

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

Σύνοψη

Οι τεχνολογίες μορφοποίησης με την αφαίρεση υλικού (κοπή) και οι εργαλειομηχανές, αποτέλεσαν ένα από τα πρώτα πεδία εφαρμογής των Η/Υ για τη βελτίωση της ποιότητας και της παραγωγικότητας των σχετικών διαδικασιών. Στο δεύτερο, αυτό, κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των συμβατικών κατεργασιών κοπής (κοπή με τη χρήση τόρνου, φρέζας, πλάνης και δράπανου) καθώς και η τεχνολογία του Αριθμητικού Ελέγχου με χρήση Η/Υ (CNC - Computer Numerical Control) που χρησιμοποιείται για την ψηφιακή καθοδήγηση των αντίστοιχων εργαλειομηχανών. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η γλώσσα προγραμματισμού APT καθώς και βασικά στοιχεία προγραμματισμού με τη χρήση κώδικα G (G-code). Συνοπτικά παρουσιάζονται, τέλος, τα βασικά χαρακτηριστικά του προγραμματισμού κατεργασιών με τη χρήση Η/Υ (Computer-Aided Process Planning).

2.1 Εισαγωγή στις κατεργασίες κοπής

Όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο, οι κατεργασίες κοπής και ο σχετικός εξοπλισμός αποτέλεσαν ένα από τα πρώτα πεδία ευρείας εφαρμογής των τεχνικών ψηφιακών προγραμματισμού και ελέγχου. Τυπικές κατεργασίες κοπής αποτελούν οι κατεργασίες που εκτελούνται σε εργαλειομηχανές όπως ο τόρνος, η πλάνη, το δράπανο, η φρέζα, κλπ. Η τεχνική και οικονομική σημασία της συγκεκριμένης οικογένειας κατεργασιών είναι, επίσης, ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς χρησιμοποιούνται τόσο για την παραγωγή προϊόντων όσο και για την κατασκευή εξαρτημάτων και εργαλείων παραγωγής για τον παραγωγικό εξοπλισμό όλων, σχεδόν, των υπόλοιπων κατεργασιών. Για όλους αυτούς τους λόγους, οι κατεργασίες κοπής αποτελούν το αντικείμενο του συγκεκριμένου κεφάλαιου, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και οι σχετικές μέθοδοι προγραμματισμού και ψηφιακού ελέγχου του αντίστοιχου εξοπλισμού.

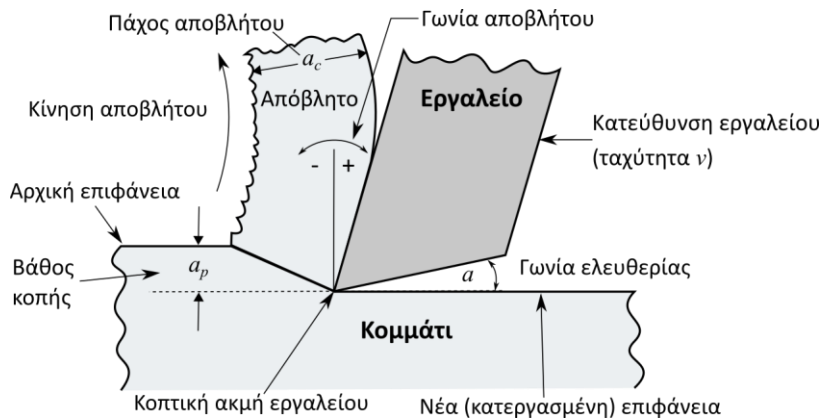
Οι κατεργασίες κοπής (cutting processes) αποτελούν μεθόδους μορφοποίησης στις οποίες η τελική μορφή του παραγόμενου αντικειμένου δημιουργείται από την πρώτη ύλη με βαθμιαία αφαίρεση (πλεονάζοντος) υλικού από την επιφάνεια του (κατεργαζόμενου) κομματιού. Το αφαιρούμενο υλικό δημιουργεί το (ονομάζεται) *απόβλητο*, κοινώς *γρέζι*, (chip). Ο τρόπος σχηματισμού του αποβλήτου, καθώς και οι συνθήκες που τον ελέγχουν, είναι πρακτικά κοινοί για όλες τις εργαλειομηχανές κοπής. Ο σχηματισμός του αποβλήτου στην απλούστερη δυνατή περίπτωση της διδιάστατης (2-Δ), ορθογωνικής, κοπής (η κόψη του εργαλείου είναι κάθετη στη διεύθυνση κοπής) παρουσιάζεται στο Σχ. (2.1). Όπως φαίνεται το κοπτικό εργαλείο εισχωρεί στο υλικό με ταχύτητα v (ταχύτητα κοπής) και σε βάθος (κοπής) a_p . Το απόβλητο δημιουργείται εμπρός από το κοπτικό εργαλείο και μπορεί να θεωρηθεί ότι διολισθαίνει με τρόπο "συνεχή" πάνω στην μπροστινή του επιφάνεια.

Οι κυριότεροι παράγοντες, παράμετροι, στις κατεργασίες κοπής είναι οι εξής.

- Υλικό και η γενική κατάσταση του κοπτικού εργαλείου.
- Μορφή και ποιότητα της επιφάνειας του εργαλείου, καθώς και το πόσο αιχμηρό είναι.
- Γενική κατάσταση, θερμοκρασία και υλικό κατασκευής του κομματιού.
- Συνθήκες κοπής, δηλαδή η ταχύτητα και το βάθος κοπής.
- Χρήση ή μη υγρών κοπής.
- Χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής κοπής (π.χ. στιβαρότητα, ανάπτυξη κραδασμών κλπ.).

Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τα παρακάτω.

- Είδος του σχηματιζόμενου αποβλήτου.
- Δύναμη κοπής και την ενέργεια που καταναλώνεται.
- Αύξηση της θερμοκρασίας στο κομμάτι, στο απόβλητο και στο κοπτικό εργαλείο.
- Φθορά και την τελική αστοχία (θραύση) του κοπτικού εργαλείου.
- Ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας.

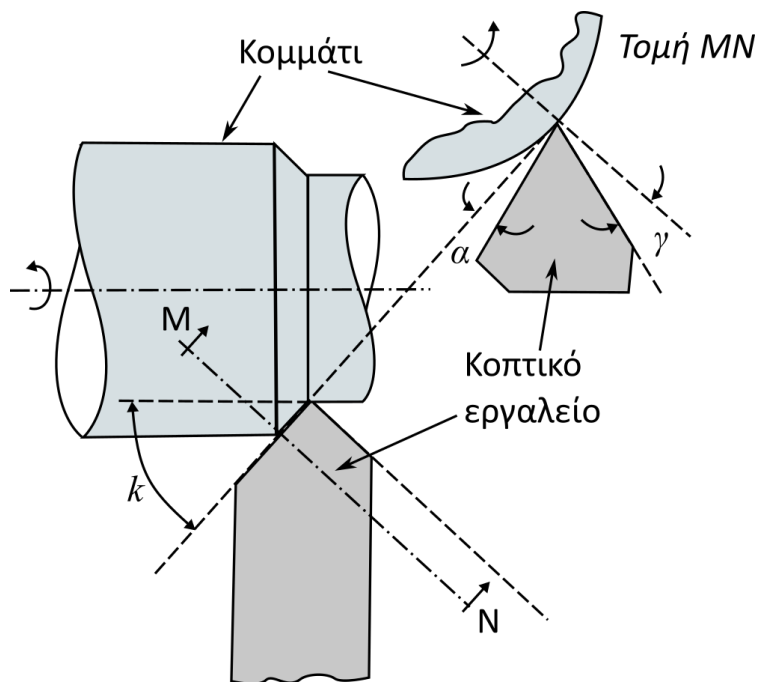


Σχήμα 2.1 Σχηματική παράσταση ορθογωνικής (2-Δ) κοπή (προσαρμογή του "[Metal Cut diag](#)" by Metal_Cut_diag.jpg: Sumanchderivative work: Swisstack - Metal_Cut_diag.jpg. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons)

2.1.1 Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου

Η μορφή του κοπτικού εργαλείου (cutting tool) επηρεάζει τη διαδικασία κοπής σημαντικότητα. Τα βασικά μεγέθη που προσδιορίζουν την γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου φαίνονται στο Σχ. (2.2).

Η **γωνία αποβλήτου** (rake angle) γ επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του αποβλήτου, τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου καθώς και το μέγεθος των δυνάμεων κοπής (διανυσματικό διάγραμμα των δυνάμεων κοπής παρουσιάζεται στο Σχ. (2.4)). Για ψαθυρά υλικά η γωνία γ είναι περίπου μηδενική, η τιμή της δε μειώνεται όσο σκληρότερο είναι το υλικό του κομματιού. Αυξημένη γωνία αποβλήτου συνεπάγεται αιχμηρότερο, όμως ευπαθέστερο, κοπτικό εργαλείο. Συνήθως τα εργαλεία από σκληρομέταλλο, έχουν μικρή γωνία αποβλήτου.



Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση κοπτικού εργαλείου.

Η **γωνία ελευθερίας** (relief or clearance angle) α κυμαίνεται μεταξύ 6° - 8° . Στόχος της είναι η μειωμένη τριβή μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του κομματιού και της επιφάνειας του κομματιού που δημιουργείται από την κατεργασία.

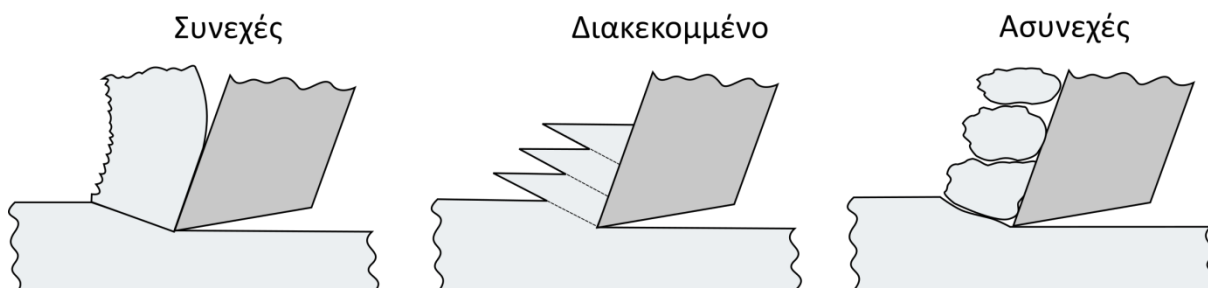
Η **γωνία τοποθέτησης** (major cutting edge angle) k επηρεάζει τόσο την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου όσο και το μέγεθος της δύναμης κοπής. Αύξηση της γωνίας τοποθέτησης συνεπάγεται αύξηση

του πάχους αποβλήτου και μείωση της δύναμης κοπής, ενώ μείωση της γωνίας τοποθέτησης προκαλεί αύξηση του μήκους της ενεργού κόψης του εργαλείου (με σύγχρονη μείωση της θερμοκρασίας του) που τελικά οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του.

2.1.2 Είδη αποβλήτου

Το είδος του αποβλήτου που σχηματίζεται κατά την κοπή επηρεάζει σημαντικότερα τόσο την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας όσο και ολόκληρη την κατεργασία. Το είδος του αποβλήτου που σχηματίζεται εξαρτάται από τα παρακάτω.

- Είδος του υλικού κατασκευής του κομματιού, αν είναι δηλαδή ψαθυρό ή όλκιμο.
- Είδος και τη μορφή, γεωμετρία, του κοπτικού εργαλείου.
- Ταχύτητα κοπής.
- Δυναμικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.
- Βαθμό φθοράς του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.3 Είδη αποβλήτου.

Τα τρία διαφορετικά είδη αποβλήτων, που παρουσιάζονται στο Σχ. (2.3), είναι:

α) Το *συνεχές απόβλητο* που σχηματίζεται κατά την κοπή "μαλακών" μετάλλων με χαμηλές ταχύτητες κοπής και μικρή γωνία αποβλήτου. Το απόβλητο συστρέφεται γύρω από τον εαυτό του κατά ελικοειδή τρόπο. Αν και το συνεχές απόβλητο δημιουργεί στις περισσότερες περιπτώσεις καλής ποιότητας επιφάνειες, εντούτοις η παρουσία του δημιουργεί συνήθως προβλήματα, κυρίως στις ταχείες αυτόματες εργαλειομηχανές κοπής. Αυτό οφείλεται στο ότι το απόβλητο αυτοσυστρεφόμενο περιελίσσεται, πολλές φορές, γύρω από το κοπτικό εργαλείο. Έτσι επιβάλλεται διακοπή της λειτουργίας της εργαλειομηχανής για τον καθαρισμό της από τα απόβλητα. Με την χρησιμοποίηση κοπτικών εργαλείων κατάλληλα διαμορφωμένων που προκαλούν τη θραύση του συνεχούς αποβλήτου επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία της εργαλειομηχανής.

β) Το *διακεκομμένο απόβλητο* που σχηματίζεται στις κατεργασίες κοπής ψαθυρών υλικών, όπως ο χυτοσίδηρος ή ο χυτός ορείχαλκος. Το είδος αυτό του αποβλήτου αμέσως μετά το σχηματισμό του διασπάται σε μικρά πλακίδια που διασκορπίζονται.

γ) Το *ασυνεχές απόβλητο* που σχηματίζεται από μικρά τμήματα που είναι στερεά ή χαλαρά συνδεδεμένα μεταξύ των. Το απόβλητο αυτό δεν έχει συνοχή και θραύεται εύκολα. Οι συνθήκες που οδηγούν σε τέτοιου είδους απόβλητο είναι:

- Υλικό κατασκευής που περιέχει ξένες προσμίξεις ή ασυνέχειες.
- Κοπή με πολύ υψηλές ή χαμηλές ταχύτητες.
- Μεγάλο βάθος κοπής με μικρή γωνία αποβλήτου.
- Μικρή στιβαρότητα της εργαλειομηχανής κοπής.
- Απουσία υγρών κοπής.

Λόγω του ασυνεχούς χαρακτήρα του αποβλήτου οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Έτσι είναι δυνατόν να προκληθούν κραδασμοί στην εργαλειομηχανή που επηρεάζουν δυσμενώς τόσο την ποιότητα της επιφάνειας όσο και την ακρίβεια των τελικών διαστάσεων του παραγόμενου κομματιού.

2.1.3 Δύναμη και ισχύς κοπής

Η γνώση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις κατεργασίες κοπής καθώς και της απαιτούμενης ισχύος επιβάλλεται για τους παρακάτω λόγους:

- Πρέπει να καθοριστούν οι απαιτήσεις ισχύος για την εκτέλεση μιας κατεργασίας κοπής ώστε να εκλεγεί κατάλληλης ισχύος κινητήρια μηχανή για την εργαλειομηχανή.
- Πρέπει να υπάρχουν δεδομένα για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται ώστε να σχεδιαστεί, μελετηθεί, η εργαλειομηχανή κοπής με την κατάλληλη εκείνη στιβαρότητα, που δεν επιτρέπει μεγάλες παραμορφώσεις στα στοιχεία που την απαρτίζουν και επομένως επιτυγχάνει τις επιθυμητές ανοχές κατεργασίας.
- Πρέπει να είναι γνωστό, πριν την εκτέλεση της κατεργασίας, το κατά πόσο το κομμάτι που πρόκειται να κατασκευαστεί αντέχει τις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Διανυσματικό διάγραμμα των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην (ορθογωνική) κοπή παρουσιάζεται στο Σχ. (2.4). Δύναμη κοπής F_c ονομάζεται η συνιστώσα (της συνισταμένης δύναμης) που έχει διεύθυνση παράλληλη με την ταχύτητα κοπής (την ταχύτητα προχώρησης του κοπτικού εργαλείου μέσα στο υλικό - βλ. παράγραφο 2.2).



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα δυνάμεων κοπής.

Προφανώς η ισχύς κοπής P_m δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = F_c v \quad (2.1)$$

Ο προσδιορισμός της δύναμης και της ισχύος κοπής γίνεται χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα. Στον Πίνακα (2.1) παρουσιάζεται η ειδική ενέργεια κοπής, η ενέργεια δηλαδή που απαιτείται για την κοπή, αφαίρεση, υλικού όγκου 1mm^3 , για διάφορα υλικά.

Υλικό	Ειδική ενέργεια κοπής (Ws/mm^3)
Κράματα αλουμινίου	0.4 - 1.1
Κράματα τιτανίου	3.0 - 4.1
Κράματα χαλκού	1.4 - 3.3
Κράματα μαγνησίου	0.4 - 0.6
Κράματα νικελίου	4.9 - 6.8
Κράματα υψηλών θερμοκρασιών	3.3 - 8.5
Χυτοσίδηρος	1.6 - 5.5
Ανοξείδωτος χάλυβας	3.0 - 5.2
Χάλυβας	2.7 - 9.3

Πίνακας 2.1 Ειδική ενέργεια κοπής διαφόρων υλικών.

Η ευρεία διακύμανση των τιμών των ειδικών ενεργειών κοπής για συγκεκριμένο υλικό που φαίνεται στον πίνακα (2.1) οφείλεται στο γεγονός ότι στη διαμόρφωση της δύναμης και ισχύος κοπής υπεισέρχονται

και άλλοι παράγοντες όπως οι συνθήκες κοπής, το κατά πόσο το εργαλείο κοπής είναι ή όχι αρκετά αιχμηρό κλπ. (λιγότερο αιχμηρά κοπτικά εργαλεία συνεπάγονται υψηλότερη δύναμη και ισχύ κοπής).

2.1.4 Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας το κοπτικό εργαλείο υποβάλλεται σε πολύ μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης το κοπτικό ολισθαίνει τόσο επάνω στην δημιουργούμενη επιφάνεια όσο και στο απόβλητο. Προφανώς οι συνθήκες αυτές προκαλούν στο κοπτικό εργαλείο φθορά, η οποία με την σειρά της έχει δυσμενή επίδραση τόσο στην ποιότητα όσο και στην ακρίβεια των διαστάσεων της δημιουργούμενης επιφάνειας. Ετσι όσο το κοπτικό εργαλείο φθείρεται περισσότερο τόσο δυσμενέστερες συνθήκες κοπής επικρατούν. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου επέρχεται σταδιακά. Ο ρυθμός φθοράς εξαρτάται από: το υλικό κατασκευής του κοπτικού εργαλείου και του κομματιού, τη μορφή του εργαλείου, το υγρό κοπής, τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα και βάθος κοπής, ρυθμός πρόωσης, κλπ.) και τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.

Διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου ονομάζεται *"ο πραγματικός χρόνος κοπής που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών τροχίσεών του"*. Σύμφωνα με τον F.W. Taylor (1907) η διάρκεια ζωής του εργαλείου συνδέεται με την ταχύτητα κοπής σύμφωνα με τον παρακάτω εμπειρικό νόμο:

$$v T^n = C \quad (2.2)$$

όπου v είναι η ταχύτητα κοπής και T είναι η διάρκεια ζωής σε min. Ο εκθέτης n είναι συνάρτηση του υλικού κατασκευής του εργαλείου και του κομματιού καθώς και των συνθηκών κοπής, ενώ C είναι σταθερά. Ετσι για κάθε συνδυασμό υλικού κοπτικού εργαλείου και κομματιού και συνθηκών κοπής, υπάρχει ένα ζεύγος τιμών για το n και το C που προσδιορίζονται πειραματικά.

Στον Πίνακα (2.2) δίνεται η τιμή του εκθέτη n για διάφορους συνδυασμούς υλικών εργαλείου και κομματιού. Στο Σχ. (2.5) φαίνεται το διπλό λογαριθμικό διάγραμμα της σχέσης (2.2) για διάφορα υλικά κοπτικού. Η σχέση στο διάγραμμα παριστάνεται ως ευθεία με κλίση την τιμή του εκθέτη n .

Η φθορά του κοπτικού εργαλείου πραγματοποιείται σε περιορισμένη περιοχή κοντά στο άκρο του. Παλαιότερα τα εργαλεία κατασκευάζονταν ως ένα (ολόσωμο) τεμάχιο. Η τάση σήμερα είναι τα κοπτικά εργαλεία να αποτελούνται από δύο μέρη, το *σώμα* και το *κοπτικό άκρο* (insert) (βλ. Σχ. 2.6). Ετσι όταν η φθορά που έχει πραγματοποιηθεί είναι σημαντική αντικαθίσταται μόνο το κοπτικό άκρο. Μέ τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία δεδομένου ότι μόνο το περιορισμένων διαστάσεων κοπτικό άκρο αποτελείται από το υψηλής αντοχής, και επομένως ακριβό, υλικό.

