία των καταναλωτών. Εάν ένα τεμάχιο είναι πολύ μεγάλο για το σύστημα, μπορεί να κατασκευαστεί σε επιμέρους τμήματα και να κολληθεί. Μια βασική όμως παρατήρηση στην εν λόγω διαδικασία είναι ο χρόνος, ο οποίος για μεγαλύτερα τεμάχια είναι ασύμφορος. Αντίθετα με χρήση της τεχνολογίας CNC, από τα πιο μικρά επιτραπέζια συστήματα CNC μέχρι τα κέντρα κατεργασιών πολλών αξόνων, καλύπτονται όλοι οι τύποι μεγεθών καλουπιών και τεμαχίων. Πρακτικά μιλώντας, στην ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού το μέγεθος των τεμαχίων περιορίζεται ανάλογα με τη χωρητικότητα της προσφερόμενης κάθε φορά εργαλειομηχανής.

6.3.8 Απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης και εποπτεία λειτουργίας

Με εξαίρεση των δευτερευόντων διεργασιών (φινιρίσματα κτλ) , οι μέθοδοι RP και οι μηχανές που χρησιμοποιούν καταλαμβάνουν λίγο χώρο σε ένα εργαστήριο. Μέσα σε λίγα λεπτά ετοιμάζει κανείς τα κατάλληλα αρχεία για την παραγωγή του επιθυμητού τεμαχίου και ξεκινά να «κτίζει» . Κατά τη διάρκεια της κατασκευής , η εποπτεία του χειριστή είναι ελάχιστη ή ακόμα και μη απαραίτητη. Αντίθετα στις φρέζες CNC, το στήσιμο και η λειτουργία μιας μηχανής CNC απαιτούν έμπειρους χρήστες και είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν πρωτότυπα χωρίς εξειδικευμένες τεχνικές γνώσεις. Παρόλο όπου τα λογισμικά CAM έχουν βελτιωθεί σε εξαιρετικό βαθμό, δεν μειώνουν απαραίτητα την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση.

6.3.9 Ανάγκη για εκπαιδευμένο προσωπικό

Η χρήση των μηχανών RP, τουλάχιστον όσον αφορά τα μικρά επιτραπέζια συστήματα ΤΚΠ (3D Printers) δεν απαιτείται υψηλή τεχνική γνώση και εξειδίκευση που είναι απαραίτητα προσόντα για τα συστήματα CNC. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι στις RP μεθόδους δεν χρειάζεται να υπάρχει απαραίτητη εργαστηριακή εμπειρία, λόγω του ότι αναπτύχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διαχωρίσουν τη διαδικασία σχεδίασης από αυτήν της κατασκευής. Αντίθετα η χρήση εργαλειομηχανών CNC απαιτεί δεξιοτεχνία , δημιουργικότητα και δυνατότητες επίλυσης προβλημάτων. Ο σχεδιασμός της τροχιάς κοπής, οι στρατηγικές κατεργασίας, ο χειρισμός και η επίβλεψη της κατεργασίας, αποτελούν δουλειά έμπειρων χειριστών.

6.3.10 Χρόνος κατασκευής πρωτοτύπων

Με μικρότερο εργαστηριακό χώρο , λιγότερα βήματα και λιγότερο πολύπλοκη διαδικασία σχεδιασμού , οι μέθοδοι RP μειώνουν όχι μόνο το χρόνο κατασκευής του πρωτοτύπου αλλά και ολόκληρης της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής του. Γενικά , οι μέθοδοι RP είναι περισσότερο αποδοτικοί τόσο σε χρόνο όσο και χώρο. Με τις μεθόδους RP , τα δεδομένα του υποψηφίου μοντέλου λαμβάνονται για παράδειγμα στις 16:30 μμ και το πρωτότυπο ετοιμάζεται και είναι έτοιμο να παραδοθεί την άλλη μέρα το πρωί , κάτι αδιανόητο με τη χρήση CNC εργαλειομηχανών , εκτός και εάν η παραγγελία περιλαμβάνει παραπάνω από ένα τεμάχια. Παρόλο αυτά , δε σημαίνει ότι οι μέθοδοι RP είναι οι ταχύτερες για όλους τους τύπους γεωμετριών. Αντιθέτως κάνοντας χρήση τεχνολογιών CNC ,θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας πολλές παραμέτρους, όπως ποιες τροχιές πρέπει να ακολουθηθούν τα κοπτικά εργαλεία , το setup της μηχανής , το χρόνο κατεργασίας , τα υλικά που χρησιμοποιούνται κ.τ.λ. . Ως αποτέλεσμα των προηγούμενων , ο χρόνος κατεργασίας είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που απαιτείται όταν εφαρμόζουμε μεθόδους RP. Παρόλα αυτά η χρήση συστημάτων CNC μπορεί να είναι γρηγορότερη για απλά και τυποποιημένα τεμάχια και ειδικότερα όταν έχουμε τη δυνατότητα να αυξήσουμε τις ταχύτητες πρόωσης και κοπής.

6.3.11 Ασφάλεια και υγιεινή

Οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις λαμβάνονται και αυτές υπόψη όσο αφορά την επιλογή μεθόδου για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων. Πολλές από τις σύγχρονες RP μεθόδους απαιτούν συστήματα εξαερισμού λόγω ότι παράγουν στην ατμόσφαιρα τοξικά απόβλητα. Αντίθετα οι εργαλειομηχανές CNC ποικίλουν σε μορφές και μεγέθη , περιλαμβάνοντας μηχανές που λειτουργούν με 120V AC και μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα γραφείο (Desktop CNC) . Όταν γίνεται κατεργασία μαλακών υλικών , όπως πλαστικό ή κερί , δε χρειάζεται η προσθήκη ψυκτικού υγρού. Το μοναδικό απόβλητο είναι αυτό που απομένει από το αρχικό μοντέλο (stock model) που κατεργαζόμαστε , το οποίο μάλιστα μπορεί εύκολα και με ασφάλεια να ανακυκλωθεί ή να χρησιμοποιηθεί για διάφορες άλλες ανάγκες. Για μικρά και ελαφρά πρωτότυπα , μπορεί κανείς να επωφεληθεί από την ευκολία μεταφοράς και το μικρότερο περιβαλλοντολογικό αντίκτυπο που αποφέρει μια επιτραπέζια CNC φρέζα.

6.3.12 Κόστος εξοπλισμού

Συγκριτικά με τις επιτραπέζιες διατάξεις για ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων οι περισσότερες διατάξεις RP δε θεωρούνται και οι πλέον οικονομικές . Οι περισσότερες από τις σύγχρονες διατάξεις RP κοστίζουν μεταξύ 20000 € και 700000€. Ως αποτέλεσμα , λίγες μόνο εταιρείες μπορούν να αντέξουν το κόστος ακριβών τεχνολογιών που απαιτούν συνεχή συντήρηση και ακριβά υλικά. Το μεγάλο πλεονέκτημα των επιτραπέζιων φρεζών CNC όταν χρησιμοποιούνται για σκοπούς ταχείας κατασκευή πρωτοτύπων έγκειται στο γεγονός ότι το κόστος απόκτησης τους είναι σχετικά χαμηλό. Έχοντας ένα λογισμικό CAD/CAM και μια επιτραπέζια CNC φρέζα , η οποία μπορεί να κοστίζει λιγότερο από 7000€ , η κατασκευή πρωτοτύπων με χρήση τεχνολογιών CNC ενδείκνυται. Λίγες εταιρείες έχουν την ανάγκη να κατασκευάσουν μεγάλου μεγέθους πρωτότυπα , ακόμα όμως και αν συμβαίνει αυτό μπορούν να εφοδιαστούν μεσαίου μεγέθους CNC εργαλειομηχανές που κοστίζουν μεταξύ 30000€ και 45000€. Η δυνατότητα των CNC τεχνολογιών να παράγουν ποικίλες σύνθετες γεωμετρίες σε πληθώρα υλικών είναι μοναδική.

6.4 Φρεζάρισμα αντικειμένων με περισσότερα πρόσωπα - Ιδιοσυσκευές συγκράτησης

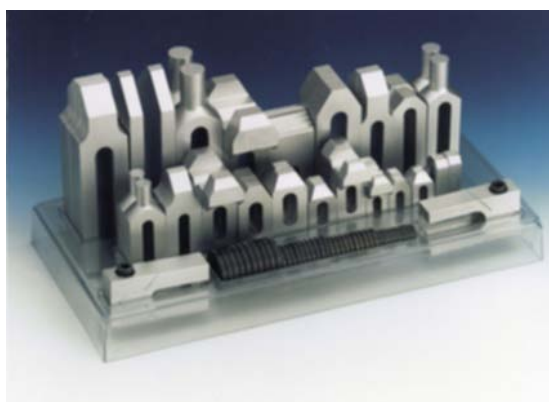
Όπως αναλυτικά εκτέθηκε στην παράγραφο 5.10, επιχειρήθηκε χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία η κατασκευή πρωτοτύπου αντικειμένου πλήρους μορφής 3 διαστάσεων με δύο πρόσωπα κατεργασίας και ενδιάμεση αναστροφή.

Οι κυριότερη λόγοι μη επιτυχίας κωδικοποιούνται παρακάτω:

- Αδυναμία ορθής συγκράτησης με την διακριτού βήματος και όχι συνεχούς ρύθμισης μέγγενη. Αυτό έκανε απαραίτητη τη χρήση χαρτιού για την προσαρμογή της πρώτης ύλης στις κεφαλές της μέγγενης με ικανοποιητική σύσφιξη.
- Αδυναμία ακριβούς τοποθέτησης καθ' ύψος της πρώτης ύλης στη μέγγενη, λόγω έλλειψης πρότυπων πλακιδίων συγκεκριμένων διαστάσεων και επιπεδότητας.
- Μετά την κατεργασία του ενός προσώπου, καμπτική παραμόρφωση του πλαισίου της πρώτης ύλης, που οδήγησε σε συμπίεση και τελικά θραύση της δομής συγκράτησης του αντικειμένου, λόγω έλλειψης προσαρμογών συγκράτησης (μάγουλων) στη μέγγενη από σκληρό ελαστομερές ή άλλο υλικό, με ικανό πλάτος, που θα εξασφάλιζε ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση συγκράτησης.
- Σχεδιασμός δομών συγκράτησης του αντικειμένου μόνο κατά τον Χ-άξονα, με ανάλογη μόνο δυνατότητα παραλαβής μεταφερόμενων αξονικών δυνάμεων.