Υλικό εργαλείου	Υλικό κομματιού	n
Ταχυχάλυβας	Χάλυβας	0,125
	Χυτοσίδηρος	0,140
Σκληρομέταλλο	Χάλυβας	0,200
	Χυτοσίδηρος	0,250
Κεραμικό υλικό	Χάλυβας	0,500

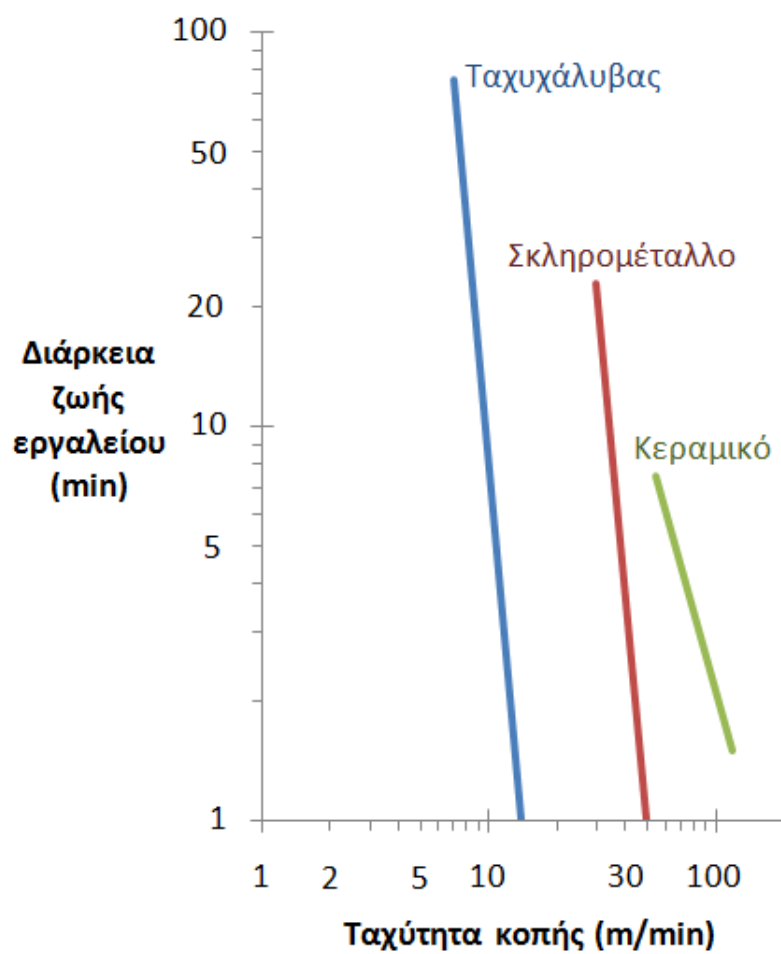
Πίνακας 2.2 Τιμές εκθέτη n της σχέσης Taylor.

Όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, ο ρυθμός αφαίρεσης (κοπής) υλικού είναι ανάλογος του βάθους κοπής, της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα περιθώρια αύξησης της πρόωσης καθώς και του βάθους κοπής είναι περιορισμένα. Ετσι αν η συνολική ποσότητα (όγκος) του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί είναι δεδομένη, τότε αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε μείωση του χρόνου κατεργασίας, παραγωγής.

Η επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας κοπής επηρεάζεται από παράγοντες όπως:

- Επιθυμητή διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.
- Υλικό και μορφή του εργαλείου.
- Κατεργαζόμενο κομμάτι (σχήμα, υλικό, κατάσταση επιφάνειας, κλπ.).
- Χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής κοπής (στιβαρότητα, ισχύς, περιοχή στροφών, διάταξη αποκομιδής αποβλήτων, κλπ.).

- Χρήση ή μη υγρών κοπής.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα διάρκειας ζωής κοπτικών εργαλείων.



Σχήμα 2.6 Εργαλείο με αποσπώμενα άκρα κοπής (https://pixabay.com/static/uploads/photo/2014/09/13/21/48/drill-444511_960_720.jpg by blickpixel, Pixabay, licenced under CC0).

2.2 Εισαγωγή στις Εργαλειομηχανές Κοπής

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιοριστούμε στην εξέταση των κυριότερων μόνων εργαλειομηχανών (machine tools) κοπής. Οι πρώτες εργαλειομηχανές (E/M) κοπής εμφανίστηκαν γύρω στα τέλη του 18ου αιώνα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μια από τις πρώτες εφαρμογές E/M κοπής ήταν εκείνη που χρησιμοποίησε ο J. Watt για την εσωτερική τόννευση του χυτού κυλίνδρου της πρώτης ατμομηχανής που κατασκεύασε.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να διακρίνουμε τις E/M κοπής είναι:

- 1) Είδος της εκτελούμενης εργασίας.
- 2) Μέγεθος.
- 3) Ποιότητα και ακρίβεια διαστάσεων παραγόμενης επιφάνειας.
- 4) Βαθμός αυτοματισμού.

Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο οι E/M κοπής διακρίνονται σε:

- Τόρνους (εκ περιστροφής επιφάνειες, επίπεδες, ελκώσεις).
- Φρέζες (επίπεδες επιφάνειες, οδοντώσεις, ελκώσεις).
- Πλάνες (κυρίως επίπεδες επιφάνειες, αυλακώσεις).
- Δράπανα (οπές).
- Λειαντικές μηχανές (κατεργασίες αποπεράτωσης).
- Πριόνια (περιστροφικά ή παλινδρομικά).
- Ειδικές E/M (οδοντώσεων, ελκώσεων, κλπ.).
- Πολυάτρακτες, μονοάτρακτες (χαρακτηρίζει πολλαπλότητα ταυτόχρονα εκτελουμένων εργασιών).

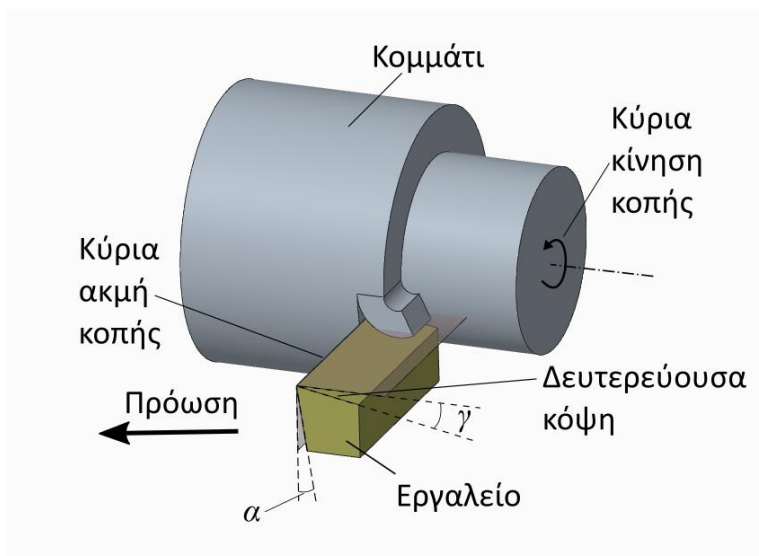
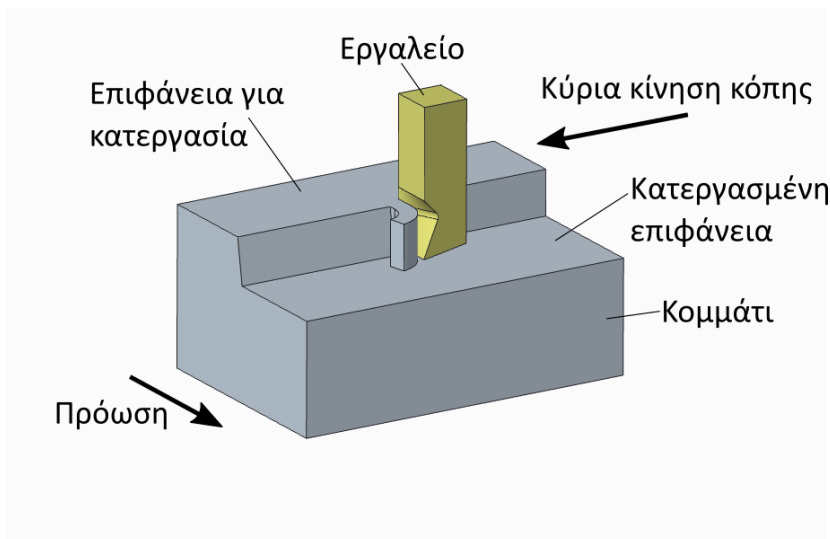
Οι E/M κοπής χρησιμοποιούνται από την ελαφρά μηχανουργία (π.χ. κατασκευή ρολογιών, οργάνων, μικροσυσκευών, κλπ.) μέχρι την βαρεία μηχανουργία (π.χ. ναυπηγική βιομηχανία, βαρέα χωματοουργικά μηχανήματα, κλπ.). Σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο οι E/M κοπής χαρακτηρίζονται από τις διαστάσεις του κομματιού που κατεργάζονται.

Το τρίτο κριτήριο αναφέρεται στην ακρίβεια διαστάσεων και μορφής του κατασκευαζόμενου κομματιού, ενώ το τέταρτο κριτήριο αναφέρεται στον βαθμό συμμετοχής του χειριστή κατά τη διάρκεια της εκτελούμενης κατεργασίας κοπής. Ετσι υπάρχουν από τις απλές E/M όπου ο χειριστής έχει τον πλήρη έλεγχο των κινήσεων της E/M (σήμερα τείνουν να εκλείψουν οι E/M αυτού του τύπου), μέχρι τις *αυτόματες E/M αριθμητικού ελέγχου* (Computer Numerically Controlled - CNC) όπου οι κινήσεις της E/M και η όλη διαδικασία ελέγχεται από τον H/Y της μονάδας ελέγχου σύμφωνα με το καταχωρημένο στη μνήμη πρόγραμμα (βλ. παρ. 2.5-6). Στις *ημιαυτόματες E/M* ή στις *συμβατικές E/M αριθμητικού ελέγχου - NC* η παρέμβαση του χειριστή είναι σχετικά περιορισμένη, π.χ. χειροκίνητη εισαγωγή προγράμματος κατεργασίας, χειροκίνητη στερέωση ή απομάκρυνση κομματιού από τραπέζι E/M, κλπ.

2.2.1 Κινήσεις εργαλειομηχανών

Η αρχή που χρησιμοποιείται στις E/M κοπής είναι ότι η *επιθυμητή επιφάνεια του κομματιού δημιουργείται μέσω κατάλληλων σχετικών κινήσεων του κοπτικού και του κατεργαζόμενου κομματιού*.

Καθώς η κύρια κόψη του κοπτικού εργαλείου εισχωρεί στο υλικό του κομματιού αφαιρεί βαθμιαία στρώμα υλικού (απόβλητο) δημιουργώντας την επιθυμητή επιφάνεια. Οι απλούστερες δυνατές επιφάνειες που δημιουργούνται είναι η *επίπεδη* και η *κυλινδρική* (εσωτερική ή εξωτερική) επιφάνεια. Ετσι για παράδειγμα αν το κοπτικό εργαλείο εκτελεί (ευθύγραμμη) παλινδρομική κίνηση και το κομμάτι προωθείται, κινείται, κατά διακριτό τρόπο σε διεύθυνση κάθετη με αυτή της κίνησης του κοπτικού τότε δημιουργείται *επίπεδη επιφάνεια* στο κατεργαζόμενο κομμάτι, (Σχ. 2.7). Με ανάλογο τρόπο σχηματίζεται *κυλινδρική επιφάνεια* περιστρέφοντας το κομμάτι και προωθώντας το κοπτικό εργαλείο παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής του κομματιού, (Σχ. 2.7).



Σχήμα 2.7 Δημιουργία επίπεδης (επάνω) και κυλινδρικής επιφάνειας (κάτω) με κατεργασία κοπής.

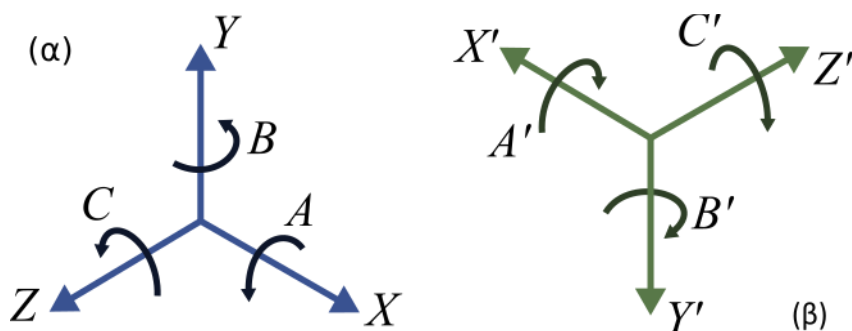
Είναι λοιπόν φανερό ότι στις Ε/Μ κοπής απαιτούνται δύο ειδών (σχετικών) κινήσεων, η *κύρια κίνηση κοπής* και η *δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης*.

Η *κύρια κίνηση κοπής* (primary motion) προκαλεί τη σχετική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο κομμάτι κατά τρόπο τέτοιο ώστε η κύρια κόψη του κοπτικού να ωθείται να εισχωρήσει στο (προς αφαίρεση) υλικό του κομματιού. Συνήθως η κύρια κίνηση κοπής απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ισχύος που απαιτείται για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης κατεργασίας.

Η *κίνηση πρόωσης* (feed motion) είναι η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και κομματιού που προσφέρει σταθερά στο κοπτικό εργαλείο νέο υλικό προς αφαίρεση, κοπή. Η κίνηση πρόωσης γίνεται, συνήθως, από το κοπτικό εργαλείο (π.χ. τόνος, δράπανο, κλπ.). Μερικές φορές όμως η κίνηση πρόωσης γίνεται από το κατεργαζόμενο κομμάτι (π.χ. φρέζα, ταχυπλάνη, κλπ.). Η κίνηση της πρόωσης μπορεί να είναι είτε συνεχής είτε διακριτή, απορροφά δε ένα μικρό μόνον ποσοστό της συνολικής ισχύος της κατεργασίας.

Οι διάφορες κινήσεις στις Ε/Μ κοπής περιγράφονται με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος συντεταγμένων. Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό τυποποίησης ISO (International Organization for Standards) χρησιμοποιείται δεξιόστροφο σύστημα καρτεσιανών αξόνων X, Y και Z για την περιγραφή όλων των δυνατών μεταφορικών κινήσεων του κοπτικού εργαλείου, καθώς και τρεις κινήσεις A, B και C που αναφέρονται σε όλες τις δυνατές περιστροφές του κοπτικού εργαλείου ως προς του αντίστοιχους άξονες συντεταγμένων. Το σύστημα συντεταγμένων παρουσιάζεται στο Σχ. (2.8α). Ας σημειωθεί ότι μπορεί να οριστεί σύστημα συντεταγμένων που αναφέρεται στην κίνηση του κατεργαζόμενου κομματιού,

αντικειμένου, και όχι στην κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Το τελευταίο αυτό σύστημα χρησιμοποιεί τονούμενα σύμβολα (Σχ. 2.8β), διευθύνεται δε εντελώς αντίθετα από το πρώτο (αν το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει το αντικείμενο κινούμενο για παράδειγμα κατά τον θετικό X , έχουμε το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα θεωρώντας ότι το αντικείμενο κινείται κατά τη θετική X' διεύθυνση).



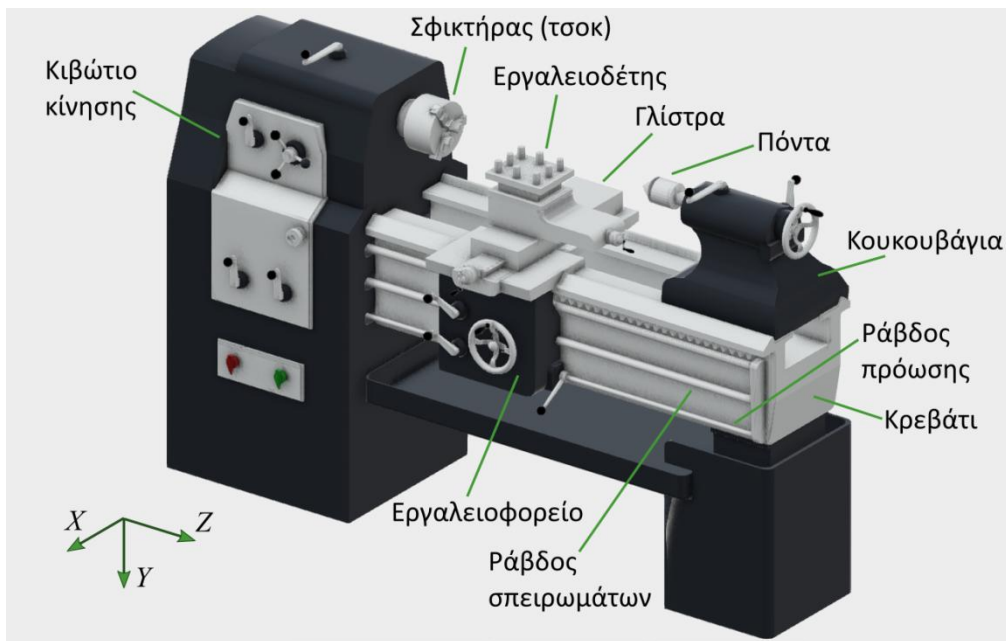
Σχήμα 2.8 Συστήματα συντεταγμένων που περιγράφουν την κίνηση: (α) κοπτικού εργαλείου και (β) κομματιού.

Γενικά ο άξονας Z διευθύνεται ώστε να είναι παράλληλος με την κύρια άτρακτο της Ε/Μ που δημιουργεί την κύρια κίνηση κοπής. Στην περίπτωση όπου η Ε/Μ δεν διαθέτει κύρια άτρακτο, ο άξονας Z διευθύνεται παράλληλα με το τραπέζι εργασιών της Ε/Μ, την επιφάνεια δηλαδή συγκράτησης του κομματιού, η θετική δε έννοια του Z , είναι κατά την φορά αύξησης της απόστασης μεταξύ κομματιού και κοπτικού εργαλείου.

Όπου είναι δυνατόν, ο άξονας X είναι οριζόντιος και παράλληλος με το τραπέζι εργασίας. Στις Ε/Μ χωρίς κύρια άτρακτο κίνησης ο άξονας X είναι παράλληλος προς την κύρια διεύθυνση κοπής, η οποία συμπίπτει και με τη θετική έννοιά του. Στις Ε/Μ όπου το κατεργαζόμενο κομμάτι περιστρέφεται, ο άξονας X διευθύνεται ακτινικά με τη θετική του έννοια να ταυτίζεται με τη φορά κίνησης του κοπτικού καθώς αυτό απομακρύνεται από τον άξονα περιστροφής του αντικειμένου.

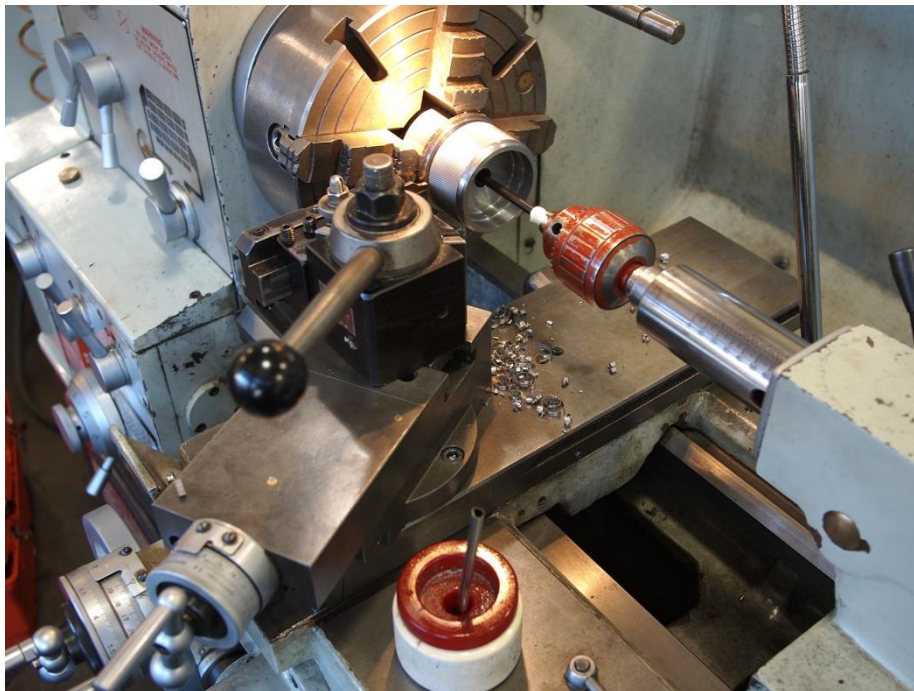
2.2.2 Τόρνος

Ενας κοινός τόρνος (lathe) φαίνεται διαγραμματικά στο Σχ. (2.9). Τα κύρια μέρη του τόρνου είναι η κλίνη, κρεβάτι, στην οποία στηρίζονται, το κιβώτιο κίνησης, το εργαλειοφορείο και η κουκουβάγια. Το κατεργαζόμενο κομμάτι συγκρατείται στην μία άκρη στο σφιγκτήρα κοινώς τσοκ, στην άλλη δε (που είναι κατάλληλα διαμορφωμένη - φέρει μικρή οπή) στην πόντα. Η κουκουβάγια μπορεί να στερεωθεί σε διάφορες θέσεις της κλίνης, μετακινούμενη επί των πρισματοδηγών. Ετσι είναι δυνατή η κατεργασία αντικειμένων διαφόρων μηκών. Η κύρια κίνηση κοπής δημιουργείται με την περιστροφή του αντικειμένου κατά την έννοια C' (βλ. Σχ. 2.9). Η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής επιτυγχάνεται με επιλογή κατάλληλων συνδυασμών οδοντωτών τροχών στο κιβώτιο ταχυτήτων (κίνησης).