Με γνώμονα και τα παραπάνω, για την δυνατότητα επιτυχημένης αναστροφής και κατεργασίας αντικειμένων με 2 πρόσωπα (full 3D) προτείνονται για συμπλήρωση του υφιστάμενου εξοπλισμού τα παρακάτω:

- Σειρά από σφικτήρες συγκράτησης τύπου T (T-clamps), οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο υψηλής αντοχής, είναι αντιδιαβρωτικοί και δε μαγνητίζονται.

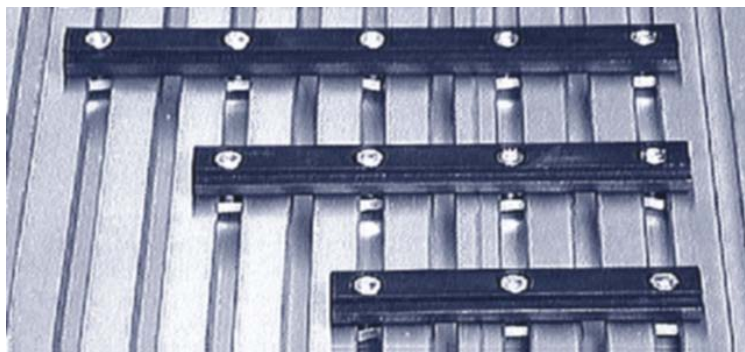


Σχήμα 6.6 Σειρά από σφικτήρες τύπου T (T-clamps)



Σχήμα 6.7 Ενδεικτικό σετ από σφικτήρες της εταιρείας I-mes (<http://www.i-mes.de>)

- Ιδιοσυσκευές συγκράτησης τύπου τερματικής ράβδου (stop bars) όπου δένονται στο αυλάκια τύπου T της τράπεζας της εργαλειομηχανής και ουσιαστικά ευθυγραμμίζουν και συγκρατούν τα υπό κατεργασία τεμάχια (Σχήμα 6.8). Μπορούν να συνδυαστούν με ιδιοσυσκευές που χρησιμοποιούνται για το «κλείδωμα» της θέσης ενός υπό κατεργασία τεμαχίου στα επίπεδο XYZ (Σχήμα 6.9).

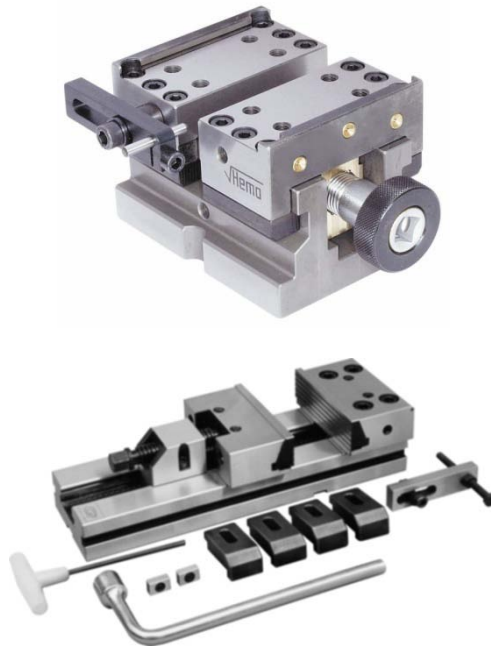


Σχήμα 6.8 Τερματικοί ράβδοι (stop bars)



Σχήμα 6.9 Stop clamping element

- Μέγγενη υψηλής ακριβείας με όσο το δυνατό μεγαλύτερο άνοιγμα σιαγόνων και μικρότερο ύψος (λόγω ότι μας περιορίζει η μικρή Z διαδρομή της επιτραπέζιας φρέζας) για τη συγκράτηση επίπεδων υλικών. Θα πρέπει να αναζητηθεί μέγγενη με ειδικά γι' αυτή clamps , ώστε να δένεται κατάλληλα στην τράπεζα της επιτραπέζιας φρεζομηχανής και κατάλληλα clamps που «κλειδώνουν» πλήρως τον προσανατολισμό του υπό κατεργασία τεμαχίου στο επίπεδο XY. Θα πρέπει να προτιμηθεί μέγγενη με κοιλία σύσφιξης ώστε να έχουμε ακριβέστερη και ευκολότερη συγκράτηση των τεμαχίων που συγκρατούμε.



Σχήμα 6.10 Προτεινόμενες μέγγκενες για κατεργασία

- Τέλος προτείνεται ένα σετ από πρότυπα πλακίδια και γωνίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάλληλη συγκράτηση και το «γώνιασμα» των υπό κατεργασία τεμαχίων.



Σχήμα 6.11 Γωνία 90°



Σχήμα 6.12 Πρότυπα πλακίδια

6.5 Οδηγίες για επιτραπέζιο φρεζάρισμα με σκοπό την ΤΚΠ

Ενταγμένες στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων δίνονται από τον γράφοντα, με βάση την εμπειρία που έχει κτηθεί στα πλαίσια της εργασίας αυτής κάποιες βασικές οδηγίες για επιτραπέζιο φρεζάρισμα με σκοπό την ΤΚΠ.

6.5.1 Για το υπό κατεργασία τεμάχιο (workpiece)

- Να επιλέγονται οι κατάλληλες κάθε φορά πρώτες ύλες που θα οποία μειώνουν το ολικό κόστος της κατεργασίας. Μια φθηνή αλλά ακατάλληλη πρώτη ύλη μπορεί να είναι η αιτία για μεγάλους χρόνους κοπής (cut times) και μεγαλύτερες φθορές στα ΚΕ (tool wear), αυξάνοντας έτσι τελικά το ολικό κόστος.
- Το υπό κατεργασία τεμάχιο πρέπει να προ-φρεζάρεται εκ των προτέρων ώστε οι διαστάσεις του να είναι κοντά στο επιθυμητό μέγεθος και σχήμα του τεμαχίου που θέλουμε να παράγουμε.
- Πρέπει να επιλέγονται τέτοια μεγέθη κατεργαζόμενων τεμαχίων ώστε να υπάρχει αρκετά μεγάλη επιφάνεια πρόσδεσης ώστε αυτά να δένονται με ασφάλεια σε μια διάταξη συγκράτησης. Επιπλέον, η επιφάνεια που εφαρμόζει στη διάταξη συγκράτησης πρέπει να επιτρέπει μια ανοχή μεταξύ του ΚΕ και της διάταξης συγκράτησης, προς αποφυγή συγκρούσεων.

6.5.2 Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (features)

- Προσπαθούμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τον αριθμό των χρόνων προετοιμασίας (setups) που απαιτούνται για να κατεργαστούν όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε μια πλευρά του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως οπές και σπειρώματα, απαιτούν τυποποιημένα μεγέθη ΚΕ.
- Προσπαθούμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τον αριθμό των ΚΕ που χρησιμοποιούμε.
- Πρέπει να διασφαλίσουμε ότι το βάθος κάθε γεωμετρικού χαρακτηριστικού είναι μικρότερο από το ολικό μήκος του ΚΕ που χρησιμοποιούμε, έτσι ώστε να αποφύγουμε την επαφή του κώνου της εργαλειομηχανής με το κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Όσο βέβαια είναι εφικτό, θα πρέπει να προδιαγράψουμε στο τεμάχιο τις μικρότερες απαραίτητες απαιτήσεις στις ανοχές και την πιστότητα επιφανείας, με απώτερο σκοπό να μειώσουμε το συνολικό κόστος της κατεργασίας.
- Θα πρέπει να αποφεύγονται μεγάλοι μήκους και λεπτά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (features).
- Είναι προτιμότερο να γίνονται λοξομήσεις από ότι ακτινικές καμπυλότητες/αιχμές σε εξωτερικές οριζόντιες ακμές.

6.6 Περιορισμοί και αντιμετώπιση προβλημάτων κατά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα για σκοπούς ΤΚΠ

Τα περισσότερα ελαττώματα κατά το φρεζάρισμα σχετίζονται με αποκλίσεις στις διαστάσεις ενός γεωμετρικού χαρακτηριστικού ή με μειωμένη πιστότητα επιφανείας. Πιθανοί λόγοι που προκαλούν αυτά τα ελαττώματα και μπορούν να αποτελούν σχετικούς περιορισμούς είναι οι ακόλουθοι:

- **Εσφαλμένες παράμετροι κοπής:**

Εάν παράμετροι κοπής, όπως είναι ο ρυθμός πρόωσης, η ταχύτητα κύριας ατράκτου ή το αξονικό βάθος κοπής εμφανίζονται σε υψηλές τιμές, η τραχύτητα επιφανείας του υπό κατεργασία τεμαχίου θα είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή και πιθανότατα η επιφάνεια του τεμαχίου θα περιέχει χαρακίες (scratch marks) ή ακόμα σημάρδια καύσης (burn marks).

- **Φθαρμένο κοπτικό εργαλείο (dull cutter):**

Κατά τη διάρκεια χρήσης ενός κοπτικού εργαλείου οι κοπτικές του ακμές φθείρονται και κατά συνέπεια αμβλύνονται. Ένα φθαρμένο κοπτικό εργαλείο είναι λιγότερο ικανό για κατεργασίες υψηλής ακριβείας.

- **Κακή συγκράτηση του τεμαχίου :**

Εάν το υπό κατεργασία τεμάχιο δεν συγκρατείται ορθά στη διάταξη συγκράτησης (μέγγενη, διαιρέτης κτλ.), η τριβή που εμφανίζεται, λόγω σθεναρής συγκράτησης, προκαλεί κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μετατοπίσεις στο τεμάχιο, οι οποίες αλλοιώνουν τα επιθυμητά βάθη.

Προβλήματα κατά το φρεζάρισμα		
Πρόβλημα	Αιτία	Αντιμετώπιση
Αστοχία κοπτικού εργαλείου	<ol style="list-style-type: none"> 1.Μεγάλος ρυθμός αποβολής υλικού. 2.Μεγάλη πρόωση. 3.Μεγάλο μήκος των ελίκων του ΚΕ. 4.Μεγάλο ολικό μήκος του ΚΕ. 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Πρέπει να μειωθεί η πρόωση ανά οδόντα στο ΚΕ 2.Να μειωθεί η πρόωση. 3&4. Να κινηθεί ο άξονας που φέρει το ΚΕ βαθύτερα, να χρησιμοποιηθεί μικρότερου μήκους κονδύλι.
Φθορά κοπτικού εργαλείου	<ol style="list-style-type: none"> 1.Υψηλή σκληρότητα υλικού. 2.Ακατάλληλη πρόωση και ταχύτητα κοπής. 3.Αναποτελεσματική απομάκρυνση του αποβλήτου. 4.Αντίρροπο φρεζάρισμα. 5.Ακατάλληλη κοπτική γωνία ελίκωσης (cutter helix). 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Να επιλεγεί από καταλόγους επιλογής ΚΕ, το κατάλληλο ΚΕ με βάση τον τύπο του υλικού που κατεργαζόμαστε και/ή επίστρωση. 2.Ελέγχουμε τους καταλόγους του κατασκευαστή για τις καταλληλότερες παραμέτρους κοπής. 3.Εναποθέτουμε το χώρο που ψεκάζεται το ψυκτικό υγρό. 4.Ομόρροπο φρεζάρισμα. 5.Ελέγχουμε τους καταλόγους του κατασκευαστή για επιλογή εναλλακτικών ΚΕ.

Πίνακας 6.3 Προβλήματα κατά το φρεζάρισμα (Αιτία και Αντιμετώπιση)

Προβλήματα κατά το φρεζάρισμα		
Πρόβλημα	Αιτία	Αντιμετώπιση
Εμφάνιση μεγάλης ποσότητας αποβλήτου (chipping)	1. Μεγάλος ρυθμός πρόωσης 2. Εμφάνιση κραδασμών 3. Χαμηλές ταχύτητες κοπής 4. Αντίρροπο φρεζάρισμα 5. Στιβαρότητα του ΚΕ (tool rigidity) 6. Στιβαρότητα του τεμαχίου (workpiece rigidity)	1. Μειώνουμε το ρυθμό πρόωσης 2. Μειώνουμε τις στροφές της ατράκτου (RPM) 3. Αυξάνουμε τις στροφές της ατράκτου (RPM) 4. Ομόρροπο φρεζάρισμα 5. Επιλέγουμε μικρότερου μήκους ΚΕ και/ή μετακινούμε τον άξονα του ΚΕ πιο πάνω στον εργαλειοδέτη 6. Συγκρατούμε καλύτερα το τεμάχιο που κατεργαζόμαστε.
Μικρή διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου	1. Σκληρό υλικό κατεργασίας 2. Ακατάλληλη γωνία κοπής & κακή πρόσδεση του ΚΕ. 3. Τριβή μεταξύ ΚΕ/τεμαχίου	1. Ελέγχουμε τους καταλόγους του κατασκευαστή για επιλογή εναλλακτικών ΚΕ. 2. Επιλογή ΚΕ με κατάλληλη γωνία κοπής. 3. Επιλέγουμε ΚΕ επίστροψη
Κακή ποιότητα επιφανείας	1. Πολύ μεγάλη πρόωση 2. Πολύ χαμηλή ταχύτητα κοπής 3. Φθορά ΚΕ 4. Συγκόλληση του αποβλήτου στο ΚΕ 5. Απόβλητο ακανόνιστης μορφής (chip biting) 6. ΚΕ με μεγάλη κοπτική αιχμή	1. Μειώνουμε την πρόωση 2. Αυξάνουμε την ταχύτητα κοπής 3. Αντικαθιστούμε ή λειάνουμε το ΚΕ 4. Ψεκάζουμε περισσότερο ψυκτικό 5. Μειώνουμε το ρυθμό αποβολής υλικού 6. Αλλαγή ΚΕ με μεγαλύτερη γωνία ελίκωσης

Πίνακας 6.4 Προβλήματα κατά το φρεζάρισμα (Αιτία και Αντιμετώπιση)

6.7 Συντήρηση της μηχανής Comagrav Mt Profi

Πέραν των οδηγιών συντήρησης που δίνει ο κατασκευαστής στο εγχειρίδιο της [4.18], στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρειάστηκε να αντιμετωπισθούν και διάφορα θέματα αναζήτησης περεταίρω πληροφοριών, υλικών και πρακτικών συντήρησης για την καλύτερη και απροβλημάτιστη λειτουργία της εργαλειομηχανής Comagrav Mt Profi.

Ενσωματώνοντας και τα κομμάτια αυτής της γνώσης στα συμπεράσματα προτείνονται τα παρακάτω:

1. Δεν πρέπει να γίνεται επέμβαση σε περιοχές της μηχανής που λειτουργούν σωστά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Δεν υπάρχει λόγος να αλλάζουν ρυθμίσεις και να αποσυναρμολογούνται συσκευές, που έχουν μεγάλη αξιοπιστία, εκτός εάν το συστήνει ο κατασκευαστής.
2. Κάθε φορά που η μηχανή συντηρείται, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή σε ενδείξεις, που υποδεικνύουν πιθανές μελλοντικές βλάβες. Αυτό πρέπει να γίνεται, ακόμα και αν το πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης του κατασκευαστή δεν προβλέπει επεμβάσεις. Έτσι, οξειδώσεις, χαλαρές συνδέσεις ξεβαμμένες επαφές, πρέπει να βάζουν σε σκέψεις για το μέλλον.

3. Οι τρεις πιο βασικές λειτουργίες συντήρησης που πρέπει να γίνονται, είναι ο καθαρισμός, η λίπανση και η επιθεώρηση στις θέσεις που συνιστά ο κατασκευαστής.

Η χρήση λιπαντικών πρέπει να είναι προσεκτική και τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται να είναι υψηλών προδιαγραφών. Υπερβολικές ποσότητες λαδιών ή γράσου πρέπει να αποφεύγονται. Η υπερβολική λίπανση μπορεί συχνά να προκαλέσει περισσότερα προβλήματα από την περιορισμένη ή μηδαμινή λίπανση. Για την λίπανση των κοχλιών κίνησης της μηχανής Comagran Mt Pro f, που μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις ή θορύβους σε μακρόχρονη χρήση, δόθηκε λύση με το γράσο (Bearing Grease) LGMGT 3/0.5 (For General Purpose) της εταιρείας SKF.

6.8 Περαιτέρω διερεύνηση - Μελλοντικές Εργασίες

Φθάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας θα ήταν ουτοπικό να ειπωθεί από τον γράφοντα ότι καλύφθηκε πλήρως κάθε δυνατή πτυχή της. Έγινε μια μόνο προσπάθεια, από πολλές άλλες που απομένουν να γίνουν από άλλους συναδέλφους στο μέλλον εμβαθύνοντας σε επιμέρους περιοχές έρευνας και εφαρμογών στο αντικείμενο αυτό.

Τέτοιες είναι:

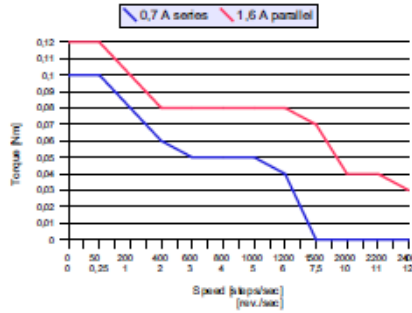
- Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών φρεζαρίσματος επιτραπέζιας κλίμακας για σκοπούς ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού.
- Ανάπτυξη λογισμικού για τον προσδιορισμό της φθοράς των κοπτικών εργαλείων επιτραπέζιων φρεζών αριθμητικού ελέγχου.
- Εξ' ύπαρξης προγραμματισμός και βελτιστοποίηση ζεύγους προ - & μετα-επεξεργαστή για τη διασύνδεση Solidcam και Comagran MT-Profi.
- Κατασκευή, κοστολόγηση και αξιολόγηση πρωτοτύπων με αφαίρεση υλικού από μεταλλικά υλικά.
- Κατασκευή, κοστολόγηση και αξιολόγηση πρωτοτύπων που προκύπτουν με αφαίρεση υλικού με πολυμερή και άλλα υλικά.
- Συνδυασμός των τεχνολογιών ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων με εναπόθεση/αφαίρεση υλικού για την ταχεία κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων.
- Ταχεία κατασκευή εκ περιστροφής πρωτοτύπων αντικειμένων με επιτραπέζια τριαξονική φρέζα αριθμητικού ελέγχου και διαιρέτη.
- Διερεύνηση της μεμονωμένης επίδρασης διαφορετικών συνθηκών κοπής στην διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια πρωτοτύπων κατά το επιτραπέζιο φρεζάρισμα.
- Κανόνες για βέλτιστο σχεδιασμό πρωτοτύπων μηχανολογικών κατασκευών που παράγονται με αφαίρεση υλικού κάνοντας χρήση τριαξονικής επιτραπέζιας φρέζας αριθμητικού ελέγχου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

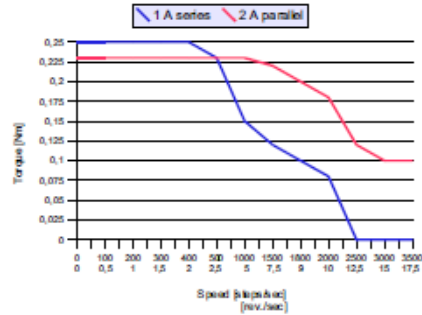
TORQUE SPEED CHARACTERISTICS

SL Series

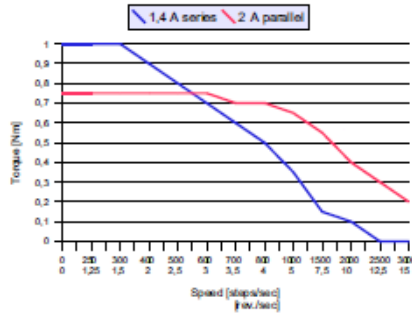
Torque/speed curves of SL17-0601 stepper motor with CD20M board for 35 VDC



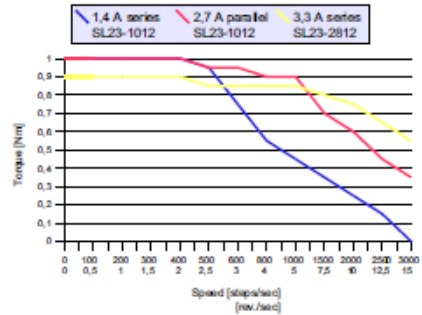
Torque/speed curves of SL23-0704 stepper motor with CD20M board for 35 VDC