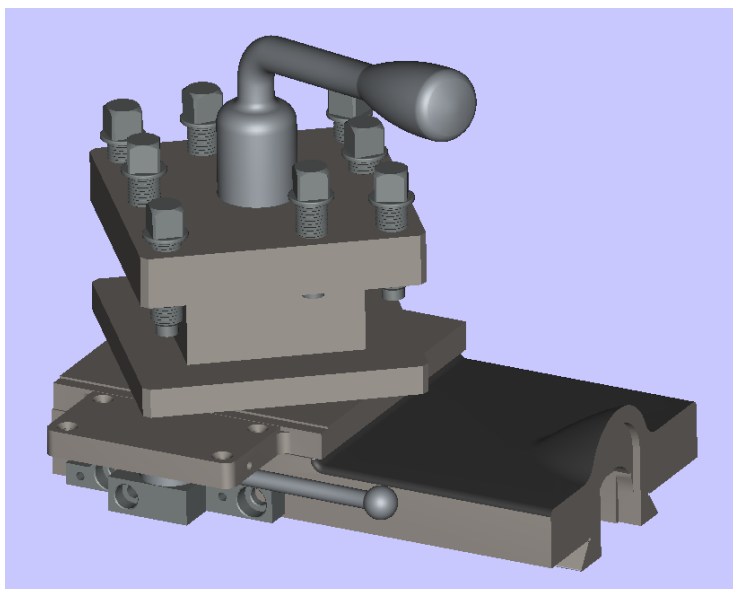
Σχήμα 2.9 Κοινός τόνος.

Το κοπτικό εργαλείο είναι κατάλληλα προσδεδεμένο στο εργαλειοφορείο, λεπτομέρεια του οποίου παρουσιάζεται στο Σχ. 2.10. Το εργαλειοφορείο κινείται κατά την έννοια του άξονα Z μέσω της *ράβδου πρόωσης* (Σχ. 2.9). Επίσης το κοπτικό εργαλείο έχει τη δυνατότητα κίνησης και κατά την έννοια του άξονα X (ακτινικά), ολισθαίνοντας επάνω στην *γλίστρα* του εργαλειοφορείου.



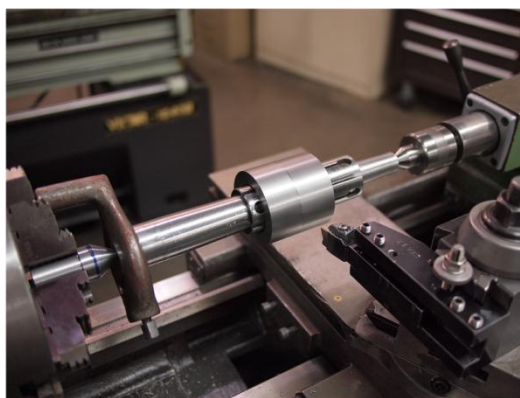
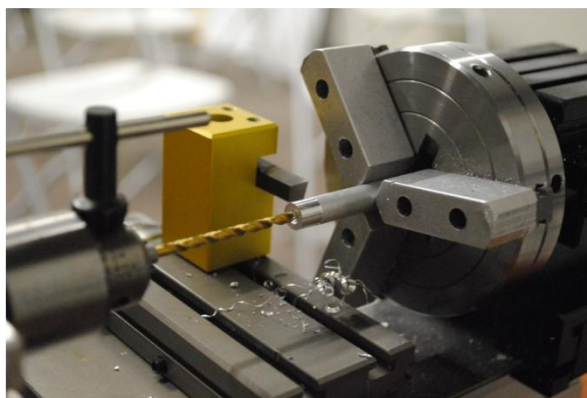
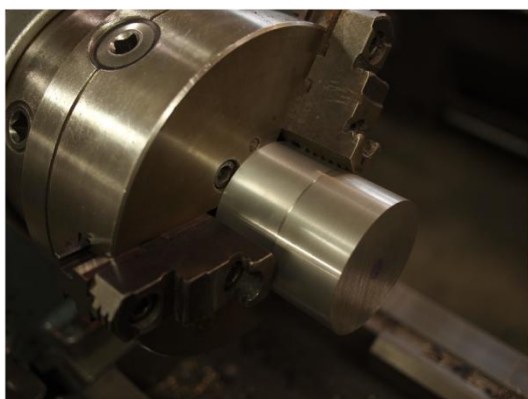
Σχήμα 2.10 Εργαλειοφορείο συμβατικού τόνου ([Bench block: parting setup](#) by Kirill Ignatyev, Flickr, licenced under CC BY-NC 2.0)

Παράδειγμα σύνθετης διάταξης για την στήριξη κοπτικών εργαλείων σε εργαλειοδέτη συμβατικού τόνου παρουσιάζεται στο Σχ. 2.11.



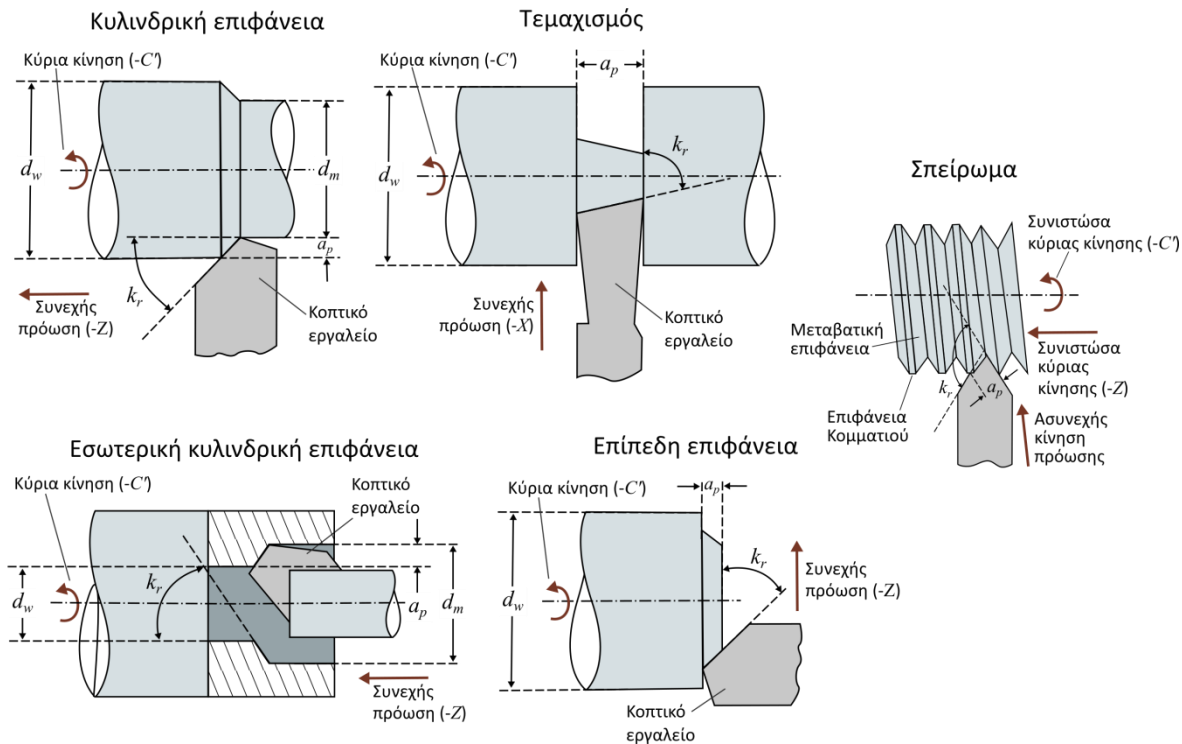
Σχήμα 2.11 Πολλαπλός εργαλειοδέτης συμβατικού τόρνου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κομμάτι συγκρατείται στον τόρνο από το τσοκ μέσω τριών ή τεσσάρων *μάγουλων*, (Σχ. 2.12). Αν δεν είναι δυνατή η συγκράτηση του κομματιού στο τσοκ, η συγκράτηση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας *καρδιά*, (Σχ. 2.12, κάτω αριστερά). Σε περίπτωση ειδικών τορνεύσεων, π.χ. τórνευση κομματιού ακανόνιστου σχήματος, έκκεντρη τórνευση, κλπ. χρησιμοποιούνται κατάλληλες ειδικές διατάξεις για την συγκράτηση του κομματιού στο *πλατώ* του τόρνου.



Σχήμα 2.12 Διάφορες διατάξεις συγκράτησης κομματιού και κατεργασίες σε τόρνο ([2-6-UNC-2B nut](#), [2-6-UNC-2B nut: threading with boring bar](#) & [2-6-UNC-2B nut: turning on the expanding mandrel](#) by Kirill Ignatyev, Flickr, licenced under CC BY-NC 2.0, [Drill, baby, drill!](#) By .dh – Flickr – licenced under CC BY 2.0)

Ο τόρνος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κυλινδρικής ή επίπεδης επιφάνειας. Χρησιμοποιείται επίσης για εσωτερική τόννευση (δημιουργία εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας), κοπή σπειρώματος καθώς και για τεμαχισμό, κοπή σε μέρη, ενός αντικειμένου. Οι τυπικές αυτές κατεργασίες κοπής που εκτελούνται στον τόρνο και οι αντίστοιχοι τρόποι και οι αντίστοιχες προώσεις που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο Σχ. 2.13.



Σχήμα 2.13 Διάφοροι τρόποι τόννευσης.

Ένας τυπικός, συμβατικός (μη προγραμματιζόμενος) τόρνος παρουσιάζεται στη φωτογραφία του Σχ. 2.14. Αντίστοιχος τόρνος CNC παρουσιάζεται στη φωτογραφία του Σχ. 2.15.



Σχήμα 2.14 Συμβατικός τόρνος ("[HwacheonCentreLathe 460x1000](#)" by Glenn McKechnie - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons).



Σχήμα 2.15 Τόρνος CNC ([Draaibank](http://www.draaibank.nl) by Een producent van draaibanken - www.stylehightech.nl. Licensed under Public Domain via Commons)

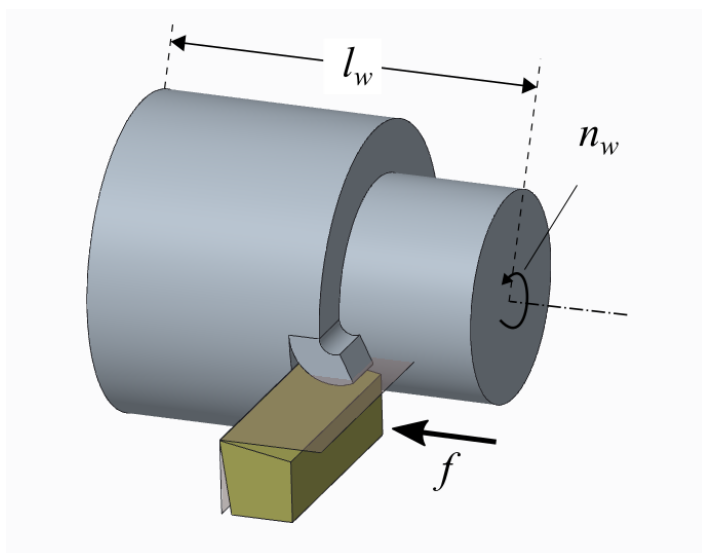
2.2.2.1 Σχέσεις κοπής

Ο ρυθμός πρόωσης (feed rate) f , σε όλες τις Ε/Μ κοπής, ορίζεται ως η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το κομμάτι κατά την έννοια της κίνησης πρόωσης ανά διαδρομή κατεργασίας, πάσσο, ή ανά περιστροφή του αντικειμένου ή του εργαλείου κατεργασίας.

Αναφορικά με τον τόρνο για τη δημιουργία κυλινδρικής επιφάνειας μήκους l_w (Σχ. 2.16), ο χρόνος κατεργασίας t_m που απαιτείται είναι:

$$t_m = \frac{l_w}{f n_w} \quad (2.3)$$

όπου n_w είναι η κυκλική συχνότητα περιστροφής του κομματιού (δηλαδή της ατράκτου κίνησης του τόρνου).

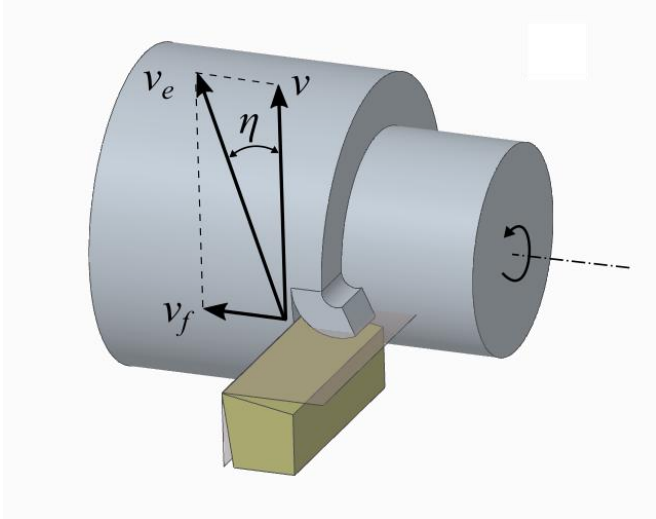


Σχήμα 2.16 Τυπική κατεργασία κοπής σε τόρνο.

Τονίζεται ότι ο χρόνος t_m που δίνεται από την εξ. (2.3) αφορά το χρόνο κατεργασίας ενός μόνο πάσσο, δηλαδή μιας μόνο διαδρομής. Στις περισσότερες κατεργασίες κοπής ένα μόνο πάσσο δεν είναι

αρκετό. Συνήθως το πρώτο πάσσο εκτελείται με μεγάλη τιμή πρόωσης f έτσι ώστε να αφαιρείται μεγάλη ποσότητα υλικού, η δημιουργούμενη όμως επιφάνεια είναι κακής ποιότητας. Η (επόμενη) κατεργασία αποπεράτωσης (τελική) εκτελείται με μικρή πρόωση f ώστε να επιτευχθούν καλύτερης ποιότητας επιφάνεια και μεγαλύτερης ακρίβειας τελικές διαστάσεις.

Η ταχύτητα κοπής που είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ αντικειμένου και κοπτικού εργαλείου αναφέρεται στην κύρια κίνηση κοπής. Στις κατεργασίες του τόρνου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διάμετρο, είτε της αρχικής είτε της τελικής (κατεργασμένης) επιφάνειας, d_o ή d_f αντίστοιχα. Το διανυσματικό διάγραμμα της ταχύτητας κοπής v και της ταχύτητας προχώρησης του κοπτικού v_f (που οφείλεται στην πρόωση του εργαλείου) παρουσιάζεται στο Σχ. 2.17.



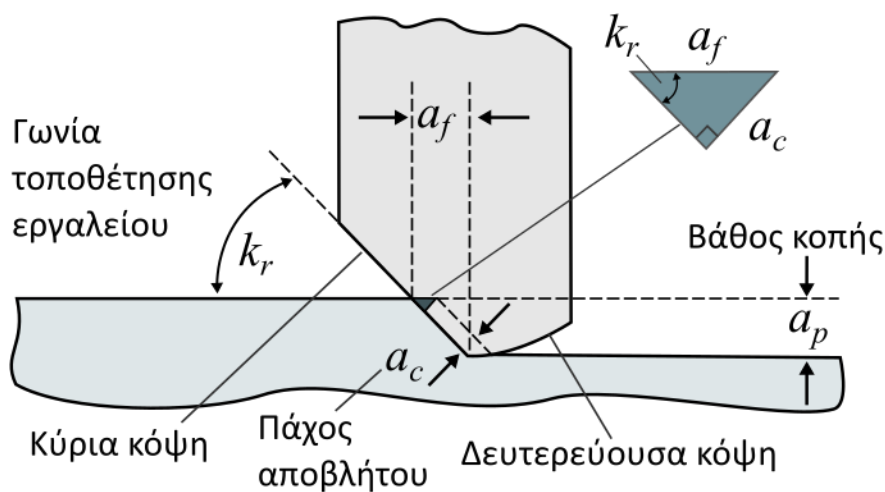
Σχήμα 2.17 Διανυσματικό διάγραμμα ταχυτήτων τυπικής κατεργασίας κοπής σε τόρνο.

Το βάθος κοπής a_p , το βάθος δηλαδή που εισδύει το κοπτικό εργαλείο στο υλικό του κομματιού, είναι:

$$a_p = \frac{d_o - d_f}{2} \quad (2.4)$$

Το πάχος αποβλήτου a_c , συνδέεται με την γωνία τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου k_r (Σχ. 2.18), ως:

$$a_c = a_f \sin k_r \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.18 Κοπτικό εργαλείο τόρνου.

Από το Σχ. 2.18 φαίνεται ότι η διατομή του αποβλήτου A_c είναι:

$$A_c = a_c \frac{a_p}{\sin k_r} \xrightarrow{(2.5)} A_c = a_f \cdot a_p \quad (2.6)$$

Ο ρυθμός αφαίρεσης (κοπής) υλικού Z_w (ή ρυθμός παραγωγής, δημιουργίας, αποβλήτου) είναι επομένως:

$$Z_w = A_c v_{av} \quad (2.7)$$

όπου v_{av} είναι η μέση ταχύτητα κοπής (εκείνη που αναφέρεται δηλαδή στην μέση διάμετρο).

Τέλος, η ισχύς κοπής P_m είναι επομένως:

$$P_m = p_s Z_w \quad (2.8)$$

όπου p_s είναι η ειδική ενέργεια κοπής και δίνεται για διάφορα υλικά (Πίν. 2.1).

2.2.3 Πλάνη

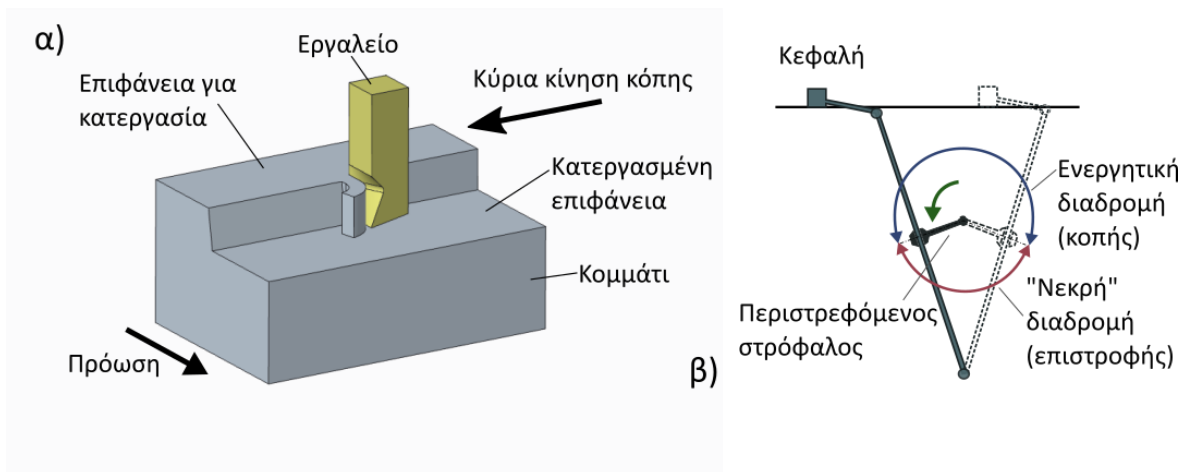
Η πλάνη (shaper) είναι μικρή Ε/Μ κοπής που χρησιμοποιεί για τη δημιουργία επίπεδων επιφανειών σε σχετικά μικρών διαστάσεων κομμάτια. Τα κύρια μέρη της πλάνης είναι το σώμα, που είναι συνήθως χυτοσιδηρό, η κεφαλή και το τραπέζι. Μια απλή συμβατική πλάνη παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 2.19. Το κοπτικό εργαλείο της πλάνης που συγκρατείται στο άκρο της κεφαλής της εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση, κύρια κίνηση κοπής (Σχ. 2.20α).

Είτε η πλάνη είναι μηχανική είτε είναι υδραυλική η ενεργητική διαδρομή της κεφαλής κατά την οποία αφαιρείται υλικό από το κομμάτι είναι σχετικά βραδύτερη από την νεκρή διαδρομή (επιστροφής) της κεφαλής. Στις μηχανικές πλάνες χρησιμοποιείται ειδική διάταξη (Σχ. 2.20β), ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη επιστροφή της κεφαλής.

Η πρόωση είναι ασυνεχής, δημιουργείται δε από την κίνηση του τραπεζιού, στο οποίο συγκρατείται το κομμάτι, κατά έννοια κάθετη προς την παλινδρομική κίνηση της κεφαλής, (Σχ. 2.20α).

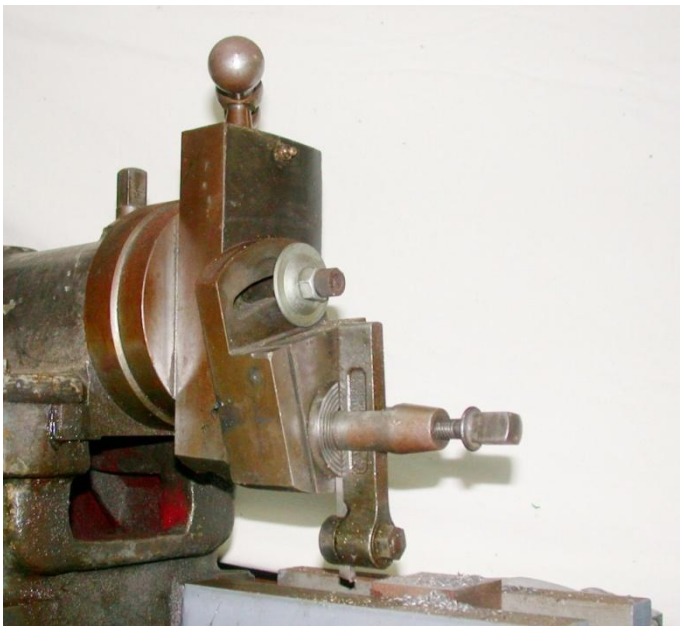


Σχήμα 2.19 Συμβατική πλάνη ([Shaping machine](#) by Les Chatfield – Flickr.com, licenced under CC BY 2.0).