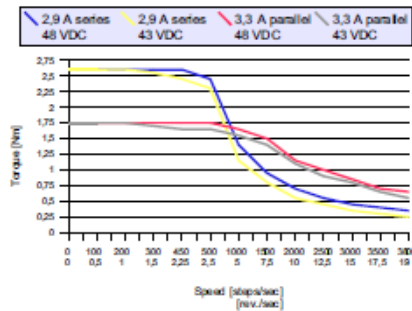
Torque/speed curves of SL23-1012 stepper motor with CD20M board for 35 VDC



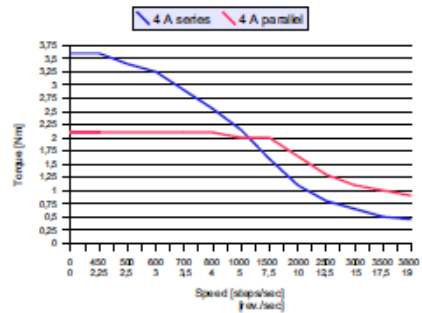
Torque/speed curves of SL23-1012 (SL23-2812) stepper motor with CD30M board for 48 VDC



Torque/speed curves of SL34-2530 stepper motor with CD30M board for 43 VDC and 48 VDC



Torque/speed curves of SL34-3550 stepper motor with CD40M board for 48 VDC



Motor current amplitude / phase is included in the legends.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



COMAGRAV - 3D engraving plotter, type MT

Basic technical parameters:

Type: MT

Size: 700 x 680 x 700 mm

Weight: 17 kg

Working area: 320 x 215 mm

Z axis: 95 mm

Highest milling speed: 25 mm/s

Highest moving speed: 30 mm/s

Power: 230 V/50Hz, own power consumption without spindle max.: 300 VA

Time averaged emission levels acoustic pressure A at the working place

$L_{pAeq,T} < 70,0$ dB

(according to ČSN EN ISO 11 201 – idle mode - simulated working mode, without machining)

Time averaged emission levels acoustic pressure A at the working place (front side of plotter)

$L_{pAeq,T} = 76,0$ and $94,0$ dB

(according to ČSN EN ISO 11 201 – working mode – machining acrylate, V-engraving and parallel cutter, two different machining depths, different revolutions.)

WARNING: *In working mode of plotter must operating personel apply protective equipment against noise.*

COMAC 2004

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

SERIE **C31/40**

MOTORE HF ED ELETTROMANDRINO



HF MOTOR AND ELECTROSPINDLE

DATI GENERALI

Gli elettromandri della serie **C31/40** sono stati progettati per sviluppare un'elevata potenza unita ad un ingombro limitato. Queste caratteristiche, unite all'elevata velocità di rotazione consentita, li rendono ideali per l'applicazione su macchine per la lavorazione del legno, dell'alluminio e del PVC.

SERIE C31/40-SB: per lavorazioni da 12.000 a 18.000 rpm, laddove il carico sia prevalentemente di tipo radiale.

SERIE C31/40-DB: per lavorazioni da 12.000 a 24.000 rpm con la presenza di un carico di tipo assiale.

GENERAL INTRODUCTION

The electrospindles series **C31/40** have been designed to generate a high power with limited overall dimensions. These features, joined to the high rotational speed, make these electrospindles the best solution for the machinery of wood, aluminium and PVC.

SERIES C31/40-SB: for rotational speed from 12.000 to 18.000 rpm where the prevalent load is radial load.

SERIES C31/40-DB: for rotational speed from 12.000 to 24.000 rpm where an axial load is present.

ALLGEMEINE INFORMATIONEN

Die Elektroschindeln **C31/40** erreichen hohe Drehzahl und haben eine sehr schmale Form und kleinen Raumbedarf. Diese Hochtourige Spezialmotoren sind für Holz, Aluminium und PVC Bearbeitungen geeignet.

C31/40-SB SERIEN: für Drehzahl von 12.000 bis 18.000 upm wo es Radialebelastung gibt.

C31/40-DB SERIEN: für Drehzahl von 12.000 bis 24.000 upm wo es Axialebelastung gibt.

CARATTERISTICHE TECNICHE

STATORE

Statore asincrono trifase con isolamento in classe F.

ROTORE

A gabbia di scoiattolo bilanciato secondo le norme ISO 1940: grado di equilibratura stan-dard 2.5. Per applicazioni speciali è possibile fornire motori equilibrati con gradi inferiori.

FORMA COSTRUTTIVA

Chiusa con carcassa ottenuta da profilo di alluminio estruso.

VENTILAZIONE

Esterna tramite ventola.

PROTEZIONE

IP 54

BILANCIATURA

La bilanciatura standard è eseguita con mezza chiave.

I motori sono conformi alla direttiva EMC CEE 89/336 e alla direttiva macchine CEE 89/392 assumendo per quest'ultima che il motore non può essere messo in servizio prima che la macchina, in cui sarà incorporato, sia stata dichiarata conforme alle disposizioni della direttiva.

TECHNICAL INFORMATION

STATOR

Three-phase induction motor, insulation class F.

ROTOR

Squirrel cage rotor balanced according to ISO 1940 norms: balancing grade 2.5. For special applications we can supply motors with lower balancing grade.

FRAME

Self enclosed construction. The frame is obtained from an extruded aluminium bar.

COOLING

Shaft driven fan cooling.

PROTECTION

IP 54

BALANCING

Standard balancing with half key.

The motors conform to the EMC EEC 89/336 directive, and to the EEC 89/392 engine directive, assuming for the latter that the motor component cannot be put into service before the machine into which it is incorporated is declared to be in conformity with the instructions in the directive.

TECHNISCHE BESCHREIBUNG

STATOR

Drehstrom - Asynchron Stator, Isolation: Wärmeklasse F entsprechend.

LÄUFER

Käfigläufer nach den ISO 1940 Normen ausgewuchtet: standard Auswuchtungsgrad 2.5. Für besondere Anwendungen können wir auch niedrigere Auswuchtungsgrad versorgen.

BAUFORM

Motor mit geschlossenem Aluminiumprofil gewonnen Gehäuse.

LÜFTUNG

Außenlüfterrad.

SCHUTZART

IP 54

AUSWUCHTUNG

Halbkeilwuchtung.

Die Motoren sind den Weisungen EMC CEE 89/336 und CEE 89/392 entsprechend. Der Motor kann in Betrieb setzen sein, nur wenn die Maschine, wo er sich befindet, den Weisungen entsprechend ist.

CARATTERISTICHE ELETTRICHE - ELECTRIC FEATURES - ELEKTRISCHE DATEN

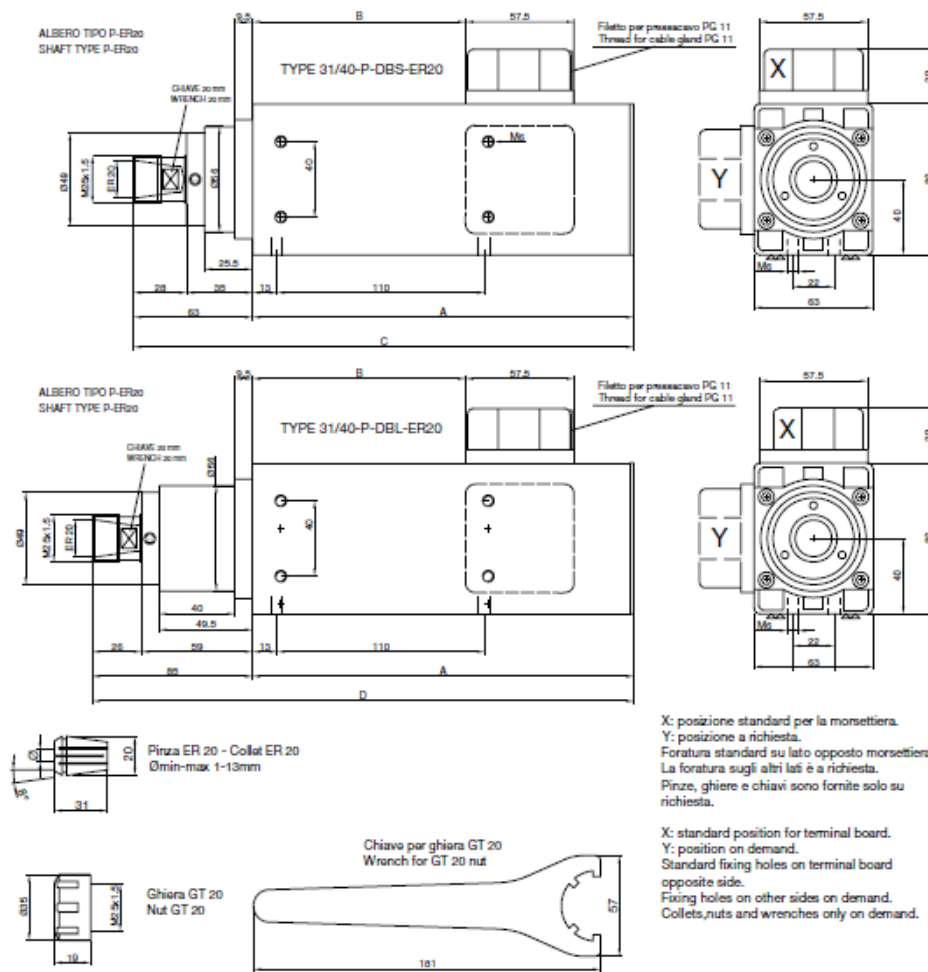
TIPO TYPE TYP	POTENZA POWER LEISTUNG	TENSIONE VOLTAGE LEISTUNG	FREQ. FREQ. FREQ.	GIRI RPM UPM	ASSORB. ABSORB. AMP AUFN.	PESO WEIGHT GEW. TYPE SB	PESO WEIGHT GEW. TYPE DBS-DBL
	KW	V	HZ	RPM	A	KG	KG
C31/40-A-3822-200	0.22	380-220	200	12.000	0.9-1.6	2.8	3.3
C31/40-B-3822-200	0.37	380-220	200	12.000	1.2-2.1	3.2	3.7
C31/40-C-3822-200	0.55	380-220	200	12.000	1.55-2.7	3.5	4.0
C31/40-D-3822-200	0.75	380-220	200	12.000	1.8-3.1	3.9	4.3
C31/40-A-3822-300	0.33	380-220	300	18.000	1.2-2.1	2.8	3.3
C31/40-B-3822-300	0.55	380-220	300	18.000	1.7-3.0	3.2	3.7
C31/40-C-3822-300	0.73	380-220	300	18.000	2.1-3.6	3.5	4.0
C31/40-A-3822-400	0.33	380-220	400	24.000	1.2-2.1	/	3.3
C31/40-B-3822-400	0.55	380-220	400	24.000	1.7-3.0	/	3.7
C31/40-C-3822-400	0.73	380/220	400	24.000	2.1-3.6	/	4.0

La frequenza massima è di 300Hz per la versione SB e di 400Hz per la versione DB. - The maximum frequency for the SB type is 300Hz. For the DB type it is 400Hz. Per diversi valori di tensione e frequenza interpellateci. - For different voltage and frequency you can apply to us.

ELETTROMANDRINO - ELECTROSPINDLE

DIMENSIONI DI INGOMBRO - OVERALL DIMENSIONS				
TYPE	A	B	C	D
C31/40-A	163	74	226	248
C31/40-B	188	99	251	273
C31/40-C	203	114	266	288
C31/40-D	223	134	286	308

C31/40 DBS E DBL



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

```

@pre_processor
;Internal parms
machine_type          = MILLING
post_processor        = HAAS_3x_Nosubs
gpp_file_ext          = CNC
seq_sub_number        = Y

;Machine Initialize
machine_plane         = XY
z_with_xy             = Y
mac_axes              = XYZ
num_axes              = 3
num_simult_axes       = 3
abs_coord             = N
rotate               = N
mirror                = N
variables             = N
loops                 = N

;Program numbers
prog_num_min          = 1
prog_num_max          = 99999
prog_num_dflt         = 10000
get_prog_num          = Y
proc_num_min          = 1
proc_num_max          = 99999
proc_num_dflt         = 2
get_proc_num          = Y

;Procedures control
full_gcode            = N
gen_procs             = N
drill_proc            = N
turn_proc             = N
thread_proc           = N
gen_internal_proc     = N
turn_common_proc      = N
gen_1_line_proc       = N
optimize_jobs_loop    = N
G_in_2_cols           = N

;Home
num_homes             = 50
dflt_home             = 1
get_job_home          = N
abs_zero_chng         = Y

;Positioning
dflt_start            = 0.0000 0.0000 100.0000, 0.0000 0.0000
10.0000
dflt_end              = 0.0000 0.0000 0.0000, 0.0000 0.0000
0.0000
set_z_chng            = Y
dflt_tool_chng        = 0.0000 0.0000 0.0000, 0.0000 0.0000
0.0000

;Compensation
comp_exist            = N

```

```

comp_arc_arc           = N
comp_arc_line          = N
comp_line_line         = N
next_angle             = N
comp_x_start           = N
comp_by_arcs           = N
chnng_tool_table       = N
look_forward           = 2
Comp_by_zero_tool      = Y
delta_for_TOOL_H       = 0

;Arc definitions
arc_exist              = N
arc_3d                 = N
arc_quadrants          = N
arc_gt_180             = N
arc_max_chord          = 30.0000, 1.2000
arc_max_angle          = 10.0000
arc_max_radius         = 2000.0000, 80.0000

;Epsilon values
eps_angle              = 0.0020, 0.002
eps_line               = 0.0010, 0.0001
zero_value             = 0.0010, 0.0001
min_delt_arc_rad       = 0.0100, 0.0001
safety_dist           = 2.0000, 0.1000

;Feed-Spin
rapid_feed             = 3000.0000
max_spin               = 24000.0000
max_feed               = 1500.0000
spin_direction         = CW

;Timing
time_factor            = 1.0000
block_time             = 0.0000
change_tool_time       = 8.0000

;Job options
job_opt_type           = Extra Y coolantoff StopM00 Backlash
Backlash_Feed

;Drill cycles
drill_type             = G81 Drilling Y
drill_type             = G82 F_Drill Y Delay
drill_type             = G83 Peck Y Delay
drill_type             = G84 Tapping Y Delay
drill_type             = G85 Boring Y Delay
drill_type             = G86 R_Boring Y Delay
drill_type             = G89 F_Boring Y Delay

endp

```

```

; HAAS
; 3-axis machine
; Subs = None
; Comp Type = Wear
; Tool Preselect = No
; Rev 1.0 :05.25.05 Anthony : Modified post for 3-axis HAAS
output
; Job Options
;   coolantoff      (1=on) Will not output M8
;   StopM00         (1=on) Output M01, Home ZY, output "Message"
from job
;   Backlash        (1=on) Removes backlash in machine. Drilling
operations only
;
;                   Moves machine -.5 in XY and feeds to
hole
;   Backlash_Feed   Set value to use for Feed move into
hole (50ipm = default)

@init_post
  global string tool_diameter_f  spin_f
  global logical rapid_flag
  global numeric m_feed_flag op_number sav_xpos sav_ypos
  global string f_name  GCODE_NAME
  GLOBAL INTEGER open_file_count  pre_part_home_number
no_rapid_flag home_flag
  global logical main_program

  ; Non GPPL variables
  num_user_procs = 1
  remove_blanks = TRUE
  line_labels    = FALSE      ; Jump to N...

  ; GPPL variables
  numeric_def_f  = '5.4'
  integer_def_f  = '5.0(p)'
  gcode_f        = '2.0(p)'
  mcode_f        = '2.0(p)'
  xpos_f         = '5.4'
  ypos_f         = '5.4'
  zpos_f         = '5.4'
  feed_f         = '4.4'
  tool_diameter_f = '5.4/1'
  blknum_f       = '5.0(p)'
  blknum_gen     = TRUE
  blknum_exist   = FALSE
  blknum         = 2
  blknum_delta   = 2
  blknum_max     = 3200000
; trace "all":5
; trace "@rapid_move":5
; trace "@drill":5
; trace "@drill_point":5

endp

;-----

```



```

@start_of_file

    {'%' }
    {nl, 'O'(program_number+home_number), '(', part_name, '-
OP#'home_number')' }
    {nb, '**WEAR-COMPENSATION**' }
    {nb, 'N1' }
    skipline = FALSE
    main_program = true
    op_number = 2

endp

;-----

@start_program

    skipline = false
    {' G80 G40 ' }
    ;home_flag = TRUE
    ;call @home_number

endp

;-----

@end_program
    {nb, 'M9' }
    {nb, 'M5' }
    {nb, 'G91 G28 Z0' }
    {nb, 'G91 G28 Y0' }
    {nb, 'M30' }
    main_program = false
endp

;-----

@end_of_file
    label = first_user_proc
    {nl, '%%' }

endp

;-----

@relative_mode
    gcode = 91
    {nb, 'G'gcode, ' ' }
    skipline = FALSE
endp

;-----

@absolute_mode
    gcode = 90

```

```

        {nb, 'G'gcode, ' '}
        skipline = FALSE
    endp

;-----

@machine_plane
    if machine_plane eq XY
        gcode = 17
    endif
    if machine_plane eq YZ
        gcode = 18
    endif
    if machine_plane eq ZX
        gcode = 19
    endif
    {nb, 'G'gcode}
endp

;-----

@call_proc
    {nb, 'M98 P'label}
    {' ('message, ')}

endp

;-----

@proc
    {n1, 'O'label}

endp

;-----

@end_proc
    {nb, 'M99'}
endp

;-----

@loop

    local integer var_num

    var_num = loop_level + 20
    {nb, '#', var_num, ' = 0'}
    {nb, 'WHILE [#', var_num, ' LT ', loop_count, '] DO ',
loop_level}
    call @home_number

endp

;-----

@end_loop

```

```

    local integer var_num

    var_num = loop_level + 20
    {nb '#', var_num, ' = #', var_num, ' + 1'}
    {nb 'END ', loop_level}

endp

;-----

@def_tool
    if tool_message == '' then
        {nb, '(TOOL 'tool_number, ' - DIA 'tool_diameter, ')'}
    else
        {nb, '(T'tool_number, '-' tool_message)'}
    endif
endp

;-----

@rapid_move
    if no_rapid_flag eq false
        {nb}
        gcode = 0
        if change(gcode) then
            {'G'gcode}
        endif
        {' X'xpos], [' Y'ypos]}
        if change(zpos)
            if change(xpos) == true or change(ypos) == true
                {nb,[' Z'zpos]}
            else
                {' Z'zpos}
            endif
        endif
        no_rapid_flag = false
    else
        no_rapid_flag = false
        {nb,[' Z'zpos]}
    endif
endp

;-----

@line

    {nb}
    gcode = 1
    if change(gcode) then
        {'G'gcode}
    endif

    {' X'xpos], [' Y'ypos] , [' Z'zpos]}

    if m_feed_flag eq 1
        {' F'feed}
        m_feed_flag = 0
    else

```

```

        {' F'feed}}
    endif

endp

; -----
@arc

{nb}
;-- arc plane --
if change(arc_plane) then
    if arc_plane eq XY then
        gcode = 17
    endif
    if arc_plane eq YZ then
        gcode = 18
    endif
    if arc_plane eq ZX then
        gcode = 19
    endif
    {'G'gcode, ' '}
endif

if arc_direction eq CCW then
    gcode = 3
else
    ; CW
    gcode = 2
endif
if change(gcode) then
    {'G'gcode}
else
    {' '}
endif
if m_feed_flag eq 1
    {' F'feed}
    m_feed_flag = 0
else
    {' F'feed}}
endif
{' X'xpos] [' Y'ypos] [' Z'zpos]}

if arc_plane eq XY then
    {' I'xcenter_rel, ' J'ycenter_rel}
endif
if arc_plane eq YZ then
    {' J'xcenter_rel, ' K'ycenter_rel}
endif
if arc_plane eq ZX then
    {' K'xcenter_rel, ' I'ycenter_rel}
endif

endp

;-----
@compensation

if side eq COMP_LEFT then
    gcode = 41