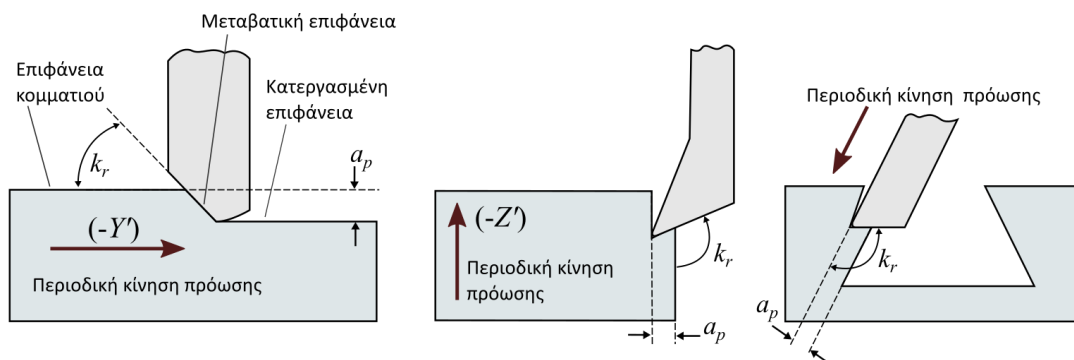


Σχήμα 2.20 (α) Σχετική κίνηση κοπτικού εργαλείου και κομματιού σε κατεργασία πλανίσματος και (β) μηχανισμός κίνησης κεφαλής.

Στο Σχ. (2.21) παρουσιάζεται λεπτομέρεια του άκρου της κεφαλής της πλάνης όπου συγκρατείται το κοπτικό εργαλείο, ενώ στο Σχ. (2.22) εμφανίζονται κοπτικά εργαλεία διαφόρων γεωμετριών για ειδικές κατεργασίες καθώς και διάφορες τοποθετήσεις του τραπεζιού της πλάνης.

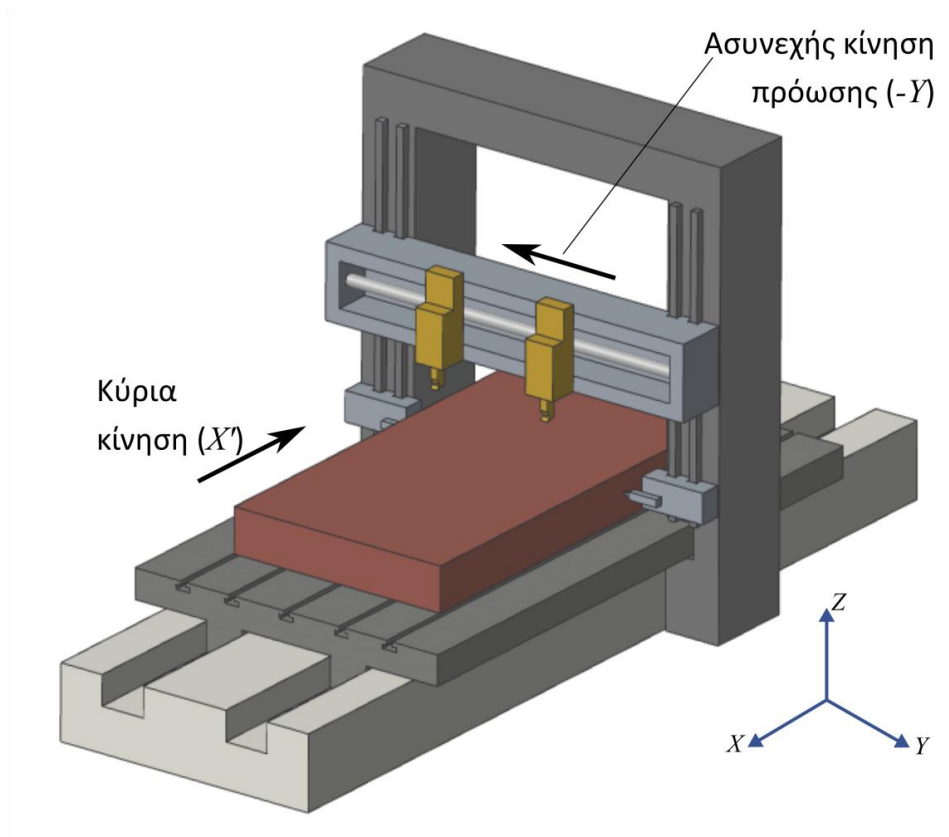


Σχήμα 2.21 Διάταξη συγκράτησης κοπτικού εργαλείου σε απλή πλάνη ([ShaperSlideClapperBox](#) by Glenn McKechnie - Own work. Licensed under CC BY-SA 2.5 via Commons).



Σχήμα 2.22 Κοπτικά εργαλεία πλάνης διαφόρων μορφών.

Για την κατεργασία αντικειμένων μεγάλων διαστάσεων χρησιμοποιούνται *τραπεζοπλάνες* (planing machine / planer) (Σχ. 2.23). Η τραπεζοπλάνη διαφέρει από την πλάνη στο ότι η κύρια κίνηση κοπής εφαρμόζεται στο αντικείμενο ενώ η πρόωση στο κοπτικό εργαλείο (Σχ. 2.23).



Σχήμα 2.23 Τραπεζοπλάνη.

2.2.3.1 Σχέσεις κοπής

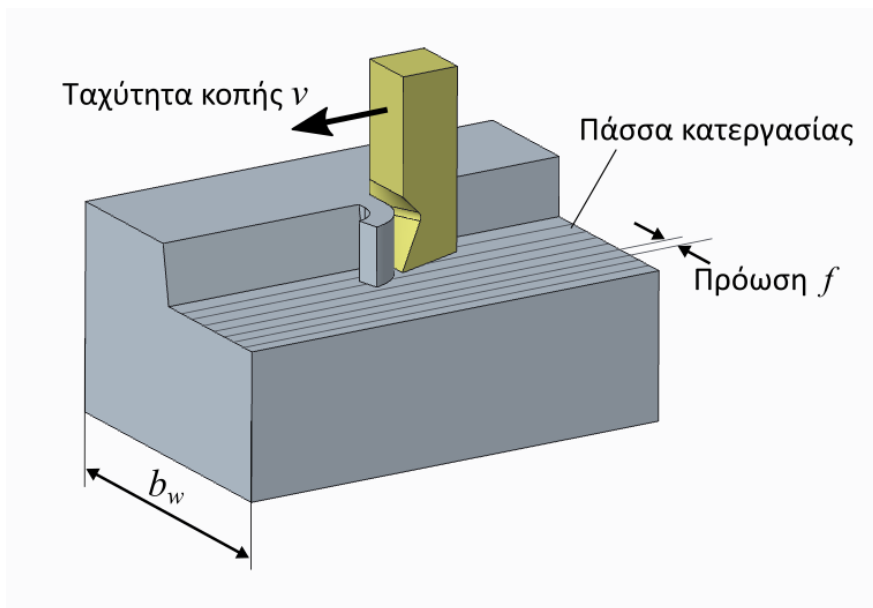
Ο χρόνος κατεργασίας, κοπής, t_m , αντικειμένου πλάτους b_w , στην πλάνη είναι (βλ. Σχ. 2.24):

$$t_m = \frac{b_w}{f n_r} \quad (2.9)$$

όπου f είναι η πρόωση του κοπτικού εργαλείου και n_r η κυκλική συχνότητα της παλινδρομικής κίνησης της πλάνης.

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού Z_w εκφράζεται όπως και για τον τόρνο ως (Σχ. 2.24):

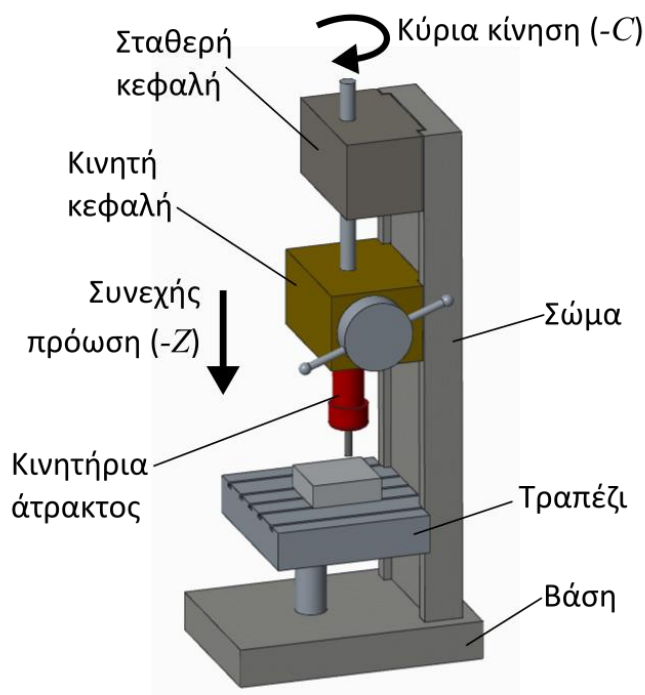
$$Z_w = A_c v = f a_p v \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.24 Κατεργασία κοπής σε πλάνη.

2.2.4 Δράπανο

Το *δράπανο* (drilling machine) είναι Ε/Μ που χρησιμοποιείται για την διάνοιξη οπών. Διαγραμματικά ένα δράπανο παρουσιάζεται στο Σχ. 2.25. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιούν τα δράπανα ονομάζεται *τρυπάνι* (twist drill), διαθέτει δε περισσότερες της μιας κύριες ακμές κοπής (Σχ. 2.26), σε αντίθεση με τα κοπτικά εργαλεία του τόρνου και της πλάνης. Τα τρυπάνια αυτά (κοπτικά εργαλεία) θεωρούνται κατάλληλα για διάνοιξη οπών βάθους μικρότερου του πενταπλάσιου της διαμέτρου των. Το τρυπάνι συγκρατείται από τσοκ (Σχ. 2.27) που είναι απευθείας συνδεδεμένο με την κινητήρια άτρακτο του.

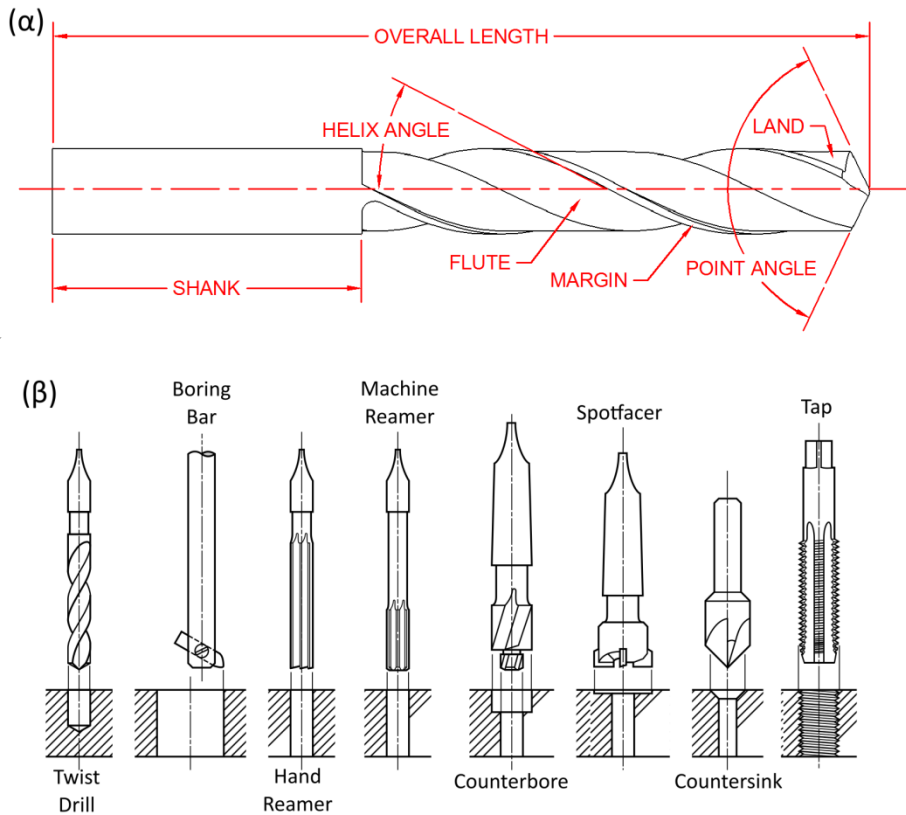


Σχήμα 2.25 Απλό δράπανο.

Κατά την κατεργασία, (διάνοιξη της οπής) το αντικείμενο παραμένει ακίνητο στερεά συνδεδεμένο με το τραπέζι του δράπανου. Η πρόωση του κοπτικού που μπορεί να είναι και χειροκίνητη πραγματοποιείται

κατά την έννοια του άξονα Z ενώ η κύρια, περιστροφική, κίνηση του κοπτικού είναι κατά την έννοια της περιστροφής C.

Στο Σχ. (2.28) παρουσιάζονται διάφοροι τύποι συμβατικών δράπανων ενώ στο Σχ. (2.29) παρουσιάζεται ένα ακτινικό δράπανο (radial arm-drill) κατάλληλο για κατεργασίες βαρέων αντικειμένων.



Σχήμα 2.26 (α) Τυπικό κοπτικό εργαλείο (τρύπάνι) δράπανου ([Twist Drill - Basic Geometry](#) by Robert Hewitt - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons) και (β) διάφορα είδη τρυπανιών για ειδικές χρήσεις (προσαρμογή του [Machined Holes by Inductiveload](#) - Own work. Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons).



Σχήμα 2.27 Σφικτήρας (τσοκ) δράπανου ([Drill Chuck in a Mini Mill](#) by Tudor Barker- Flickr.com, licenced under CC BY-NC-SA 2.0).



Σχήμα 2.28 Συμβατικά δράπανα ([Drill Presses](#) by Decaseconds- Flickr.com licenced under CC BY-NC 2.0).



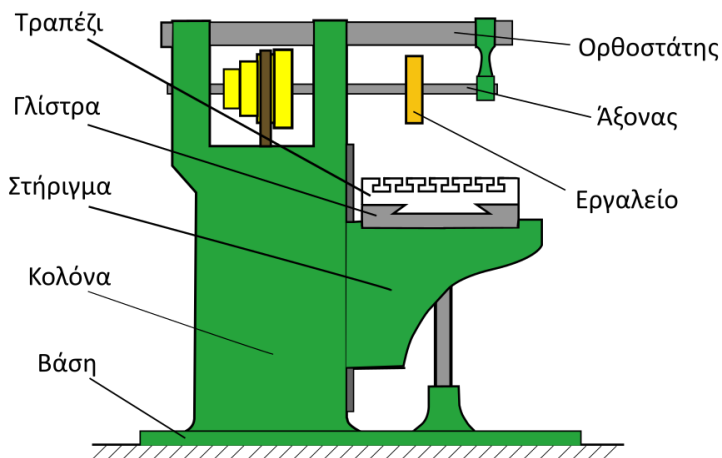
Σχήμα 2.29 Ακτινικό δράπανο (προσαρμογή του „[Radial arm drill](#)“ von Márton Kiss-Albert - Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons).

2.2.5 Φρέζα

2.2.5.1 Οριζόντια φρέζα

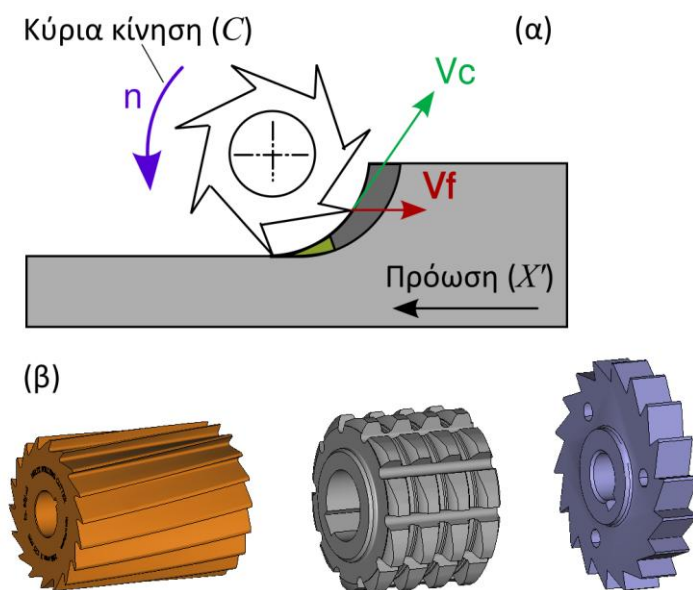
Ανάλογα με το πώς διευθύνεται η κινητήρια άτρακτος στις φρέζες (milling machines), σχετικά με το τραπέζι των, διακρίνονται σε οριζόντιες και κατακόρυφες.

Διαγραμματική παράσταση μιας συμβατικής *οριζόντιας φρέζας* (horizontal miller) και του τρόπου με τον οποίο κινείται το κοπτικό εργαλείο σχετικά με το αντικείμενο παρουσιάζονται στο Σχ. 2.30 αντίστοιχα. Η κύρια κίνηση πραγματοποιείται από την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, ενώ η πρόωση εφαρμόζεται στο αντικείμενο μέσω της μετακίνησης του τραπέζιού. Το απλό οριζόντιο φρεζάρισμα χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία επίπεδων επιφανειών.



Σχήμα 2.30 Συμβατική οριζόντια φρέζα ("[Milling machine diagram](#)" by HUB1 - Own work. Licensed under GFDL via Commons).

Στο Σχ. 2.31 παρουσιάζεται η σχετική κίνηση κοπτικού εργαλείου σε οριζόντιο φρεζάρισμα καθώς και κοπτικά εργαλεία διαφόρων μορφών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αντίστοιχης μορφής επιφανειών με οριζόντιο φρεζάρισμα. Τονίζεται ότι το κοπτικό εργαλείο της φρέζας διαθέτει πολλές ακμές κοπής.



Σχήμα 2.31 (α) Σχετική κίνηση κοπτικού εργαλείου και κομματιού σε οριζόντιο φρεζάρισμα (προσαρμογή του "[Fraisage en concordance](#)" by Crochet.david - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons) και (β) κοπτικά εργαλεία οριζόντιας φρέζας, διάφορων μορφών.

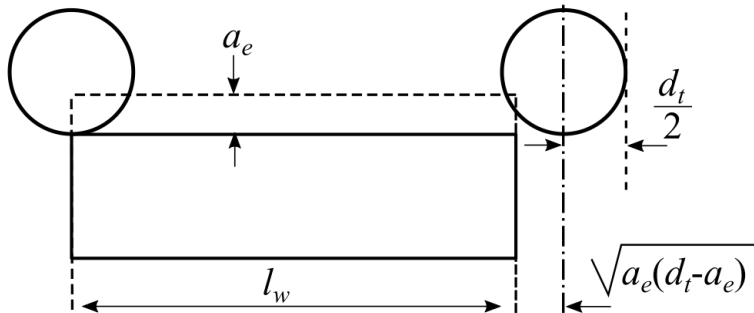
Στο απλό οριζόντιο φρεζάρισμα ο ρυθμός πρόωσης f ορίζεται ως η απόσταση κατά την οποία κινείται το κοπτικό σε μία πλήρη περιστροφή του. Έτσι, αν v_f είναι η ταχύτητα πρόωσης του αντικειμένου και n_t είναι η συχνότητα περιστροφής του κοπτικού, προκύπτει ότι:

$$f = \frac{u_f}{n_t} \quad (2.11)$$

Αναφερόμενοι στο Σχ. 2.32 ο χρόνος κατεργασίας t_m για οριζόντιο φρεζάρισμα επιφάνειας μήκους l_w είναι:

$$t_m = \frac{l_w + \sqrt{a_e(d_t - a_e)}}{v_f} \quad (2.12)$$

όπου d_t είναι η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.32 Οριζόντιο φρεζάρισμα σε μήκος l_w .

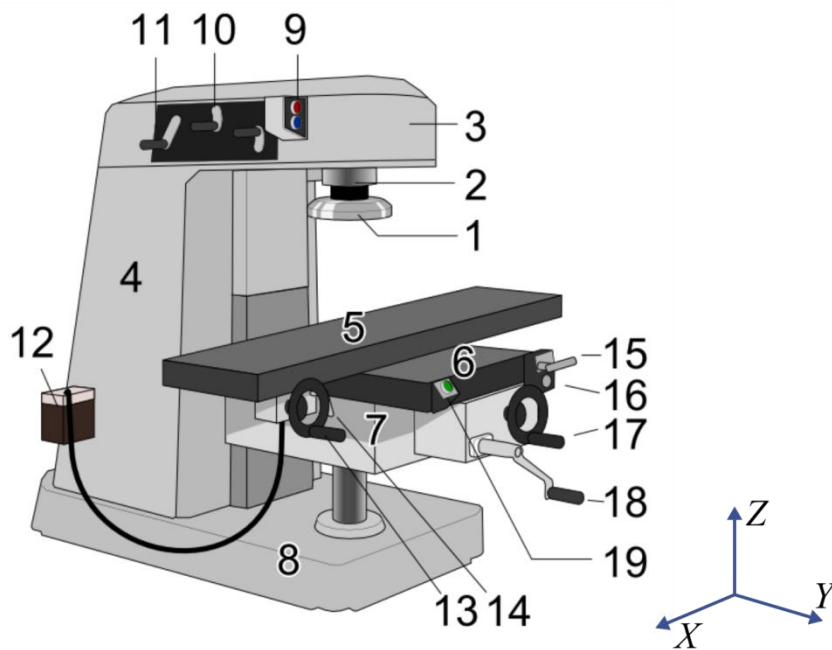
Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού επομένως θα είναι:

$$Z_W = a_e a_p v_f \quad (2.13)$$

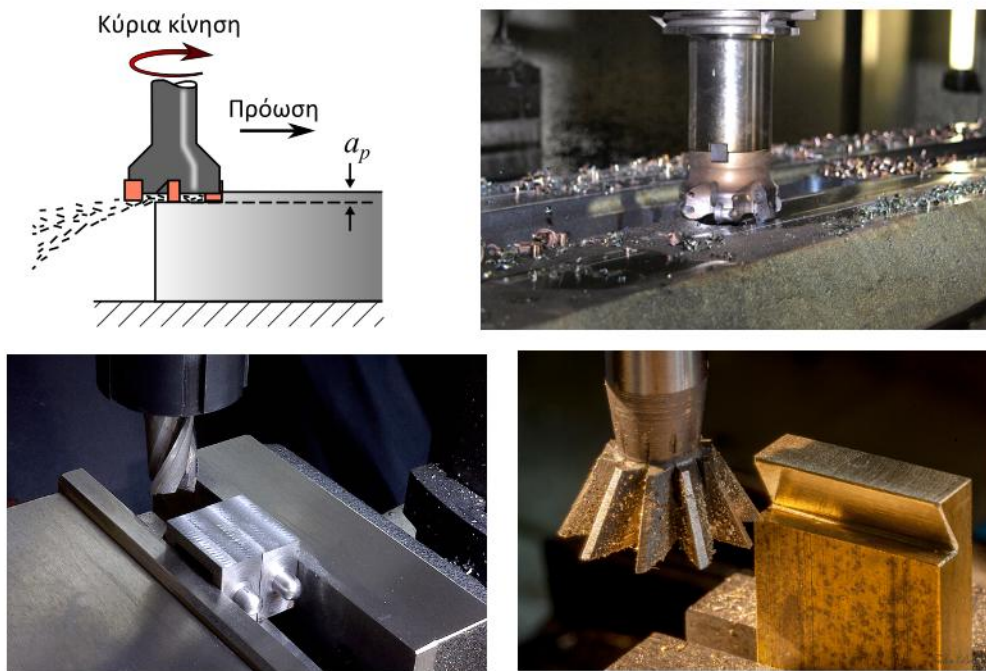
Ας σημειωθεί ότι αν η λόγω της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου γραμμική ταχύτητα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, είναι ίδιας φοράς με την ταχύτητα πρόωσης του αντικειμένου (climbing), τότε αναπτύσσεται μικρότερη δύναμη κοπής οπότε και καταναλώνεται μικρότερη ισχύς κατά την κατεργασία.

2.2.5.2 Κατακόρυφη φρέζα

Διάταξη κατακόρυφης φρέζας (vertical millers) και του τρόπου κίνησης του κοπτικού της εργαλείου παρουσιάζεται στο Σχ. 2.33, όπου απεικονίζονται και τα βασικά στοιχεία μιας κατακόρυφης φρέζας: η βάση (8), η κολόνα (4), ο ορθοστάτης (3), το τραπέζι κατεργασίας (5) και τα αντίστοιχα όργανα ελέγχου (15-18), το στήριγμα του τραπεζιού (7), η γλίστρα (6), η άτρακτος και τα αντίστοιχα όργανα ελέγχου (2, 9, 10, 11) και το κοπτικό εργαλείο (1). Η πρόωση του αντικειμένου μπορεί να γίνει κατά τρεις διαφορετικές έννοιες, δηλαδή είτε κατά τον άξονα Z' , είτε κατά τον άξονα Y' , είτε κατά τον X' . Κατακόρυφο φρεζάρισμα με διαφορετικής μορφής κοπτικά εργαλεία παρουσιάζεται στο Σχ. 2.34.



Σχήμα 2.33 Συμβατική κατακόρυφη φρέζα.



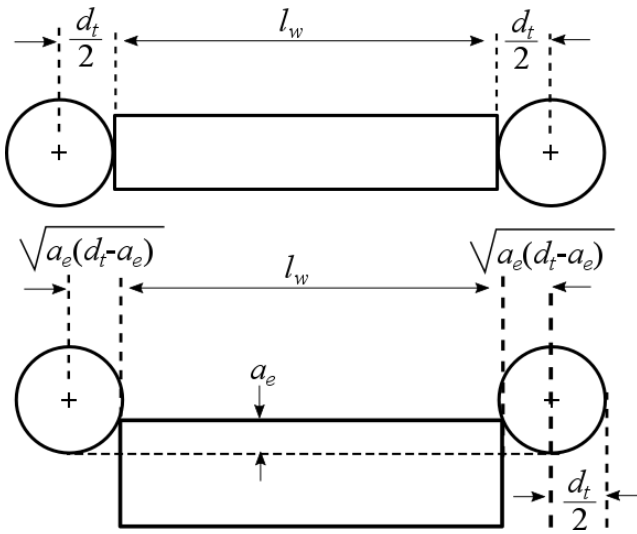
Σχήμα 2.34 Σχετική κίνηση κοπτικού εργαλείου και κομματιού σε κατακόρυφο φρεζάρισμα (επάνω αριστερά, προσαρμογή του [Fraisage surfaceage by Milling.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraisage_surfaceage_by_Milling.png): Pasixxxxderivative work: Cdang (talk) - Milling.png. Licensed under Public Domain via Commons) και κατακόρυφο φρεζάρισμα με κοπτικά εργαλεία διαφόρων μορφών (<https://pixabay.com/en/milling-machining-cutter-head-1137974> by gefrorene_wand-Pixabay.com- lic. under CC0, D10 “[Stuart Milling the valve Chests](https://www.flickr.com/photos/tudorbarker/1137974/)” & “[Milling a 60 Degree Chamfer in Brass Plate](https://www.flickr.com/photos/tudorbarker/1137974/)” by Tudor Barker-Flickr.com-lic. under CC BY-NC-SA 2.0)

Ο ρυθμός πρόωσης στο κατακόρυφο φρεζάρισμα δίνεται πάλι από την σχέση (2.11), ενώ οι χρόνοι κατεργασίας, κατακόρυφου φρεζαρίσματος, ανάλογα με το αν η διάμετρος του κοπτικού είναι μεγαλύτερη ή όχι από το πλάτος του κομματιού, αντικειμένου (Σχ. 2.35), είναι αντίστοιχα:

$$t_m = (l_w + d_t) v_f \quad (2.14\alpha)$$

και

$$t_m = \frac{l_m + 2\sqrt{a_e(d_t - a_e)}}{v_f} \quad (2.14\beta)$$



Σχήμα 2.35 Κατακόρυφο φρεζάρισμα κομματιού με πλάτος (α) μικρότερο ή (β) μεγαλύτερο από τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου.

2.3. Συμβατικός Αριθμητικός Έλεγχος

Τα περισσότερα επιτεύγματα του CAD/CAM έχουν αφετηρία τον αριθμητικό έλεγχο. Ο αριθμητικός έλεγχος (numerical control - NC) θα μπορούσε να οριστεί ως «μια μορφή προγραμματιζόμενης αυτοματοποίησης στην οποία η κατεργασία, παραγωγική διαδικασία, ελέγχεται μέσω χαρακτήρων αριθμών, γραμμάτων ή/και άλλων συμβόλων. Οι χαρακτήρες αυτοί απαρτίζουν πρόγραμμα εντολών κατάλληλα διαμορφωμένο για την κατεργασία - παραγωγή ενός κομματιού - αντικειμένου ή για τη ρύθμιση μιας συνθετότερης εργασίας». Αν η εργασία που πρόκειται να εκτελεσθεί μεταβληθεί, μεταβάλλονται ορισμένες εντολές που απαρτίζουν το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τον αριθμητικό έλεγχο ιδιαίτερα ευέλικτο, δεδομένου ότι είναι πολύ πιο εύκολο να γραφεί ένα νέο πρόγραμμα παρά να γίνουν αλλαγές στον παραγωγικό εξοπλισμό.

Η τεχνολογία NC έχει εφαρμοσθεί σε διάφορες λειτουργίες του παραγωγικού κύκλου ενός προϊόντος όπως π.χ. στη σχεδίαση, συναρμολόγηση, επιθεώρηση, σημειακή συγκόλληση, διαμόρφωση μεταλλικών φύλλων, κλπ. Ο αριθμητικός έλεγχος χρησιμοποιείται κυρίως στις κατεργασίες κοπής των μετάλλων.

Η ευελιξία των E/M NC (που είναι συνέπεια της δυνατότητας προγραμματισμού των) τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για την κατεργασία κομματιών σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους παρτίδες.

Ο συμβατικός αριθμητικός έλεγχος βασίζεται κυρίως στην πρωτοποριακή δουλειά του J.T. Parsons στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Ο Parsons επινόησε μια μέθοδο για να ελέγχει μια E/M χρησιμοποιώντας διάτρητες καρτέλες που περιείχαν τις συντεταγμένες της γεωμετρίας του κομματιού που κατασκεύαζε. Η E/M αυτή χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή αεροτομών συγκεκριμένης μορφής.

Το 1948 η πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ ανέθεσε στο Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του MIT (Massachusetts Institute of Technology) να εξελίξει την ιδέα του Parsons, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων φρεζών NC την περίοδο 1952-53. Η τεχνολογία NC, που εξελίσσεται καθημερινά, προωθήθηκε ιδιαίτερα από τις βιομηχανίες αεροπορικών κατασκευών.

Εκτός των E/M NC που αναπτύχθηκαν, σημαντική προσπάθεια επενδύθηκε και για την ανάπτυξη κατάλληλης «γλώσσας» προγραμματισμού των μηχανών NC. Αποτέλεσμα της προσπάθειας ήταν η δημιουργία της γλώσσας APT, η οποία χρησιμοποιείται σήμερα ως πρότυπο (standard) για τον προγραμματισμό (κατεργασίας) κομματιού σε E/M NC.

2.3.1 Βασικά στοιχεία συστήματος αριθμητικού ελέγχου

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος NC είναι: (α) Το πρόγραμμα εντολών, (β) η μονάδα ελέγχου και (γ) η E/M. Διαγραμματική παρουσίαση των στοιχείων αυτών παρουσιάζεται στο Σχ. (2.36).



Σχήμα 2.36 Διαγραμματική παράσταση των βασικών στοιχείων συστήματος NC ([PaperTapes-5and8Hole](#) by TedColes - Own work. Licensed under Public Domain via Commons, "[Paper tape reader on a CNC control 001](#)" by Three-quarter-ten - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons, [Sharp 3 Axis Vertical Mill Full View](#) by BUEngineer - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons).

Το πρόγραμμα εντολών (program of instructions) είναι το λεπτομερές σύνολο, που περιγράφει σε διαδοχικά βήματα, τις εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν από την Ε/Μ. Το πρόγραμμα είναι συνήθως γραμμένο σε αριθμητική ή συμβολική μορφή. Για την εισαγωγή του προγράμματος στην μονάδα ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά και σύμφωνα με την εξέλιξη της τεχνολογίας διάφορα μέσα (χάρτινη διατρητή ταινία, μαγνητική ταινία, μαγνητικός ή οπτικός δίσκος, δίσκοι στερεάς κατάστασης κοκ.), ενώ πλέον η μεταφορά του από τον σχετικό Η/Υ πραγματοποιείται όλο και συχνότερα μέσω του τοπικού δικτύου.

Στις περισσότερες Ε/Μ υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα προγραμματισμού απευθείας στη μηχανή, χρησιμοποιώντας δηλαδή χειριστήρια και οθόνη τα οποία είναι ενσωματωμένα σε αυτή. Ο συγκεκριμένος τρόπος προγραμματισμού χρησιμοποιείται για απλές κατεργασίες, αντικειμένων με απλή σχετικά γεωμετρία.

Τονίζεται ότι το πρόγραμμα εντολών ετοιμάζεται από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό, τους προγραμματιστές. Η εργασία των προγραμματιστών είναι να καταστρώσουν ένα σύνολο εντολών που προδιαγράφουν με ακρίβεια τη διαδοχή των ενεργειών που πρέπει να εκτελεστούν από την αριθμητικά ελεγχόμενη μηχανή-συσκευή. Αναφορικά με τις κατεργασίες κοπής, το πρόγραμμα εντολών περιέχει τις σχετικές κινήσεις μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κομματιού.

Η μονάδα ελέγχου της μηχανής (Machine Control Unit - MCU), περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές και μηχανικές συσκευές που "διαβάζουν" - "αποκρυπτογραφούν" το πρόγραμμα εντολών και στη συνέχεια το μετατρέπουν σε μηχανικές κινήσεις της Ε/Μ. Καθώς το πρόγραμμα διαβάζεται καταχωρείται στην προσωρινή μνήμη (data buffer). Οι εντολές κατόπιν διοχετεύονται μέσω καναλιών σημάτων (signal output channels) προς την Ε/Μ.

Για να πιστοποιηθεί η ορθή εκτέλεση των εντολών που μεταβιβάστηκαν στην Ε/Μ διοχετεύονται προς την μονάδα ελέγχου σήματα που προέρχονται από αισθητήρες της Ε/Μ. Τα σήματα αυτά διοχετεύονται μέσω των καναλιών ανάδρασης (feedback channels), πληροφορώντας την μονάδα ελέγχου για την σχετική τοποθέτηση εργαλείου (κοπής) και κομματιού. Γενικώς οι διάφορες λειτουργίες που εκτελούνται από την μονάδα ελέγχου πρέπει να είναι συγχρονισμένες, απαιτώντας κάποιο συντονισμό. Για τον λόγο αυτό στη μονάδα ελέγχου των συγχρόνων συστημάτων NC υπάρχει ενσωματωμένο σύστημα ψηφιακού ελέγχου / μικροπολογιστής.

Στην μονάδα ελέγχου ή στην Ε/Μ NC υπάρχει συνήθως πίνακας ελέγχου (control panel) που φέρει οθόνη και διακόπτες μέσω των οποίων ο χειριστής ρυθμίζει την λειτουργία του συστήματος NC (Σχ. 2.37). Ας σημειωθεί ότι αν και τα συστήματα NC είναι αυτοματοποιημένα, εντούτοις είναι αναγκαία η ύπαρξη χειριστή που θέτει σε λειτουργία το σύστημα, αλλάζει κοπτικό εργαλείο, τοποθετεί το κομμάτι στην Ε/Μ, κλπ.



Σχήμα 2.37 Παρακολούθηση κατεργασίας σε Ε/Μ NC ([B1 machining](#) by U.S. Air Force photo/Margo Wright - Licensed under Public Domain via Commons).

Τέλος η Ε/Μ αποτελεί, προφανώς, το στοιχείο αυτό του συστήματος NC είναι εκείνο το οποίο εκτελεί την χρήσιμη εργασία. Τονίζεται ότι υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των συσκευών NC,

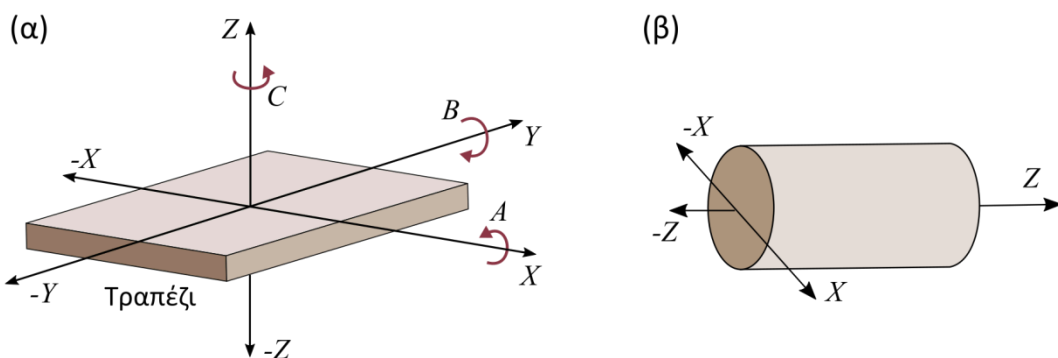
αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και το βαθμό αυτοματοποίησής των. Στο Σχ. 2.38 παρουσιάζεται ένα αυτόματο κέντρο κατεργασίας NC (machining center), το οποίο αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη της συμβατικής φρέζας και είναι εξοπλισμένο συνήθως με μηχανισμό αυτόματης αλλαγής εργαλείων, σύστημα παροχής ψυκτικού υγρού και διαθέτει περικλειστο χώρο κατεργασίας.



Σχήμα 2.38 Κέντρο κατεργασίας CNC ([DeckelMaho-DMU50e-MachiningCenter](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DMU50e-MachiningCenter.jpg), Licensed under CC BY-SA 2.0 via Wikimedia Commons).

2.3.2 Προσδιορισμός θέσης κοπτικού εργαλείου σε εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου

Η θέση του κοπτικού εργαλείου E/M NC προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τα συστήματα συντεταγμένων που παρουσιάζονται στην παρ. 2.2. Ο προσανατολισμός των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται στις φρέζες και δράπανα, καθώς και στον τόρνο παρουσιάζονται στο Σχ. 2.39.



Σχήμα 2.39 Συστήματα συντεταγμένων σε (α) φρέζα, δράπανο και (β) τόρνο κατά μήκος καθορισμένης τροχιάς.

Στις παλαιότερες E/M NC η αρχή του συστήματος συντεταγμένων ήταν σταθερή και δεδομένη – (σταθερό μηδέν / fixed zero), όπως π.χ. στην φρέζα ή την πλάνη όπου η αρχή του συστήματος συντεταγμένων ταυτίζεται με την κάτω αριστερή γωνία του τραπέζιου (χώρου κατεργασίας). Στις σύγχρονες E/M NC ο χειριστής έχει τη δυνατότητα να ορίσει ο ίδιος εντελώς αυθαίρετα τη θέση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων (κινητό μηδέν / floating zero). Ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων εκλέγεται συνήθως το κέντρο συμμετρίας ή κάποιο σημείο του άξονα συμμετρίας ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό σημείο του κομματιού.

Η θέση προς την οποία μετακινείται το κοπτικό εργαλείο των E/M NC προσδιορίζεται είτε καθορίζοντας τις συντεταγμένες του σημείου ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, *απόλυτη τοποθέτηση* (absolute positioning), είτε καθορίζοντας τις συντεταγμένες του σε σχέση με τη θέση του σημείου στο οποίο βρίσκεται *σχετική (προσθετική) τοποθέτηση* (incremental positioning).

Ετσι για παράδειγμα αν θεωρήσουμε ότι το κοπτικό εργαλείο βρίσκεται στην θέση που προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες (4,5) (διδιάστατος χώρος) και επιθυμούμε να το μετακινήσουμε στην θέση με συντεταγμένες (6,8). Τότε σύμφωνα με την απόλυτη τοποθέτηση η θέση (προς την οποία θα μετακινηθεί το εργαλείο) είναι η (6,8) ενώ σύμφωνα με την σχετική τοποθέτηση είναι η (2,3) (η οποία προκύπτει από την διαφορά των αντίστοιχων συντεταγμένων του σημείου προς το οποίο κατευθύνεται και του σημείου από το οποίο ξεκίνησε, 6-4 και 8-5).

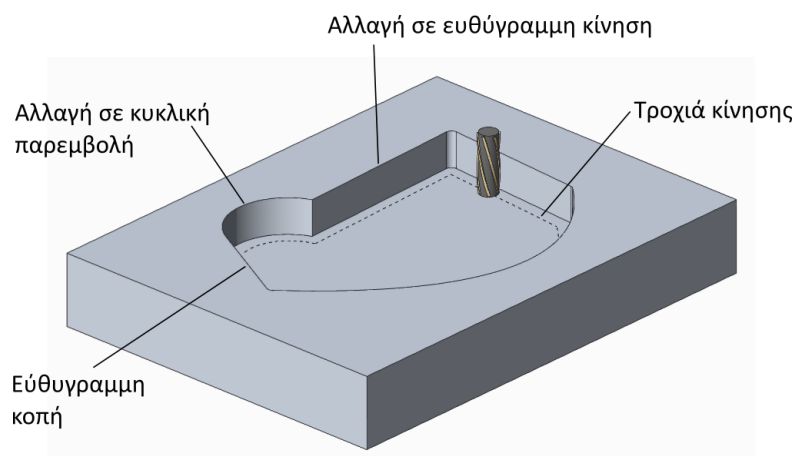
2.3.3 Συστήματα ελέγχου κίνησης σε εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου

Για να πραγματοποιηθεί η κατεργασία κοπής πρέπει να δημιουργηθεί σχετική κίνηση μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κομματιού. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο κίνησης του εργαλείου ενώ το κομμάτι παραμένει σταθερό, υπάρχουν ωστόσο και διατάξεις E/M στις οποίες κινείται και το κατεργαζόμενο κομμάτι (ειδικά σε E/M με περισσότερες από τρεις άξονες κίνησης). Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα ελέγχου της κίνησης του εργαλείου μιας E/M NC: το σημειακό και το συνεχούς τροχιάς.