```

```

endif
if side eq COMP_RIGHT then
  gcode = 42
endif
if side eq COMP_OFF then
  gcode = 40
endif
if gcode eq 40
  {nb, 'G'gcode, ' '}
else
  {nb, 'G'gcode, ' D'(tool_number),' '}
endif
skipline = FALSE

endp

;-----

@delay

  gcode = 4
  {nb 'G'gcode, ' P'delay_period:integer_def_f}

endp

;-----

@change_ref_point

  gcode = 91
  {nb, 'G'gcode}
  gcode = 10
  {' G'gcode ' L2 P'home_number ' X'(-(xhome)), ' Y'(-(yhome)),
  ' Z'zhome}
  {nb 'G90'}

endp

;-----

@home_number

  gcode = 53 + home_number
  if home_flag == TRUE
    {nb, 'G'gcode}
    home_flag = FALSE
  endif

endp

;-----

@rotate

  if rotate_cancel then
    gcode = 69
    {nb, 'G'gcode}
  else

```

```

        gcode = 68
        {nb, 'G'gcode, ' X0 Y0 G91 R'angle}
        {nb, 'G90'}
    endif

endp

;-----

@fourth_axis

    gcode = 0
    {nb, 'G'gcode, ' A'angle}

endp

;-----

@change_tool

    local logical save_blknum_gen
    if !first_tool
        {nb, 'M9'}
        {nb, 'M1'}
        {nb, 'N'op_number:blknum_f'G90G80G40'}
        home_flag = TRUE
        Skipline = FALSE
        call @home_number
        op_number = op_number + 1
    else
        home_flag = TRUE
        call @home_number
    endif
    if tool_message == '' then
        {nb, '(*TOOL 'tool_number, ' - DIA 'tool_diameter, '*')'}
    else
        {nb, '(* ' tool_message '*')'}
    endif
    {nb 'M06 T'tool_number}
    ;{nb 'T'next_tool_number}
    {nb}
    tool_direction = CCW
    call @start_tool
    {nb, 'G90 '}
    skipline = FALSE
    xpos = xnext
    ypos = ynext
    cpos = cnext
    change(xpos) = TRUE
    change(ypos) = TRUE
    change(zpos) = false
    no_rapid_flag = false
    call @rapid_move
    gcode = 43
    {nb, 'G'gcode, ' H'tool_number' '}
    skipline = FALSE
    zpos = znext
    change(xpos) = false

```

```

    change(ypos) = false
    call @rapid_move
    skipline = TRUE
    no_rapid_flag = true

endp

;-----

@message

    {nb, '(', message, ')'}

endp

;-----

@drill

    sav_xpos = xpos
    sav_ypos = ypos

    if backlash eq 1
        {nb, '**Backlash Moves**')}
        xpos = xpos - .5
        ypos = ypos - .5
        change(xpos) = true
        change(ypos) = true
        ;{nb, '(Backlash Move)'}
        no_rapid_flag = false
        {nb, 'Z'zpos}
        {nb, 'X'Xpos' Y'ypos}
        xpos = sav_xpos
        ypos = sav_ypos
        if Backlash_Feed eq 0
            Backlash_Feed = 50.0
        endif
        {nb, 'G01 X'xpos 'Y'ypos'F'Backlash_Feed}
        {nb, 'G04 P1'}
    else
        {nb, 'Z'zpos}
    endif

    gcode = 98
    {nb, 'G'gcode, ' '}
    if drill_type eq G81 then
        gcode = 81
    endif
    if drill_type eq G82 then
        gcode = 82
    endif
    if drill_type eq G83 then
        gcode = 83
    endif
    if drill_type eq G84 then
        gcode = 84
    endif
    if drill_type eq G85 then

```

```

        gcode = 85
    endif
    if drill_type eq G86 then
        gcode = 86
    endif
    if drill_type eq G89 then
        gcode = 89
    endif
    if backlash eq 1
        {'G'gcode,' Z'drill_lower_z, ' R'drill_upper_z}
    else
        {'G'gcode,'X'xpos' Y'ypos' Z'drill_lower_z, '
R'drill_upper_z}
    endif
    if drill_type eq G83 then
        {' Q'down_step}
    endif
    if drill_type eq G82 or drill_type eq G84 then
        {' P'delay:integer_def_f}
    endif
    {' F'feed}
    if backlash eq 1
        {nb,'G80'}
    endif
endif

```

endp

;-----

@drill_point

```

sav_xpos = xpos
sav_ypos = ypos
if not first_drill then
    if backlash eq 1
        xpos = xpos - .5
        ypos = ypos - .5
        change(xpos) = true
        change(ypos) = true
        no_rapid_flag = false
        {nb,'X'Xpos' Y'ypos}
        xpos = sav_xpos
        ypos = sav_ypos
        if Backlash_Feed eq 0
            Backlash_Feed = 50.0
        endif
        {nb,'G01 X'xpos 'Y'ypos'F'Backlash_Feed}
        {nb,'G04 P1'}
    endif
    if backlash eq 1
        gcode = 98
        {nb, 'G'gcode, ' '}
        if drill_type eq G81 then
            gcode = 81
        endif
        if drill_type eq G82 then
            gcode = 82
        endif
    endif
endif

```



```

        if drill_type eq G83 then
            gcode = 83
        endif
        if drill_type eq G84 then
            gcode = 84
        endif
        if drill_type eq G85 then
            gcode = 85
        endif
        if drill_type eq G86 then
            gcode = 86
        endif
        if drill_type eq G89 then
            gcode = 89
        endif
        if backlash eq 1
            {'G'gcode,' Z'drill_lower_z, ' R'drill_upper_z}
        else
            {'G'gcode,'X'xpos' Y'ypos' Z'drill_lower_z, '
R'drill_upper_z}
        endif
        if drill_type eq G83 then
            {' Q'down_step}
        endif
        if drill_type eq G82 or drill_type eq G84 then
            {' P'delay:integer_def_f}
        endif
        {' F'feed}
    else
        {nb, ' ', [' X'xpos], [' Y'ypos], [' Z'zpos]}
    endif
    if backlash eq 1
        {nb,'G80'}
    endif
endif
endif

endp

;-----

@mirror

endp

;-----

@end_drill

    if backlash ne 1
        gcode = 80
        {nb, 'G'gcode}
    endif

endp

;-----

@halt_program

```

```

        {' M0'}
endp

;-----

@start_of_job

    if coolantoff eq 1
    else
        {nb, 'M8'}
    endif

    skipline= true

endp

;-----

@end_of_job

    if stopm00 ne 0 then
        {nb, 'M9'}
        {nb, 'M5'}
        {nb, 'G91 G28 Z0'}
        {nb, 'G91 G28 Y0'}
        {nb, 'M00'}
        {nb, '(' 'msg' ')'}
        {nb, 'G90'}
        {nb, 'M3'}
    endif

endp

;-----

@start_tool
    if tool_direction eq CW then
        mcode = 4
    else
        ; CCW
        mcode = 3
    endif
    { ' M'mcode, ' S'spin:integer_def_f}
endp

;-----

@m_feed_spin
    m_feed_flag = 1
    if change(spin)
        {nb,[' S'spin:integer_def_f]}
    endif
endp

;-----

@stop_tool
    {' M5'}
endp

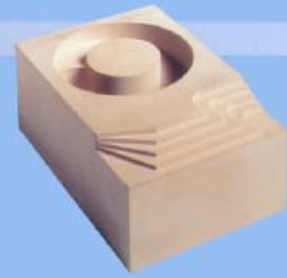
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

MASTER MODELS

BM 5460

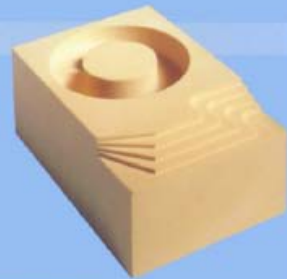
- Master models
- Density 0.7
- Excellent machining qualities
- Generates very little dust
- Workable with hand tools
- Good edge strength
- Very fine surface finish



DUAL PURPOSE

BM 5185

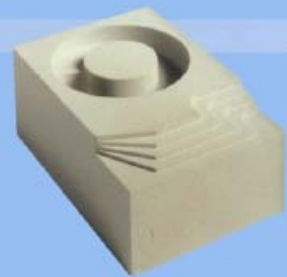
- Styling and master models
- Density 0.5
- Outstanding workability by machine and hand tools
- Fine surface finish



STYLING MODELS

BM 5120

- Styling models
- Density 0.25
- Fastest cutting rates
- Medium fine surface finish
- Most economical



RenShape® Board Materials | Physical properties

	Application	Colour	Density (g/cm ³)	Heat distortion ISO 75 (°C)	Coefficient of thermal expansion ISO 11359 (10 ⁻⁶ °K ⁻¹)
BM 5108	Styling	White	0.08	—	—
BM 5025		Apricot	0.24	60	60 - 70
BM 5030		Sienna	0.3	60 - 70	60 - 65
BM5185	Modelling	Apricot	0.47	60 - 70	60 - 65
BM 5440	Data Control Models and master models	Brown	0.5	75 - 80	50 - 55
BM 5460		Brown	0.7	75 - 80	50 - 55
BM 5470		Brown	0.75	60 - 70	55 - 60
BM 5055	For lay-up-tools at elevated temperatures (LT - Prepreg)	Green	0.72 - 0.75	135 - 140	35 - 45
BM 5172	Foundry	Green	1.2	80 - 90	80 - 85
BM 5272		Olive	1.4	80 - 90	65 - 70
BM 5273		Red	1.5	85 - 90	80 - 90
BM 5112	Hammer forms and flanging tools	Grey	1.5	85 - 90	95 - 105
BM 5166	Jigs and metalforming	Ivory	1.7	75 - 80	45 - 50
RS 470		Grey/brown	1.6 - 1.7	85 - 90	40 - 45
BM 5266	Metalforming and thermoforming	Dark grey	1.7	120 - 125	45 - 50

Renshape® Board Materials Mechanical properties

Flexural strength ISO 178 (MPa)	Compressive strength ISO 604 (MPa)	Compressive modulus ISO 604 (MPa)	Shore-D-Hardness ISO 868	Barcol-Hardness	
—	—	—		—	BM 5108
—	3,7	140	—	—	BM 5025
6 - 8	6 - 8	250 - 300		—	BM 5030
10- 15	10-15	500 - 600	—	—	BM 5185
15 - 20	15 - 20	600 - 700	55 - 60		BM 5440
25 - 30	20 - 25	910 - 960	60 - 65	—	BM 5460
35 - 40	33 - 38	600 - 700	60 - 65	—	BM 5470
30 - 40	50 - 55	2300 - 2400	75	—	BM 5055
70 - 80	60 - 70	1900 - 2000	80	—	BM 5172
80 - 90	70 - 80	3300 - 3500	80 - 85	10-15	BM 5272
70 - 80	50 - 60	2400 - 2800	80 - 85	—	BM 5273
70 - 80	50 - 60	2400 - 2800	80 - 85	—	BMS112
55 - 65	90 - 100	7000 - 7500	85 - 90	30 - 35	BM 5166
55 - 65	95 - 100	7000 - 7500	85 - 90	35 - 40	R3 470
80 - 85	125 - 130	7000 - 7500	85 - 90	40 - 45	BM 5266

Renshape® Board Materials Dimensions/Packaging

	Dimensions (mm)	Volume (l)	Weight (kg)	Number of boards (per pack)	Number of boards (per pallet)
BM 5108	2500 x 1200 x 100	300	24 - 27	1	12
	2500 x 1200 x 200	600	48 - 54	1	6
	2500 x 1200 x 400	1200	96 - 108	1	3
BM 5025	2000 x 1000 x 100	200	45 - 51	1	10
	2000 x 1000 x 200	400	91 - 101	1	5
BM 5030	1500 x 500 x 100	75	22.5	1	16
	1500 x 500 x 200	150	45	1	8
	2000 x 500 x 100	100	30	1	16
BM 5165	1500 x 500 x 50	37.5	17 - 18	2	40
	1500 x 500 x 100	75	35 - 36	1	16
BM 5440	1500 x 500 x 25	18.75	9 - 10	4	64
	1500 x 500 x 50	37.5	18 - 19	2	32
	1500 x 500 x 75	56.25	28 - 29	1	16
	1500 x 500 x 100	75	37 - 38	1	16
BM 5460	1500 x 500 x 25	18.75	12 - 13	4	64
	1500 x 500 x 50	37.5	23 - 24	2	32
	1500 x 500 x 75	56.25	39 - 40	1	16
	1500 x 500 x 100	75	57 - 58	1	16
	1500 x 500 x 150	112.5	96 - 98	1	8
BM 5470	1500 x 500 x 50	37.5	28 - 29	2	32
	1500 x 500 x 100	75	56 - 57	1	16
BM 5055	1500 x 500 x 50	37.5	28	2	5
	1500 x 500 x 100	75	56	1	5
BM 5172	1000 x 500 x 50	25	30 - 31	2	24
	1000 x 500 x 75	37.5	45 - 46.5	1	12
	1000 x 500 x 100	50	60 - 61	1	12
BM 5272	1000 x 500 x 50	25	35	2	24
	1000 x 500 x 75	37.5	52.5	1	12
	1000 x 500 x 100	50	70	1	12
BM 5273	1000 x 500 x 50	25	37.5	2	24
	1000 x 500 x 100	50	75	1	12
BM 5112	1000x400x50	20	30	2	24
	1000 x 400 x 100	40	60	1	12
BM 5166	750 x 500 x 50	18.75	31 - 32	2	24
	750 x 500 x 100	37.5	63 - 64	1	12
RS 470	750 x 500 x 50	18.75	30 - 32	2	24
	750 x 500 x 100	37.5	61 - 64	1	12
BM 5266	750 x 500 x 50	18.75	31 - 32	2	24
	750 x 500 x 100	37.5	63 - 64	1	12

User Guide

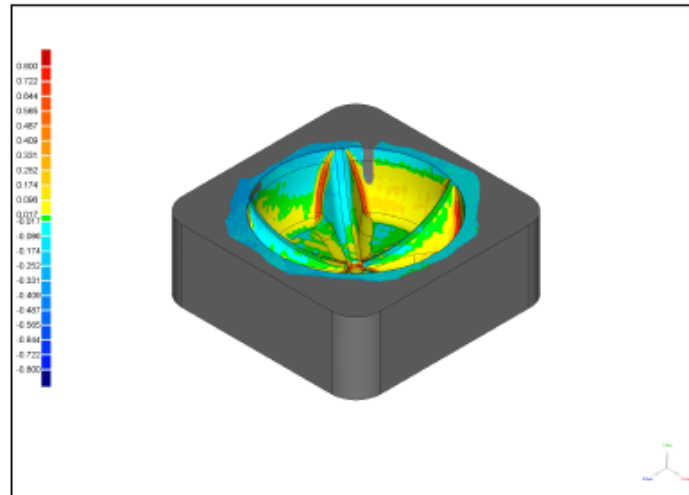
		Key properties	styling/ Design	Models / Data Control Models	Prototypes / small series	Foundry Industry	Ceramics Industry	Various	
Colour	Density		Program proving, Design studies, supporting structures for parts etc	Exterior and interior subings, presentation models, wood texture models	Job 1, Try-out, banner tools, test casting tools, PIM casting models, metal forming, welding Jigs, 3-Cloning, die-casting fixturing	Pattern plates core boxes, models, negatives and support tools	Models production and working models, negatives and support tools	Pre-press by up tools	
White	0.08	light, fine porous	O	•					BM 5108
Apricot	0.24	smooth surface	O	•	•				BM 5025
Sienna	0.3	surface structure	O	•					BM 5030
Apricot	0.47	and mechanical properties increase	O	•					BM 5185
Brown	0.5	density	•	O					BM 5440
Brown	0.7		•	O		•	•	•	BM 5460
Brown	0.75	excellent surface		O		•	•	•	BM 5470
Green	0.72 - 0.75	heat resistant						O	BM 5055
Green	1.2	abrasion resistant			O	O	O		BM 5172
Olive	1.4	abrasion resistant and low CTE			O	O	O		BM 5272
Red	1.5	abrasion resistant			O	O	O		BM 5273
Grey	1.5	high impact resistant			O				BM 5112
Ivory	1.7	excellent strength		O	O				BM 5166
Grey/ brown	1.6 - 1.7	good Compressive strength, low CTE		O	O	•			RS 470
Dark grey	1.7	excellent Compressive strength, high heat deflection temperature			O	•		•	BM 5266

O best choice • possible choice

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Qualify Report

Date Inspected: 6/30/2009
Date Generated: 6/30/2009, 4:39 pm



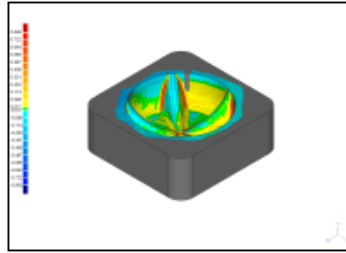
Part: lemoni
Test: Scan 001

3D Comparison Results

Reference Model	lemon1
Test Model	Scan 001
No. of Data Points	514836
# Outliers	3555

Tolerance Type	3D Deviation
Units	mm
Max. Critical	0.800
Max. Nominal	0.017
Min. Nominal	-0.017
Min. Critical	-0.800

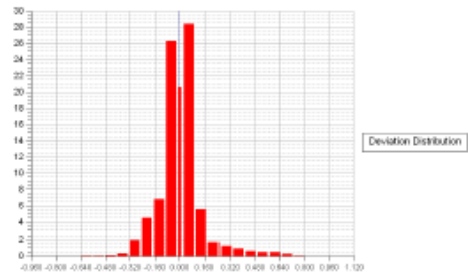
Deviation	mm
Max. Upper Dev.	3.975
Max. Lower Dev.	-0.641