Στο *σημειακό σύστημα ελέγχου κίνησης* (point-to-point) το σημαντικό στοιχείο είναι μόνο η θέση στην οποία καθορίζεται ότι πρέπει να φθάσει το κοπτικό εργαλείο και όχι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η κίνησή του από σημείο σε σημείο. Για παράδειγμα είναι εντελώς αδιάφορο ποια τροχιά ακολουθεί ή με τι ταχύτητα κινείται το κοπτικό κατά την μετακίνησή του (σημειώνεται ότι για ελάττωση του συνολικού χρόνου κατεργασίας η μεταξύ δύο σημείων μετακινήσεις πρέπει να εκτελούνται με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα).

Ο σημειακός έλεγχος της κίνησης, που είναι *διακριτός*, είναι κατάλληλος για κατεργασίες που εκτελούνται σε συγκεκριμένο σημείο, όπως π.χ. η διάνοιξη οπών ή η σημειακή συγκόλληση. Ο τρόπος αυτός ελέγχου της κίνησης είναι προφανώς ο απλούστερος και δεν απαιτεί το σύγχρονο έλεγχο κινήσεων κατά μήκος ή γύρω από τους διαφορετικούς άξονες κίνησης της E/M.

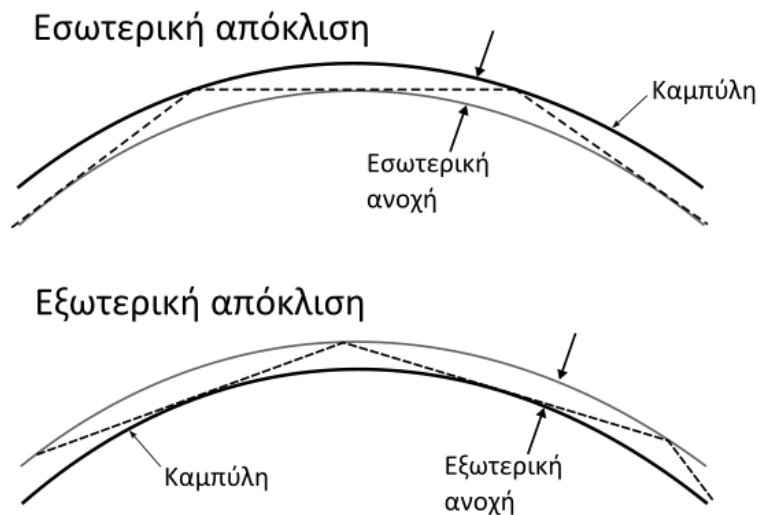
Το *συνεχούς τροχιάς σύστημα ελέγχου* της κίνησης (contouring) είναι το πιο σύνθετο, συγχρόνως όμως και το περισσότερο ευέλικτο. Το κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος συνεχούς τροχιάς είναι η δυνατότητά του να ελέγχει συγχρόνως περισσότερους από ένα άξονες κίνησης της E/M. Η τροχιά που εκτελεί το κοπτικό εργαλείο επάνω στο (κατεργαζόμενο) κομμάτι παρακολουθείται και ελέγχεται συνεχώς, ώστε τελικά να σχηματίζεται στο κομμάτι η επιθυμητής γεωμετρίας επιφάνεια ή γραμμή. Με το σύστημα αυτό δημιουργούνται ευθείες ή επίπεδες επιφάνειες οποιουδήποτε προσανατολισμού, κυκλικές, κυλινδρικές, κωνικές ή/και συνθετότερης μορφής επιφάνειες ή γραμμές. Η ευελιξία του συστήματος ελέγχου συνεχούς τροχιάς φαίνεται παραστατικότερα στο Σχ. 2.40, το οποίο αφορά κατακόρυφο φρεζάρισμα επίπεδου κομματιού.



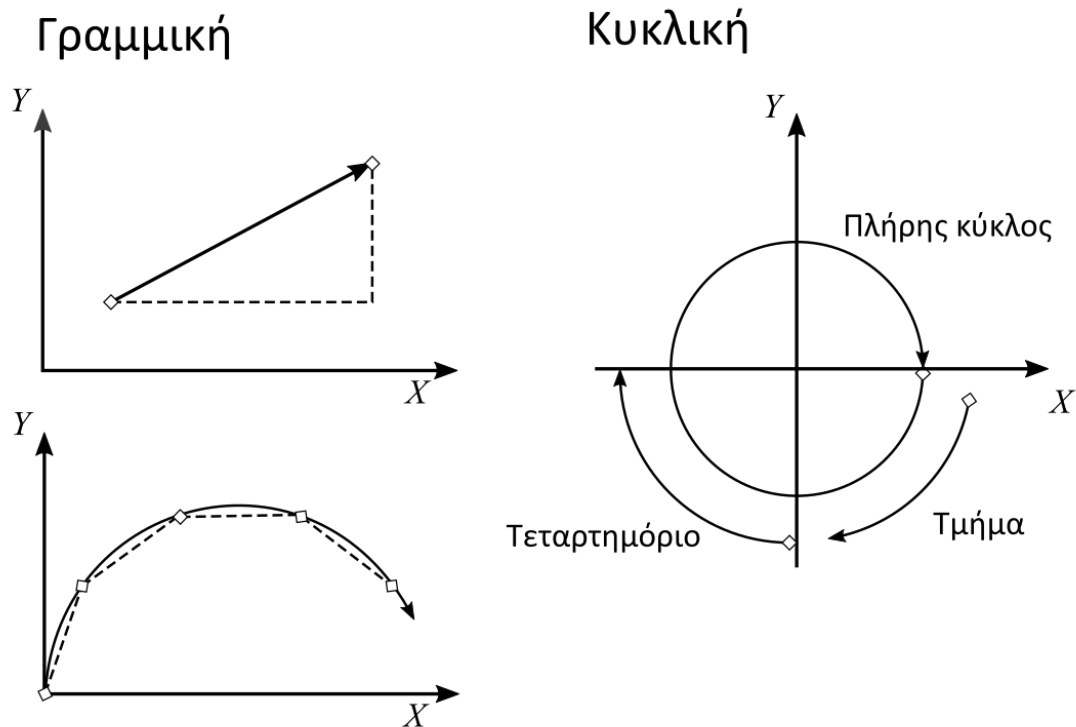
Σχήμα 2.40 Φρεζάρισμα κατά μήκος καθορισμένης τροχιάς.

Στο σύστημα συνεχούς τροχιάς το κοπτικό εργαλείο ακολουθεί την προδιαγεγραμμένη, επιθυμούμενη, τροχιά κατά προσέγγιση, σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες παρεμβολής (interpolation). Στο Σχ. 2.41 παρουσιάζονται τρία διαφορετικά είδη παρεμβολής.

Η μέγιστη ανεκτή απόκλιση (ανοχή) από την επιθυμούμενη τροχιά προδιαγράφεται. Στο Σχ. 2.42 φαίνεται διαγραμματικά το πώς προδιαγράφονται οι ανοχές αυτές για την περίπτωση προσέγγισης καμπύλης τροχιάς με τεθλασμένη γραμμή, δηλαδή, με μικρά ευθύγραμμα τμήματα, εσωτερικά ή εξωτερικά της ονομαστικής καμπύλης (nominal curve).



Σχήμα 2.41 Προσέγγιση καμπύλης με τεθλασμένη γραμμή.



Σχήμα 2.42 Σχηματική παρουσίαση διαφόρων ειδών παρεμβολής.

2.3.4 Διαδικασία αριθμητικού ελέγχου

Για την χρησιμοποίηση του NC στην παραγωγική διαδικασία πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα.

- Προγραμματισμός κατεργασιών (process planning). Τα κατασκευαστικά σχέδια ενός κομματιού πρέπει να εξηγηθούν και να κατανοηθούν αναφορικά με τις κατεργασίες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του. Το βήμα αυτό αναφέρεται στην προετοιμασία του φύλλου εργασιών. Το φύλλο εργασιών είναι ένας κατάλογος που περιέχει την σειρά των διαδοχικών εργασιών-κατεργασιών που εκτελούνται σε ένα κομμάτι. Στο φύλλο εργασιών αναφέρονται επίσης και οι E/M που πρέπει να χρησιμοποιηθούν (υποτίθεται ότι μερικές ή όλες οι E/M που χρησιμοποιούνται είναι μηχανές NC).
- Προγραμματισμός κομματιού (part programming). Προγραμματίζονται τα τμήματα των επιμέρους εργασιών που πρόκειται να εκτελεστούν από E/M NC. Ο προγραμματιστής κομματιού πρέπει να διαθέτει γνώσεις τόσο των χαρακτηριστικών των διαφόρων κατεργασιών (κοπής) όσο και της τεχνικής NC, ώστε να είναι σε θέση να προγραμματίσει και να τεκμηριώσει κατάλληλα τη διαδοχική εκτέλεση των διαφόρων κατεργασιών. Υπάρχουν δύο τρόποι προγραμματισμού κομματιού είτε με το χέρι (manual part programming), είτε με τη βοήθεια H/Y (computer assisted part programming). Στον προγραμματισμό με το χέρι προετοιμάζεται κατάλογος εντολών που περιέχει τις σχετικές θέσεις εργαλείου κοπής/κομματιού που ακολουθούνται κατά τη δημιουργία (κατεργασία) του επιθυμητού κομματιού. Όταν η (γεωμετρική) μορφή του αντικειμένου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, ο H/Y εκτελεί τους πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς που απαιτούνται, μειώνοντας δραστηκότητα τον χρόνο προετοιμασίας του προγράμματος κομματιού.
- Πιστοποίηση (έλεγχος) προγράμματος. Μετά την ετοιμασία του προγράμματος, πρέπει να ελεγχθεί η ακρίβεια των οδηγιών κατεργασίας που περιέχει. Ο έλεγχος αυτός διενεργείται συνήθως με την βοήθεια ειδικών προγραμμάτων H/Y τα οποία έχουν τη δυνατότητα γραφικής παράστασης, προσομοίωσης, των κινήσεων της E/M. Πολλές φορές γίνεται δοκιμαστική παραγωγή του ίδιου του αντικειμένου χρησιμοποιώντας αφρώδη ή πλαστικά υλικά ως πρώτη ύλη. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα λάθη προγραμματισμού είναι πολύ συνηθισμένα και συνήθως απαιτούνται τρεις διαδοχικοί έλεγχοι για να εξασφαλιστεί η ορθότητα του προγράμματος κατεργασίας.
- Παραγωγή (production). Το τελικό βήμα στη διαδικασία NC είναι η παραγωγή (κατεργασία - κατασκευή) του συγκεκριμένου κομματιού. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει:
 - την παραγγελία της πρώτης ύλης,
 - την επιλογή και προετοιμασία κοπτικών εργαλείων και ιδιοσυσκευών συγκράτησης κομματιού, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά την κατεργασία, και
 - την προετοιμασία (setup) της E/M NC.

Ο χειριστής της E/M στη φάση της παραγωγής εκτελεί τις παρακάτω εργασίες.

- Τοποθετεί στην συσκευή συγκράτησης την πρώτη ύλη (ή ημικατεργασμένο κομμάτι).
- Προσδιορίζει την θέση εκκίνησης του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το κατεργαζόμενο κομμάτι.
- Δίνει εντολή στην E/M να εκτελέσει την κατεργασία (σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρόγραμμα).
- Απομακρύνει το κομμάτι από την E/M μόλις τελειώσει η κατεργασία, και ετοιμάζεται να τοποθετήσει το επόμενο κομμάτι.

2.3.5 Εφαρμογές αριθμητικού ελέγχου

Ο NC έχει ευρύτατη εφαρμογή σήμερα στην βιομηχανία, κύρια όμως εφαρμόζεται στις E/M κοπής μετάλλων. Για την εκτέλεση κατεργασιών κοπής έχουν κατασκευαστεί E/M NC για φρεζάρισμα, διάνοιξη opών, τόννευση (εξωτερική ή εσωτερική), λείανση, τεμαχισμό, κλπ.

Από τις κατεργασίες κοπής τα χαρακτηριστικά εκείνα που καθιστούν τον NC ιδιαίτερα χρήσιμο είναι:

- Συχνή κατεργασία κομματιών σε μικρές μόνο ποσότητες.
- Κατεργασία κομματιών πολύπλοκης γεωμετρίας.
- Εκτελούνται πολλές εργασίες κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του κομματιού.
- Απαιτείται αφαίρεση, κοπή, μεγάλης ποσότητας υλικού.
- Πιθανότητες αλλαγές στο σχεδιασμό κομματιού.
- Μικρές ανοχές κατεργασίας.
- Ακριβή πρώτη ύλη όπου πιθανά λάθη στην κατεργασία κοστίζουν ακριβά.
- Απαιτείται έλεγχος ποιότητας σε ποσοστό 100%.

Εχει υπολογιστεί ότι τα περισσότερα (βιομηχανικά) προϊόντα, κομμάτια, παράγονται σήμερα σε παρτίδες μικρότερες των 50 τεμαχίων. Τέτοιες συνθήκες παραγωγής είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για να εφαρμοστεί ο NC (δεδομένου ότι οι E/M NC έχουν τη δυνατότητα να προγραμματιστούν). Τα προγράμματα κατεργασίας που έχουν καταστρωθεί για την εκτέλεση μιας παραγγελίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλη χρονική στιγμή είτε για την παραγωγή ίδιων ή, μετά από μικρές αλλαγές, παρόμοιων κομματιών. Με τον NC επίσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη επαναληψιμότητα και ακρίβεια κατεργασίας. Προφανώς η εφαρμογή του NC είναι τόσο αποδοτικότερη όσο περισσότερα από τα πιο πάνω χαρακτηριστικά εμφανίζει η κατεργασία κοπής στην οποία εφαρμόζεται.

Εκτός από τις κατεργασίες κοπής μετάλλων ο NC έχει εφαρμοστεί και σε πληθώρα άλλων κατεργασιών και παραγωγικών διαδικασιών. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω κατεργασίες:

- Διαμόρφωση μετάλλων,
- Συγκολλήσεις,
- Αυτόματη σχεδίαση,
- Μηχανές συναρμολόγησης,
- Φλογοκοπή,
- Κοπή μετάλλων με ακτίνα Laser,
- Κοπή υφάσματος και
- Αυτόματες μηχανές πλεξίματος (υφαντουργία).

2.3.6 Οικονομική διάσταση αριθμητικού ελέγχου

Η ορθή εφαρμογή του NC στην παραγωγική διαδικασία μπορεί να φέρει τα εξής σημαντικά οικονομικά οφέλη.

- Μείωση μη παραγωγικού χρόνου. Ο NC επηρεάζει πολύ λίγο ή σχεδόν καθόλου την διαδικασία της κατεργασίας αυτή καθαυτή. Ο NC, όμως, αυξάνει σημαντικότερα το ποσοστό του χρόνου που η E/M απασχολείται παραγωγικά. Τούτο οφείλεται στην αυτόματη αλλαγή εργαλείων, μείωση του χρόνου διακίνησης των υλικών, μικρότερο αριθμό και χρόνο αρχικών ρυθμίσεων της E/M, κλπ. Οι Smith & Evans του Πανεπιστημίου του Michigan σε έρευνα που έκαναν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 αναφέρουν ότι ο χρονικός κύκλος κατεργασίας σε αυτόματες E/M NC πέντε αξόνων είναι μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο συμβατικό κατά 35%. Αντίστοιχα σε μία διαδικασία διαμόρφωσης επιτεύχθηκε μείωση του χρονικού κύκλου της τάξης του 65%.
- Μείωση κόστους συγκράτησης σε E/M. Οι ιδιοσυσκευές συγκράτησης που χρησιμοποιούνται στις E/M NC είναι απλούστερες και μπορούν να κατασκευαστούν ευκολότερα και φθηνότερα, δεδομένου ότι η τοποθέτηση των κομματιών στην E/M γίνεται μέσω του προγράμματος κομματιού.
- Μείωση χρόνου υστέρησης. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της παραγγελίας ενός κομματιού και της παράδοσής του στον πελάτη μειώνεται δεδομένου ότι στις E/M NC απαιτούνται λιγότερες (αριθμητικά) αρχικές ρυθμίσεις και οι οποίες, στις E/M NC, πραγματοποιούνται ταχύτατα. Ανάλογα με τον τύπο της E/M, η έρευνα του Πανεπιστημίου του Michigan έδειξε ότι, επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου υστέρησης σε σχέση με τις συμβατικές E/M της τάξης του 26-44%.

- Μεγαλύτερη ευελιξία στην παραγωγή. Ο NC δίνει τη δυνατότητα ταχύτατης προσαρμογής σε μεταβολές των αναγκών αγοράς ή σε αλλαγές προγράμματος παραγωγής.
- Καλύτερος ποιοτικός έλεγχος. Με την εφαρμογή του NC επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής, μειώνονται τα ελαττωματικά προϊόντα και ο αριθμός των αναγκαίων επιθεωρήσεων. Ο NC διευκολύνει ιδιαίτερα τον έλεγχο αντικειμένων πολύπλοκης μορφής όπου η πιθανότητα ανθρώπινου λάθους είναι αυξημένη. Η έρευνα του Πανεπιστημίου του Michigan αναφέρει μείωση των αναγκών επιθεωρήσεων κατά 38%.
- Μείωση αποθεμάτων. Αυτή οφείλεται στις μειωμένες αρχικές ρυθμίσεις και στους μειωμένους χρόνους υστέρησης που συνεπάγεται η εφαρμογή του NC.
- Μείωση του απαιτούμενου χώρου για την παραγωγή. Τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας NC διαθέτουν τις δυνατότητες κατεργασίας πολλών E/M καταλαμβάνοντας περιορισμένο συγκριτικά χώρο.

Αντίστοιχα τα μειονεκτήματα από την χρήση εξοπλισμού αριθμητικού ελέγχου έχουν ως εξής.

- Υψηλότερο ύψος επένδυσης. Οι E/M NC κοστίζουν σαφώς ακριβότερα και είναι περισσότερο πολύπλοκες από τις συμβατικές E/M. Για την απόσβεση μηχανολογικού εξοπλισμού NC απαιτούνται συγκριτικά εντονότεροι ρυθμοί χρησιμοποίησης, συχνά απαιτούνται 2 και 3 βάρδιες εργασίας.
- Υψηλότερο κόστος συντήρησης. Το κόστος συντήρησης των E/M NC είναι υψηλότερο δεδομένο ότι οι μηχανές NC είναι περισσότερο πολύπλοκες και χρησιμοποιούνται εντατικότερα. Αν και η αξιοπιστία των E/M NC αυξάνεται συνεχώς, το κόστος συντήρησης εξακολουθεί να είναι υψηλό. Σύμφωνα με την έρευνα του Πανεπιστημίου του Michigan το κόστος συντήρησης για τις φρέζες NC και τα κέντρα κατεργασίας NC ήταν αυξημένο κατά 48% και 63% αντίστοιχα.
- Απαιτείται εξειδικευμένο και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό. Οι χειριστές των E/M NC πρέπει να διαθέτουν συγκριτικά υψηλότερου επιπέδου δεξιότητες. Ο αριθμός των προγραμματιστών κομματιού και των συντηρητών E/M NC είναι περιορισμένος στην αγορά εργασίας.

2.4. Αριθμητικός έλεγχος με H/Y

Στο συμβατικό αριθμητικό έλεγχο, η ψηφιακή μονάδα ελέγχου της μηχανής αποτελούνταν από ειδικά σχεδιασμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα και επιτελούσε μόνο τη λειτουργία της ανάγνωσης του προγράμματος από τη διάτρητη ταινία. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσίαζε διάφορα προβλήματα που σχετίζονταν τόσο με τη χρήση διάτρητης ταινίας (ιδιαίτερα ευπαθές μέσο, δύσκολια στη διόρθωση και τον έλεγχο, λάθη κατά την ανάγνωση κλπ.) αλλά και με την ίδια τη φύση του ελεγκτή, ο οποίος δεν μπορούσε να επαναπρογραμματιστεί καθώς δεν διέθετε σταθερή μνήμη (το λειτουργικό πρόγραμμα ήταν hardwired/«σχεδιασμένο» στα αντίστοιχα κυκλώματα). Η ραγδαία, ωστόσο, τεχνολογική εξέλιξη κυρίως των ηλεκτρονικών εφαρμογών και των H/Y οδήγησε σε βελτίωση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων των ελεγκτών των συστημάτων NC. Έτσι με την εφαρμογή των H/Y στον NC τα περισσότερα από τα μειονεκτήματα του συμβατικού τρόπου ελέγχου έπαψαν να υφίστανται.

Ο αριθμητικός έλεγχος με H/Y (Computer Numerical Control - CNC) είναι *"σύστημα NC που χρησιμοποιεί συγκεκριμένο εξοπλισμό και λογισμικό H/Y για την εκτέλεση μερικών ή όλων των βασικών λειτουργιών του"*. Σήμερα, τα περισσότερα συστήματα NC είναι συστήματα CNC δεδομένου ότι διαθέτουν σαν μονάδα ελέγχου ένα μικροπολογιστή. Στα συστήματα CNC το πρόγραμμα κομματιού καταχωρείται στην μνήμη του H/Y μία μόνο φορά και χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολλών παρτίδων κομματιών.

Προφανώς τα συστήματα CNC είναι περισσότερο ευέλικτα από τα συμβατικά συστήματα NC. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά των μπορούν πολύ εύκολα να μεταβληθούν απλά και μόνο επαναπρογραμματίζοντας τον H/Y του ελεγκτή των (soft-wired). Οι βασικές λειτουργίες ενός συστήματος CNC είναι οι εξής.

- Έλεγχος της E/M. Ο έλεγχος της E/M (machine tool control) είναι η πρωταρχική λειτουργία του συστήματος CNC. Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει την μετατροπή των εντολών του προγράμματος κομματιού σε κινήσεις των E/M. Τούτο επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος επικοινωνίας του H/Y και του/των σερβομηχανισμών κίνησης της E/M. Το μεγάλο πλεονέκτημα του CNC είναι ακριβώς η ικανότητα προγραμματισμού του ελεγκτή του. Ορισμένες όμως λειτουργίες ελέγχου εκτελούνται πολύ αποδοτικότερα χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα ειδικά κατασκευασμένα ώστε να λειτουργούν κατά συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα κυκλώματα που είναι ειδικά κατασκευασμένα ώστε να υπολογίζουν την τροχιά του κοπτικού εργαλείου που κινείται χρησιμοποιώντας κυκλική παρεμβολή, εκτελούν τους απαραίτητους υπολογισμούς ταχύτερα από κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα αντίστοιχης λειτουργίας. Για να εκμεταλλευτούμε τα χαρακτηριστικά αυτά εκτός από τον *πλήρως προγραμματιζόμενο* CNC (straight CNC) υπάρχει και ο *υβριδικός* CNC (hybrid CNC).
- Αντιστάθμιση κατά την κατεργασία. Η λειτουργία της αντιστάθμισης κατά την κατεργασία (in-process compensation) αναφέρεται στον δυναμικό τρόπο διόρθωσης των κινήσεων της E/M ώστε να λαμβάνονται υπόψη διάφορες αλλαγές ή λαθη που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ενεργειών είναι:
 - ο Ρύθμιση για λάθη που ανιχνεύονται από μετρητικά όργανα ή αισθητήρες.
 - ο Ρύθμιση της θέσης-τροχιάς εργαλείου που λαμβάνει υπόψη την ακτίνα του καθώς και το μήκος του (αντιστάθμιση).
 - ο Ρυθμίσεις του ρυθμού πρόωσης και της ταχύτητας κοπής (προσαρμοστικός έλεγχος).
 - ο Υπολογισμός αναμενόμενης διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου και επιλογή εναλλακτικών εργαλείων (αν αυτό είναι αναγκαίο).
- Βελτίωση προγραμματιστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών. Μερικά από τα χαρακτηριστικά που οφείλονται στην μεγάλη ευελιξία των συστημάτων CNC είναι:
 - ο Διόρθωση και βελτίωση προγράμματος κομματιού.
 - ο Γραφική απεικόνιση της τροχιάς του εργαλείου για εξακρίβωση της ορθότητας των κινήσεων της E/M.
 - ο Διαφόρων ειδών παρεμβολές (π.χ. κυκλική, παραβολική, κλπ.).
 - ο Χρησιμοποίηση ετοιμών υποπρογραμμάτων.
 - ο Εισαγωγή δεδομένων με το χέρι (manual data input - MDI).
 - ο Δυνατότητα καταχώρησης στη μνήμη H/Y περισσότερων του ενός προγράμματος κομματιού.

- Διαγνωστική. Οι E/M NC ως γνωστόν είναι πολύπλοκες και ακριβές μηχανές. Ακριβώς λόγω της πολυπλοκότητάς των υπάρχει αυξημένη πιθανότητα βλάβης και επομένως διακοπής της παραγωγικής διαδικασίας. Οι E/M αυτές απαιτούν επίσης συντήρηση από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό. Προφανώς όσο ακριβότερη είναι η E/M τόσο περισσότερη προσπάθεια καταβάλλεται ώστε να αποφεύγονται οι βλάβες. Οι σύγχρονες E/M CNC είναι συνήθως εφοδιασμένες με κάποιου τύπου διαγνωστικό σύστημα (diagnostic system) σκοπός του οποίου είναι η υποβοήθηση του έργου συντήρησης και επισκευής (της ίδιας της μηχανής). Τα διαγνωστικά αυτά συστήματα εξακολουθούν να βρίσκονται σε εξέλιξη. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένα διαγνωστικό σύστημα είναι οι εξής.
 - ο Προσδιορισμός της αιτίας μιας βλάβης ώστε να επιταχύνεται η επιδιόρθωσή της.
 - ο Αναγνώριση ενδείξεων ότι επίκειται βλάβη. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προληφθεί κάποια βλάβη και επομένως η ανεπιθύμητη διακοπή λειτουργίας της E/M. Το φθαρμένο στοιχείο μπορεί για παράδειγμα να αντικατασταθεί κατά τη διάρκεια προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας.
 - ο Διάθεση εφεδρικών τεμαχίων για τα πλέον μη αξιόπιστα μηχανικά μέρη του συστήματος CNC τα οποία και να αντικαθιστούν αυτόματα εκείνα που αστοχούν (η τελευταία αυτή λειτουργία είναι περαν των ορίων των συμβατικών διαγνωστικών συστημάτων).

2.4.1 Άμεσος αριθμητικός έλεγχος

Ο άμεσος/καταναμεμημένος αριθμητικός έλεγχος (Direct/Distributed Numerical Control - DNC) ορίζεται ως "το σύστημα ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας όπου πλήθος μηχανών NC ελέγχονται είτε από έναν κεντρικό H/Y είτε από πολλούς, διασυνδεδεμένους σε δίκτυο H/Y, με άμεσο τρόπο".

Στο σύστημα ελέγχου DNC το πρόγραμμα κομματιού διοχετεύεται στην E/M απευθείας από τη μνήμη του H/Y (χωρίς την μεσολάβηση κάποιου μέσου εισαγωγής). Βασική διαφορά μεταξύ του CNC και DNC αποτελεί το γεγονός ότι με τον DNC ελέγχονται συγχρόνως πολλές E/M και όχι μόνο μία. Στον DNC οι εντολές κατεργασίας μεταβιβάζονται στις E/M όποτε ακριβώς απαιτούνται (επικοινωνία H/Y - E/M σε πραγματικό χρόνο). Διάφορα στατιστικά ή/και τεχνικά στοιχεία μεταφέρονται από τις E/M προς τον H/Y για επεξεργασία.

Σε περιπτώσεις ελέγχου πολλών E/M χρησιμοποιείται, αντί για έναν ισχυρό H/Y, πολλοί σχετικά μικρότεροι H/Y, διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω δικτύου. Τα κύρια στοιχεία του συστήματος DNC είναι:

- Κεντρικός ή δίκτυο H/Y.
- Μνήμη όπου καταχωρούνται τα προγράμματα κομματιών.
- Γραμμές επικοινωνίας.
- E/M.

Τα συστήματα DNC είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να είναι σε θέση να εκτελούν λειτουργίες που δεν είναι ικανά να εκτελέσουν τα συμβατικά συστήματα NC και CNC. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένα σύστημα DNC είναι οι παρακάτω.

- Αριθμητικός έλεγχος χωρίς την ανάγκη χρησιμοποίησης κάποιου μέσου εισαγωγής.
- Διαχείριση προγραμμάτων κομματιών NC. Το υποσύστημα καταχώρησης του προγράμματος πρέπει να έχει δομή τέτοια που να επιτρέπει:
 - ο Εύκολη ανάκτηση ήδη καταχωρημένων στην μνήμη προγραμμάτων κομματιών και ταχεία μεταφορά τους στον E/M NC,
 - ο Καταχώρηση νέων προγραμμάτων, διαγραφή παλαιότερων και επεξεργασία ήδη υπαρχόντων,
 - ο Μετατροπή του αρχείου CLFILE (αρχείο που περιέχει τις διαδοχικές θέσεις του εργαλείου) σε πρόγραμμα κατεργασίας για συγκεκριμένη E/M (περισσότερα, σχετικά, αναφέρονται στην επόμενη παράγραφο),
 - ο Επεξεργασία δεδομένων καθώς και εκτέλεση διαχειριστικών λειτουργιών, π.χ. ασφάλεια αρχείων, παρουσίαση αρχείων, κλπ.
- Συλλογή, επεξεργασία και παρουσίαση στοιχείων.

Η λειτουργία αυτή αναφέρεται στην τροφοδοσία του H/Y του συστήματος DNC με πληροφορίες από την E/M. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες (κυρίως στο τμήμα διοίκησης) για την παρακολούθηση της λειτουργικής απόδοσης της παραγωγικής διαδικασίας. Τέτοιες πληροφορίες αναφέρονται στην χρήση εργαλείων, στον βαθμό χρησιμοποίησης συγκεκριμένης E/M, στον αριθμό παραγόμενων κομματιών, καθώς και σε άλλα μεγέθη χρήσιμα για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας. Εκτός των στοιχείων που σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή ο H/Y μπορεί να τροφοδοτείται και με άλλα γενικής φύσης στοιχεία από διαφορετικά τμήματα της βιομηχανικής μονάδας.

- Επικοινωνία.

Το δίκτυο επικοινωνίας των διαφόρων επιμέρους στοιχείων του συστήματος DNC είναι προφανώς κεντρικής σημασίας. Ο H/Y επικοινωνεί με τις E/M, τα τερματικά που χρησιμοποιούνται για τον NC προγραμματισμό κομματιού καθώς και με την μνήμη. Ο H/Y του DNC μπορεί επίσης να επικοινωνεί απευθείας και με διάφορα άλλα συστήματα όπως σύστημα CAD, απομακρυσμένα διαγνωστικά συστήματα, H/Y διοίκησης, άλλα αυτόματα συστήματα της βιομηχανικής μονάδας.

2.4.2 Συστήματα προσαρμοστικού ελέγχου

Σύστημα προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive control system) είναι «το σύστημα εκείνο ελέγχου το οποίο, κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, μετρά ορισμένες παραμέτρους και ρυθμίζει ανάλογα την ταχύτητα κοπής και τον ρυθμό πρόωσης». Οι παράμετροι οι οποίοι μετρώνται συνήθως και βάσει των οποίων γίνεται η ρύθμιση των συνθηκών κοπής είναι: η κάμψη κινητήριου άξονα E/M, η ροπή κινητήριου άξονα, η θερμοκρασία κοπής, το πλάτος ταλαντώσεων του στελέχους του εργαλείου, η ισχύς κοπής, κλπ.

Η ευρύτατη εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου στα συστήματα NC οφείλεται στην αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας των H/Y και των μικροεπεξεργαστών. Τα σύγχρονα συστήματα NC έχουν ενσωματωμένους τους μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία του προσαρμοστικού ελέγχου.

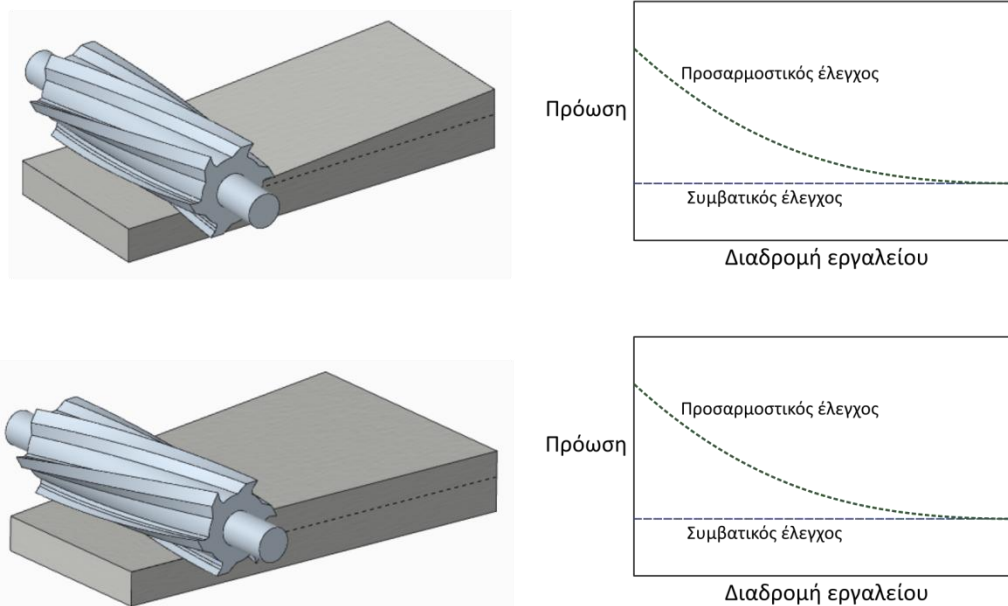
Ο σκοπός εφαρμογής του προσαρμοστικού ελέγχου είναι η εκτέλεση συγκεκριμένης κατεργασίας με τις καλύτερες δυνατές, βέλτιστες, συνθήκες. Τα συστήματα NC-CNC-DNC στοχεύουν στην μείωση των μη παραγωγικών χρόνων (της συνολικής παραγωγικής διαδικασίας) όπως αρχικών ρυθμίσεων E/M, αλλαγών κοπτικών εργαλείων, διακίνησης υλικών, κλπ., στο ελάχιστο δυνατόν. Με τον τρόπο αυτό αυξάνει το ποσοστό του παραγωγικού χρόνου. Αντίθετα ο προσαρμοστικός έλεγχος μειώνει τον πραγματικό χρόνο κατεργασίας ρυθμίζοντας κατάλληλα την ταχύτητα κοπής και τον ρυθμό πρόωσης σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες κοπής.

2.4.2.1 Αιτίες διαφοροποιήσεων στις κατεργασίες κοπής

Τυπικές αιτίες που προκαλούν διαφοροποιήσεις στις κατεργασίες κοπής είναι:

- Μεταβαλλόμενη γεωμετρία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταβαλλόμενης γεωμετρίας παρουσιάζεται στο Σχ. 2.43 όπου μεταβάλλεται το πλάτος και το βάθος κοπής κατά την φορά της πρόωσης. Στο ίδιο σχήμα αξίζει να παρατηρήσουμε το πώς μεταβάλλεται ο ρυθμός πρόωσης στον προσαρμοστικό έλεγχο.
- Μεταβαλλόμενη σκληρότητα και χαρακτηριστικά κατεργασιμότητας υλικού. Για να μην φθείρεται το κοπτικό εργαλείο γρήγορα, στις σκληρές περιοχές απαιτείται συγκριτικά μειωμένη ταχύτητα κοπής.
- Μεταβαλλόμενη στιβαρότητα κομματιού. Κάμψη του κομματιού σε μεγάλο βαθμό απαιτεί μείωση της πρόωσης ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια κατεργασίας.
- Φθορά εργαλείου. Η άμβλυνση του εργαλείου συνεπάγεται την αύξηση της δύναμης κοπής, οπότε το σύστημα προσαρμοστικού ελέγχου θα μειώσει τον ρυθμό πρόωσης.
- Κενά (αέρος) κατά την κατεργασία. Το κομμάτι μπορεί να έχει μορφή τέτοια που κατά την κατεργασία το κοπτικό εργαλείο να συναντά τμήματα όπου δεν υπάρχει υλικό και επομένως δεν

απαιτείται κατεργασία. Προφανώς στις περιοχές αυτές το εργαλείο πρέπει να κινηθεί με συγκριτικά μεγαλύτερη ταχύτητα.



Σχήμα 2.43 Συνθήκες μεταβαλλόμενης γεωμετρίας όπου επιβάλλεται η εφαρμογή προσαρμοστικού ελέγχου.

2.4.2.2 Είδη προσαρμοστικού ελέγχου

Τα συστήματα προσαρμοστικού ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί είναι δύο ειδών:

- Προσαρμοστικός έλεγχος βελτιστοποίησης (adaptive control optimization). Το είδος αυτό του προσαρμοστικού ελέγχου επιδιώκει την αύξηση του δείκτη απόδοσης της κατεργασίας. Ο δείκτης απόδοσης IP της κατεργασίας είναι συνάρτηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού MRR (material removal rate) και του ρυθμού φθοράς του κοπτικού εργαλείου TWR (tool wear rate). Δηλαδή:

$$IP = f(MRR / TWR)$$

Επειδή γενικώς είναι δύσκολο να μετρηθεί, ο δείκτης IP, ο προσαρμοστικός έλεγχος βελτιστοποίησης δεν έχει εφαρμοστεί στην πράξη.

- Προσαρμοστικός έλεγχος περιορισμών (adaptive control constraint). Το είδος αυτό του προσαρμοστικού ελέγχου θέτει περιορισμούς, άνω όρια, στις τιμές που επιτρέπεται να πάρουν ορισμένες παράμετροι, μεταβλητές, κοπής. Ο ρυθμός πρόωσης και η ταχύτητα κοπής ρυθμίζονται έτσι ώστε οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων να παραμένουν πάντοτε μικρότερες ή το πολύ ίσες με τα προκαθορισμένα όρια.

2.4.2.3 Οφέλη προσαρμοστικού ελέγχου

Τα κυριότερα οφέλη από την εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου είναι:

- Αύξηση ρυθμού παραγωγής. Σε κατεργασίες διάνοιξης οπών και φρεζαρίσματος αναφέρονται αυξήσεις στον ρυθμό παραγωγής της τάξης του 33%-38% και 20%-60% αντίστοιχα.
- Αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου. Ο προσαρμοστικός έλεγχος ρυθμίζει τις τοπικές συνθήκες κοπής ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση του κοπτικού εργαλείου, που οδηγεί στην αύξηση του χρόνου ζωής του.
- Αύξηση βαθμού προστασίας κομματιού. Οι περιορισμοί του προσαρμοστικού ελέγχου μπορεί να αφορούν τα φορτία που εφαρμόζονται στο κομμάτι κατά την κατεργασία, οπότε να εξασφαλίζεται η μη υπέρβαση των ορίων αντοχής του.

- Μικρότερη ανθρώπινη παρέμβαση. Επειδή πολλές ρυθμίσεις κατά την κατεργασία πραγματοποιούνται αυτόματα, δεν απαιτείται συχνή παρέμβαση του χειριστή.
- Ευκολότερος προγραμματισμός κομματιού. Επειδή η ρύθμιση του ρυθμού προώθησης και της ταχύτητας κοπής γίνεται αυτόματα σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν, ο προγραμματιστής απαλλάσσεται από το δύσκολο έργο υπολογισμού των συνθηκών κοπής. Στον συμβατικό NC ο προγραμματιστής αναγκάζεται να δοκιμάσει διάφορες συνθήκες κοπής μέχρι να πάρει την τελική του απόφαση.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι, ο προσαρμοστικός έλεγχος δεν είναι κατάλληλος για οποιαδήποτε κατεργασία κοπής. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που καθιστούν την εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου αποδοτική είναι:

- Υψηλό ποσοστό πραγματικού χρόνου κατεργασίας στον συνολικό κύκλο παραγωγής, συνήθως μεγαλύτερο του 40%.
- Υπαρξη αιτίων που προκαλούν σημαντικές διαφοροποιήσεις κατά την κατεργασία.
- Μεγάλο κόστος λειτουργίας της E/M.
- Τυπικές κατεργασίες χάλυβα, τιτανίου και κράματα υψηλής αντοχής.

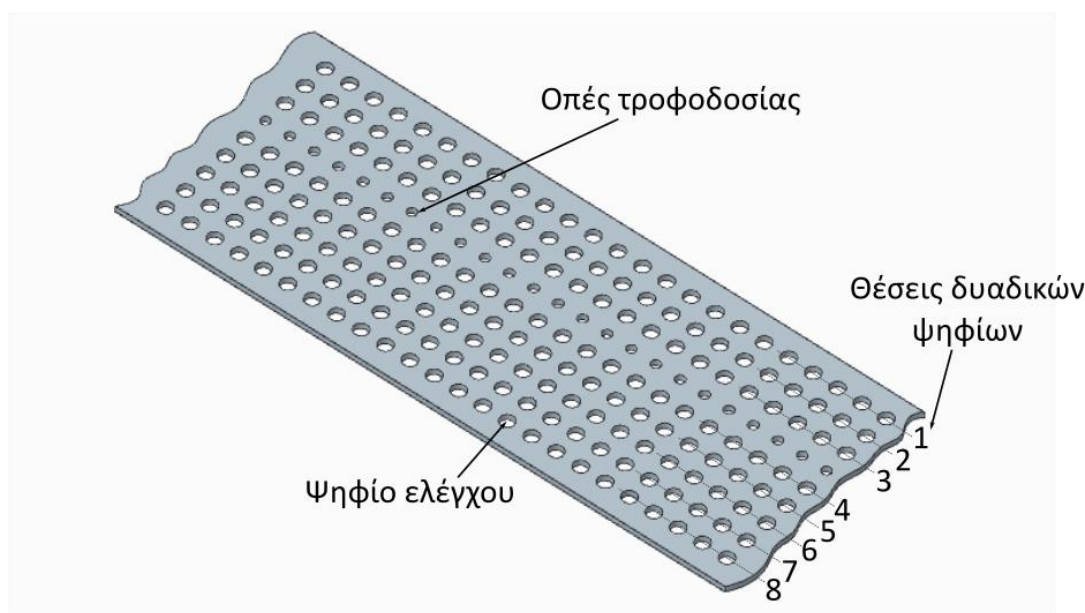
2.5 Προγραμματισμός συστημάτων NC

Με δεδομένο το πλάνο εργασιών, το επόμενο βήμα στη διαδικασία προγραμματισμού μιας εργαλειομηχανής NC είναι ο προγραμματισμός κομματιού (part programming). Ο προγραμματισμός κομματιού (part programming) των συστημάτων NC είναι η διαδικασία εκείνη μέσω της οποίας καθορίζεται και τεκμηριώνεται αναλυτικά η σειρά των διαφόρων βημάτων της κατεργασίας που πρόκειται να εκτελεστεί από την εργαλειομηχανή NC. Για τη σύνταξη του προγράμματος εντολών υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι: α) η σύνταξη σε γλώσσα μηχανής (machine language) β) η σύνταξη σε γλώσσα ανώτερου επιπέδου (higher level language) με τη βοήθεια H/Y γ) η χρήση ενός συστήματος CAD/CAM και δ) ο ορισμός δεδομένων/παραμέτρων απευθείας στη μηχανή.