Average Deviation	0.086 /-0.078
Standard Deviation	0.139



Percentage Deviations

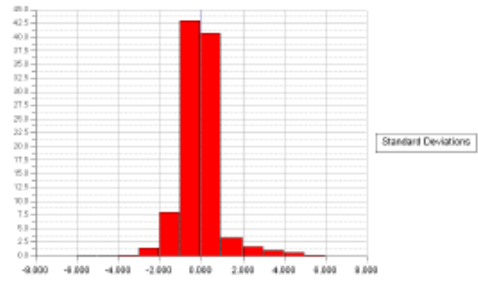
>=Min	<=Max	# Points	%
-0.800	-0.722	0	0.000
-0.722	-0.644	0	0.000
-0.644	-0.565	13	0.003
-0.565	-0.487	47	0.009
-0.487	-0.409	479	0.093
-0.409	-0.331	1501	0.292
-0.331	-0.252	9869	1.917
-0.252	-0.174	23026	4.472
-0.174	-0.096	34904	6.780
-0.096	-0.017	135190	26.259
-0.017	0.017	105935	20.576
0.017	0.096	145096	28.377
0.096	0.174	28479	5.532
0.174	0.252	8663	1.683
0.252	0.331	6250	1.214
0.331	0.409	4481	0.870
0.409	0.487	3223	0.626
0.487	0.565	2590	0.503
0.565	0.644	2371	0.461
0.644	0.722	1235	0.240
0.722	0.800	239	0.046

Out of Upper Critical	245	0.048
Out of Lower Critical	0	0.000

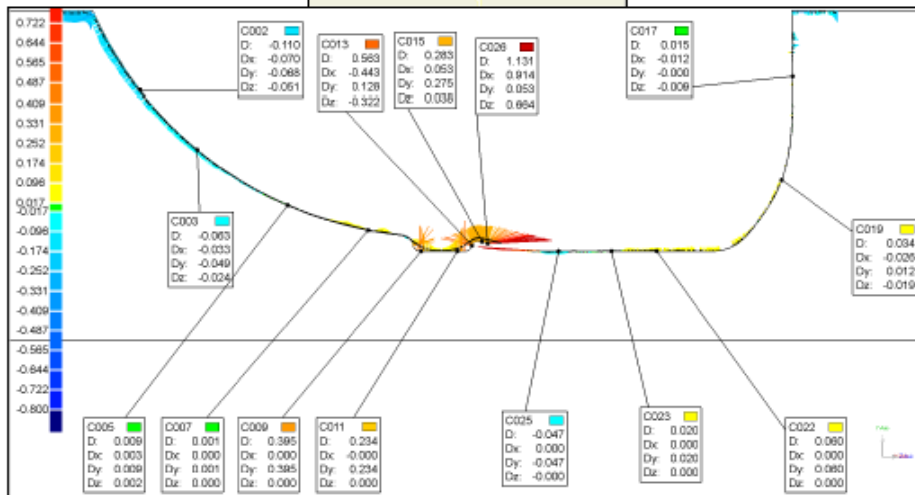
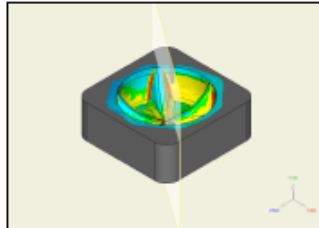


Standard Deviations

Distribution (+/-)	# Points	%
-6 * Std. Dev.	0	0.000
-5 * Std. Dev.	16	0.003
-4 * Std. Dev.	490	0.095
-3 * Std. Dev.	7496	1.456
-2 * Std. Dev.	41062	7.976
-1 * Std. Dev.	221386	43.001
1 * Std. Dev.	209745	40.740
2 * Std. Dev.	16837	3.270
3 * Std. Dev.	8569	1.664
4 * Std. Dev.	5040	0.979
5 * Std. Dev.	3450	0.670
6 * Std. Dev.	745	0.145



Compare 2D: 2D Comparison 1



Method: Planar Deviation

Whisker Scale: 5.000000

Units:mm

CSYS: World CSYS

Name	Dev	Status	Upper Tol.	Lower Tol.	Ref. X	Ref. Y	Ref. Z	Dev. Radius	Dev. X	Dev. Y	Dev. Z	Test X	Test Y	Test Z	Normal X	Normal Y	Normal Z
C019	0.034				24.378	-88.291	17.712		-0.036	0.012	-0.019	24.352	-88.280	17.693			
C017	0.015				25.158	-79.297	18.278		-0.012	-0.000	-0.009	25.146	-79.298	18.269			
C002	-0.110				-21.461	-80.466	-15.592		-0.070	-0.068	-0.051	-21.531	-80.534	-15.643			
C003	-0.063				-17.396	-85.607	-12.639		-0.033	-0.049	-0.024	-17.429	-85.655	-12.663			
C022	0.060				15.450	-94.567	11.225		0.000	0.060	0.000	15.450	-94.507	11.225			
C023	0.020				12.228	-94.567	8.884		0.000	0.020	0.000	12.228	-94.547	8.884			
C025	-0.047				8.427	-94.567	6.123		0.000	-0.047	0.000	8.427	-94.614	6.123			
C026	1.131				3.384	-93.890	2.459		0.914	0.053	0.664	4.298	-93.837	3.123			
C015	0.283				2.973	-93.728	2.160		0.053	0.275	0.038	3.026	-93.452	2.198			
C013	0.553				2.255	-94.084	1.638		-0.443	0.128	-0.322	1.811	-93.955	1.315			
C011	0.234				1.194	-94.567	0.968		0.000	0.234	0.000	1.194	-94.333	0.968			
C009	0.395				-1.389	-94.567	-1.009		0.000	0.395	0.000	-1.389	-94.172	-1.009			
C007	0.001				-5.162	-82.729	-3.750		0.000	0.001	0.000	-5.162	-82.728	-3.750			
C005	0.009				-10.918	-90.534	-7.933		0.003	0.009	0.002	-10.915	-90.515	-7.930			

2D Comparison Results

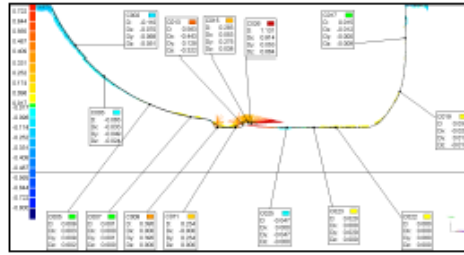
CSYS: World CSYS

Reference Model	lemon1
Test Model	Scan 001

Name	2D Comparison 1
Location	
No. of Data Points	3639

Units	mm
Max. Critical	0.800
Max. Nominal	0.017
Min. Nominal	-0.017
Min. Critical	-0.800

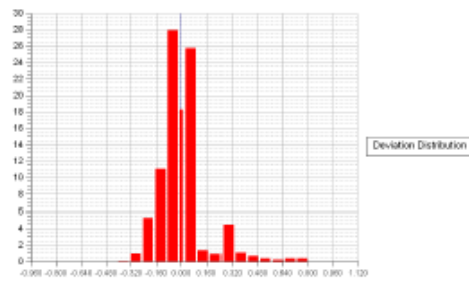
Deviation	mm
Max Dev +	1.131
Max Dev -	-0.403
Standard Deviation	0.171



Percentage Deviations

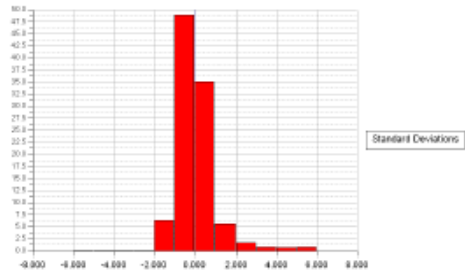
->Min	->Max	# Points	%
-0.800	-0.722	0	0.000
-0.722	-0.644	0	0.000
-0.644	-0.566	0	0.000
-0.566	-0.487	0	0.000
-0.487	-0.409	0	0.000
-0.409	-0.331	2	0.055
-0.331	-0.252	34	0.934
-0.252	-0.174	193	5.304
-0.174	-0.096	402	11.047
-0.096	-0.017	1015	27.892
-0.017	0.017	664	18.247
0.017	0.096	936	25.721
0.096	0.174	48	1.319
0.174	0.252	32	0.879
0.252	0.331	152	4.162
0.331	0.409	38	1.044
0.409	0.487	24	0.660
0.487	0.565	14	0.385
0.565	0.644	7	0.192
0.644	0.722	14	0.385
0.722	0.800	14	0.385

Out of Upper Critical -	40	1.099
Out of Lower Critical -	0	0.000



Standard Deviations

Distribution (+/-)	# Points	%
-5 * Std. Dev.	0	0.000
-5 * Std. Dev.	0	0.000
-4 * Std. Dev.	0	0.000
-3 * Std. Dev.	2	0.055
-2 * Std. Dev.	230	6.320
-1 * Std. Dev.	1780	48.915
1 * Std. Dev.	1278	35.120
2 * Std. Dev.	202	5.551
3 * Std. Dev.	61	1.676
4 * Std. Dev.	28	0.769
5 * Std. Dev.	27	0.742
6 * Std. Dev.	31	0.852



Locations: Upper and Lower Deviations

Units:mm

Name	Dev	Status	Upper Tol	Lower Tol	Ref X	Ref Y	Ref Z	Radius	Dev X	Dev Y	Dev Z	Measured X	Measured Y	Measured Z	Normal X	Normal Y	Normal Z
Lower Dev	-0.641				-26.726	-73.758	-15.846	na	-0.551	-0.002	-0.329	-27.276	-73.761	-16.175	0.858	0.004	0.513
Upper Dev	3.975				7.259	-75.006	-30.115	na	-3.552	1.357	-1.160	3.707	-73.649	-31.279	-0.893	0.341	-0.292

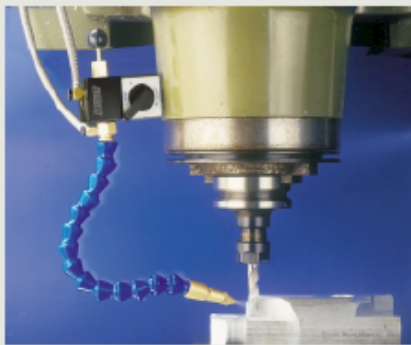
Locations: 2D Comparison 1 Upper and Lower Deviations

Units:mm

Name	Dev	Status	Upper Tol	Lower Tol	Ref X	Ref Y	Ref Z	Radius	Dev X	Dev Y	Dev Z	Measured X	Measured Y	Measured Z	Normal X	Normal Y	Normal Z
2D Comparison 1 Lower Dev.	-0.403				25.136	-73.625	18.263	n/a	0.326	0.000	0.237	25.462	-73.625	18.500			
2D Comparison 1 Upper Dev.	1.131				3.384	-93.890	2.459	n/a	0.914	0.053	0.664	4.298	-93.837	3.123			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η

cooling system



MINICOOL




NOGA MINICOOL is using the VENTURI principle to spray an air + liquid mixture. It consists of the following basic elements:

A control valve, spray unit, air line, syphon line and a powerful on/off Popeye magnet, which has a "V" form base, making it possible to mount on non-flat surfaces. The MINICOOL enables the user to easily control both the air flow rate and liquid rate.

Stainless steel armoured syphon hose and air hose are made in standard lengths: 1m, 2m, 3m (special lengths available upon request).

The spray unit comes in three standard lengths: 264, 334, 479 mm (special lengths available upon request).

Spare parts

	Order no.
	Control valve with Popeye magnet MC0130
	Spray unit 270 mm MC0101 Spray unit 340 mm MC0102 Spray unit 485 mm MC0103
	Air line 1 m MC0380 Air line 2 m MC0302
	Suction line 1 m MC0360 Suction line 2 m MC0311

	Order no.
	Valve stem MC0200
	Filter MC3637
	Washer MC0030
	Nuzzle nut MC0001
	Banjo screw + washer MC0232
	Banjo fitting MC0031

4

NOGA

SIMPLY SOPHISTICATED

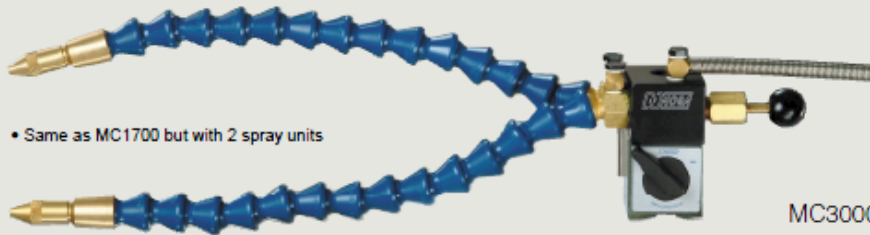
MINICOOL



For maximum heat dissipation and extended tool life

- Strong magnetic base
- Separate on/off air and fluid controls
- Stainless steel armoured syphon hose and air hose
- Nozzle connected via Loc-Line® flexible hose
- Simple, inexpensive, rugged
- Single spray unit

MC1700



- Same as MC1700 but with 2 spray units

MC3000

MINICOOL order no.:

Air hose	Syphon hose	One spray unit of length (mm)			Two spray units of length (mm)		
		264	334	479	264	334	479
1 m	1 m	MC1700	MC1800	MC2000	MC3000	MC3100	MC3200
1 m	2 m	MC1710	MC1810	MC2010	MC3010	MC3110	MC3210
2 m	1 m	MC1720	MC1820	MC2020	MC3020	MC3120	MC3220
2 m	2 m	MC1730	MC1830	MC2030	MC3030	MC3130	MC3230

SIMPLY SOPHISTICATED

INOVA

5