Το πρόγραμμα κομματιού γράφεται σε κωδικοποιημένη μορφή (γλώσσα μηχανής), η οποία χρησιμοποιεί λέξεις και εντολές που σχηματίζονται από ψηφία αριθμών, χαρακτήρες γραμμάτων και άλλα σύμβολα. Για την ψηφιακή κωδικοποίηση των χαρακτήρων και των συμβόλων χρησιμοποιείται, προφανώς, το δυαδικό σύστημα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά και η επεξεργασία των δεδομένων από το ψηφιακό σύστημα ελέγχου.

Το πρόγραμμα κομματιού μετατρέπεται σε σειρά ενεργειών που εκτελούνται από E/M NC, μέσω της μονάδας ελέγχου (control unit), η οποία «μεταφράζει», αποκωδικοποιεί, την πληροφορία, που περιέχεται στο πρόγραμμα. Επειδή το πρόγραμμα κομματιού είναι γραμμένο σε κωδικοποιημένη μορφή και η μονάδα ελέγχου καλείται να «διαβάσει» τον κώδικα αυτό, απαιτείται πλήρης συμβατότητα μεταξύ του μέσου εισαγωγής και της μονάδας ελέγχου.

Το πρώτο, ιστορικά, μέσο εισαγωγής του προγράμματος σε μια E/M, ήταν η *διάτρητη ταινία* (punched tape), σχηματική παράσταση της οποίας παρουσιάζεται στο Σχ. (2.44). Τα σύγχρονα συστήματα NC χρησιμοποιούν μαγνητικά, οπτικά και άλλα μέσα, καθώς και δικτυακά πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη μεταβίβαση του προγράμματος στην E/M. Προφανώς όλες οι μέθοδοι επικοινωνίας ακολουθούν συγκεκριμένα τυποποιημένα πρότυπα (ένας από τους κυριότερους οργανισμούς τυποποίησης συστημάτων NC είναι η Electronics Industries Association - EIA των ΗΠΑ).



Σχήμα 2.44 Διάτρητη ταινία που περιέχει πρόγραμμα κατεργασίας NC.

2.5.1 Κωδικοποίηση εντολών με το δυαδικό σύστημα

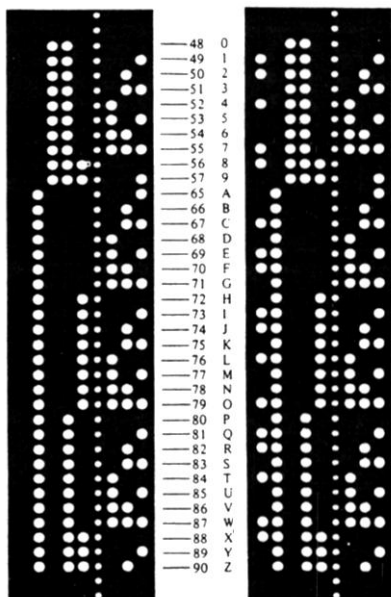
Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των εντολών και λέξεων καθορισμού της κίνησης, θα ήταν χρήσιμο να παρουσιαστεί η δυαδική μέθοδος κωδικοποίησης των χαρακτήρων και συμβόλων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των εντολών. Για μια πιο παραστατική επεξήγηση της μεθόδου θα αναλυθεί η μέθοδος κωδικοποίησης των εντολών σε μια διάτρητη ταινία, η οποία χρησιμοποιείται πολύ σπάνια, πλέον, ως μέσο εισαγωγής του προγράμματος σε μια E/M NC, αποτελεί όμως εξαιρετικό παράδειγμα της μεθόδου

ενσωμάτωσης εντολών σε ένα φυσικό μέσο, η οποία επεκτάθηκε στη συνέχεια στα διάφορα άλλα ψηφιακά μέσα.

Όπως είναι γνωστό, βάση του δυαδικού συστήματος αποτελεί το *δυαδικό ψηφίο* (binary digit) ή αλλιώς *μπιτ* (bit), το οποίο μπορεί να λάβει δύο μόνο τιμές, την τιμή '0' ή την τιμή '1', χρησιμοποιείται δηλαδή ως βάση (αρίθμησης) το 2. Το δυαδικό σύστημα αρίθμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση οποιουδήποτε αριθμού, αντί του συνηθισμένου (δεκαδικού) συστήματος αριθμών, όπως π.χ. στην περίπτωση αναπαράστασης του αριθμού $(367)_{10}$ ο οποίος αναπαριστάται ως $(101101111)_2$ στο δυαδικό. Πέρα από την αναπαράσταση (κωδικοποίηση) αριθμών το δυαδικό σύστημα χρησιμοποιείται και για την κωδικοποίηση χαρακτήρων, γραμμάτων και άλλων συμβόλων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια ακολουθία οκτώ δυαδικών ψηφίων, τα οποία συναποτελούν ένα *byte* (by eight). Ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών που προκύπτουν με την χρήση οκτώ ψηφίων, αρκεί για τον σχηματισμό των διαφόρων συμβόλων και χαρακτήρων που απαιτούνται για τον έλεγχο και τον προγραμματισμό των συστημάτων NC. Για την αντιστοίχιση αριθμών και χαρακτήρων χρησιμοποιείται συνήθως η κωδικοποίηση ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Στο πλαίσιο του αριθμητικού ελέγχου, μια σειρά (συνδυασμός) χαρακτήρων καθορίζει μια *λέξη* (word), ενώ με τη σειρά τους πολλές λέξεις συνθέτουν μία *πρόταση* (block), η οποία αποτελεί μια πλήρη *εντολή* (instruction).

Στην περίπτωση της διάτρητης ταινίας, η τιμή ενός ψηφίου καθορίζεται από την ύπαρξη (ή όχι) μιας οπής στην αντίστοιχη θέση (της ταινίας). Κάθε *γραμμή* της ταινίας αντιπροσωπεύει ένα χαρακτήρα, ο οποίος παριστάνει ή αριθμητικό ψηφίο ή γράμμα ή κάποιο άλλο σύμβολο. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.44 η διάτρητη ταινία διαθέτει οκτώ κανονικές θέσεις, *στήλες*, για διάτρηση, σε κάθε γραμμή, κατά την έννοια δηλαδή του πλάτους της. Η οπή της ένατης θέσης, μεταξύ της τρίτης και τέταρτης θέσης-στήλης, είναι μικρότερης διαμέτρου και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κίνησης της ταινίας στη συσκευή ανάγνωσης.

Στο Σχ. 2.45 παρουσιάζεται η μέθοδος κωδικοποίησης των χαρακτήρων ASCII σε μια διάτρητη ταινία. Τονίζεται ότι για τον σχηματισμό των διαφόρων χαρακτήρων χρησιμοποιούνται τα ψηφία των θέσεων 1-7 κάθε γραμμής της ταινίας. Το ψηφίο της θέσης 8 είναι το *ψηφίο ελέγχου ισοτιμίας* (parity bit) και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ορθότητας μετάδοσης της πληροφορίας που περιέχεται στα ψηφία των θέσεων 1-7. Έτσι το ψηφίο ελέγχου έχει τιμή '1' (οπή) αν ο αριθμός των ψηφίων μιας γραμμής (θέσεις 1-7) που έχουν τιμή '1' είναι περιττός (odd parity). Αντίθετα, αν η πληροφορία που μεταφέρεται είναι τέτοια ώστε ο αριθμός των ψηφίων (στις θέσεις 1-7) που έχουν την τιμή '1' είναι άρτιος, τότε το ψηφίο ελέγχου παίρνει την τιμή '0' (even parity). Αναλυτικά η κωδικοποίηση ASCII παρουσιάζεται στο Σχ. 2.46.



Σχήμα 2.45 Χαρακτήρες ASCII σε διάτρητη ταινία με (αριστερά) και χωρίς ψηφίο ελέγχου (δεξιά).

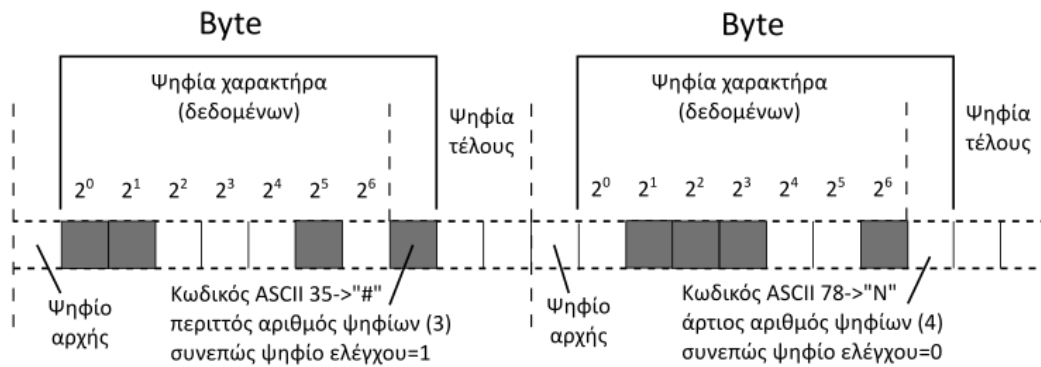
ASCII TABLE

Decimal	Hexadecimal	Binary	Octal	Char	Decimal	Hexadecimal	Binary	Octal	Char	Decimal	Hexadecimal	Binary	Octal	Char
0	0	0	0	[NULL]	48	30	110000	60	0	96	60	1100000	140	`
1	1	1	1	[START OF HEADING]	49	31	110001	61	1	97	61	1100001	141	a
2	2	10	2	[START OF TEXT]	50	32	110010	62	2	98	62	1100010	142	b
3	3	11	3	[END OF TEXT]	51	33	110011	63	3	99	63	1100011	143	c
4	4	100	4	[END OF TRANSMISSION]	52	34	110100	64	4	100	64	1100100	144	d
5	5	101	5	[ENQUIRY]	53	35	110101	65	5	101	65	1100101	145	e
6	6	110	6	[ACKNOWLEDGE]	54	36	110110	66	6	102	66	1100110	146	f
7	7	111	7	[BELL]	55	37	110111	67	7	103	67	1100111	147	g
8	8	1000	10	[BACKSPACE]	56	38	111000	70	8	104	68	1101000	150	h
9	9	1001	11	[HORIZONTAL TAB]	57	39	111001	71	9	105	69	1101001	151	i
10	A	1010	12	[LINE FEED]	58	3A	111010	72	:	106	6A	1101010	152	j
11	B	1011	13	[VERTICAL TAB]	59	3B	111011	73	;	107	6B	1101011	153	k
12	C	1100	14	[FORM FEED]	60	3C	111100	74	<	108	6C	1101100	154	l
13	D	1101	15	[CARRIAGE RETURN]	61	3D	111101	75	=	109	6D	1101101	155	m
14	E	1110	16	[SHIFT OUT]	62	3E	111110	76	>	110	6E	1101110	156	n
15	F	1111	17	[SHIFT IN]	63	3F	111111	77	?	111	6F	1101111	157	o
16	10	10000	20	[DATA LINK ESCAPE]	64	40	1000000	100	@	112	70	1100000	160	p
17	11	10001	21	[DEVICE CONTROL 1]	65	41	1000001	101	A	113	71	1100001	161	q
18	12	10010	22	[DEVICE CONTROL 2]	66	42	1000010	102	B	114	72	1100010	162	r
19	13	10011	23	[DEVICE CONTROL 3]	67	43	1000011	103	C	115	73	1100011	163	s
20	14	10100	24	[DEVICE CONTROL 4]	68	44	1000100	104	D	116	74	1100100	164	t
21	15	10101	25	[NEGATIVE ACKNOWLEDGE]	69	45	1000101	105	E	117	75	1100101	165	u
22	16	10110	26	[SYNCHRONOUS IDLE]	70	46	1000110	106	F	118	76	1100110	166	v
23	17	10111	27	[ENG OF TRANS. BLOCK]	71	47	1000111	107	G	119	77	1101011	167	w
24	18	11000	30	[CANCEL]	72	48	1001000	110	H	120	78	1110000	170	x
25	19	11001	31	[END OF MEDIUM]	73	49	1001001	111	I	121	79	1110001	171	y
26	1A	11010	32	[SUBSTITUTE]	74	4A	1001010	112	J	122	7A	1110010	172	z
27	1B	11011	33	[ESCAPE]	75	4B	1001011	113	K	123	7B	1110011	173	{
28	1C	11100	34	[FILE SEPARATOR]	76	4C	1001100	114	L	124	7C	1111000	174	
29	1D	11101	35	[GROUP SEPARATOR]	77	4D	1001101	115	M	125	7D	1111001	175	}
30	1E	11110	36	[RECORD SEPARATOR]	78	4E	1001110	116	N	126	7E	1111100	176	~
31	1F	11111	37	[UNIT SEPARATOR]	79	4F	1001111	117	O	127	7F	1111101	177	[DEL]
32	20	100000	40	[SPACE]	80	50	1010000	120	P					
33	21	100001	41	!	81	51	1010001	121	Q					
34	22	100010	42	"	82	52	1010010	122	R					
35	23	100011	43	#	83	53	1010011	123	S					
36	24	100100	44	\$	84	54	1010100	124	T					
37	25	100101	45	%	85	55	1010101	125	U					
38	26	100110	46	&	86	56	1010110	126	V					
39	27	100111	47	'	87	57	1010111	127	W					
40	28	101000	50	(	88	58	1011000	130	X					
41	29	101001	51	)	89	59	1011001	131	Y					
42	2A	101010	52	*	90	5A	1011010	132	Z					
43	2B	101011	53	+	91	5B	1011011	133	[					
44	2C	101100	54	,	92	5C	1011100	134	\					
45	2D	101101	55	.	93	5D	1011101	135	]					
46	2E	101110	56	.	94	5E	1011110	136	^					
47	2F	101111	57	/	95	5F	1011111	137	_					

Σχήμα 2.46 Κωδικοποίηση χαρακτήρων σύμφωνα με το πρότυπο ASCII ("[ASCII-Table](#)" by ZTZ32 - Own work based on historical material and additional tables found at Wikipedia:Ascii.. Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons).

Οι διαδοχικές γραμμές της διάρτητης ταινίας κωδικοποιούν τις αντίστοιχες λέξεις και τις εντολές που πρέπει να εκτελέσει το σύστημα. Το τέλος μιας διαδοχής λέξεων (ακολουθία χαρακτήρων) που συνθέτουν μια εντολή (μπλοκ λέξεων) σηματοδοτείται από το σύμβολο EOB (end-of-block). Σύμφωνα με την τυποποίηση της EIA, το σύμβολο αυτό αναπαριστάται από μία οπή στην θέση 8 (βλ. Σχ. 2.44). Η συσκευή ανάγνωσης μεταφέρει την κωδικοποιημένη πληροφορία της διάρτητης ταινίας στην μονάδα ελέγχου κατά πλήρεις εντολές.

Τονίζεται ότι ο τρόπος σχηματισμού των διαφόρων χαρακτήρων στα μαγνητικά μέσα εισαγωγής είναι εντελώς ανάλογος. Στο Σχ. 2.47 φαίνεται διαγραμματικά ο τρόπος με τον οποίο σχηματίζονται οι χαρακτήρες, bytes, χρησιμοποιώντας μαγνητικά σήματα. Στην περίπτωση αυτή τα δυαδικά ψηφία, bits, σχηματίζονται από (μαγνητικό) παλμό, σήμα, υψηλής και χαμηλής τιμής (1 και 0 αντίστοιχα). Παρακολουθώντας το μαγνητικό σήμα του Σχ. 2.47 από δεξιά προς τα αριστερά βλέπουμε ότι πριν τα επτά ψηφία που σχηματίζουν τον χαρακτήρα υπάρχει το ψηφίο που υποδηλώνουν την έναρξή του, ενώ στο τέλος του χαρακτήρα υπάρχει το ψηφίο ελέγχου ακολουθούμενο από δύο ψηφία που δηλώνουν το πέρας του. Στα μαγνητικά μέσα εισαγωγής επομένως, τόσο τα ψηφία που απαρτίζουν ένα byte, όσο και τα bytes αυτά καθαυτά είναι διαδοχικά διατεταγμένα σε σειρά.



Σχήμα 2.47 Κωδικοποίηση χαρακτήρων σε μαγνητικά σήματα.

2.5.2 Προγραμματισμός κομματιού σε γλώσσα μηχανής

Στον προγραμματισμό σε γλώσσα μηχανής, ο χειριστής καταγράφει διαδοχικά τις εντολές χρησιμοποιώντας μια γλώσσα μηχανής χαμηλού επιπέδου (low-level machine language), η οποία είναι απευθείας αναγνώσιμη από τη ψηφιακή μονάδα ελέγχου της μηχανής (MCU). Σε αυτό το επίπεδο προγραμματισμού καταγράφονται εντολές που σχετίζονται με τη θέση και την κίνηση του εργαλείου ή του τραπεζιού (την τροχιά και την ταχύτητα κίνησης, τη ταχύτητα περιστροφής του κ.ο.κ) καθώς και υποστηρικτικές εντολές (ενεργοποίηση υγρών κοπής, ορισμός γεωμετρίας εργαλείου κ.ο.κ.). Ο προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής περιγραφόταν και με τον όρο «προγραμματισμός με το χέρι» (manual programming) διότι παραδοσιακά εκτελούνταν χωρίς τη χρήση H/Y.

Ο προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής αποτελεί, προφανώς, την πρώτη και παλαιότερη μέθοδο προγραμματισμού συστημάτων NC. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη διαδικασία, το πρόγραμμα αποτυπώνεται αρχικά σε ένα ειδικό έντυπο το το φύλλο προγραμματισμού κομματιού ή φύλλο εντολών (programming sheet). Στη συνέχεια, ο προγραμματιστής συντάσσει τις επιμέρους εντολές σε γλώσσα μηχανής (κωδικοποιεί τις σχετικές εντολές). Στα πρώτα στάδια της τεχνολογίας NC το πρόγραμμα συντασσόταν είτε απευθείας στη μηχανή είτε χρησιμοποιώντας εξοπλισμό παραγωγής διάτρητης ταινίας, οπ οποίος προσομοιάζει στις παραδοσιακές γραφομηχανές (Σχ. 2.48). Στην πορεία ωστόσο τα παραπάνω μέσα αντικαταστάθηκαν από τον H/Y, όπου το πρόγραμμα συντάσσεται χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή κειμένου και μεταφέρεται στη μηχανή είτε με απευθείας ψηφιακή σύνδεση είτε με χρήση του δικτύου.



Σχήμα 2.48 Μηχανής εκτύπωσης προγράμματος σε χάρτινη διάτρητη ταινία ("[Perforated Tape \(Z23\) ubt](#)") by Tomasz Sienicki (Own work). Licensed under CC BY 3.0 via Wikimedia Commons).

Το πιο συνηθισμένο πρότυπο σύνταξης των εντολών (γλώσσα μηχανής) είναι ο κώδικας *G* (G code). Όπως είδαμε, η κωδικοποίηση μιας εντολής πραγματοποιείται με τη συνδυασμένη χρήση λέξεων (words) που εμπεριέχουν, ουσιαστικά, όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται για να εκτελεστεί η αντίστοιχη κίνηση ή ενέργεια. Οι λέξεις που χρησιμοποιούνται στο *G* κώδικα ακολουθούν ένα αλφαριθμητικό πρότυπο αναπαράστασης (word address format) στο οποίο το πρώτο ψηφίο είναι πάντα ένα γράμμα, που προσδιορίζει τον τύπο της λέξης, ενώ τα υπόλοιπα είναι αριθμητικά ψηφία, που προσδιορίζουν περαιτέρω τη λέξη. Οι λέξεις συνδυάζονται σε γραμμές ή μπλοκ (blocks) εντολών, που με τη σειρά τους συνθέτουν το πρόγραμμα κατεργασίας.

Η σύνταξη μιας γραμμής (μπλοκ) εντολής ακολουθεί συνήθως, αλλά όχι απαραίτητα, το παρακάτω πρότυπο.

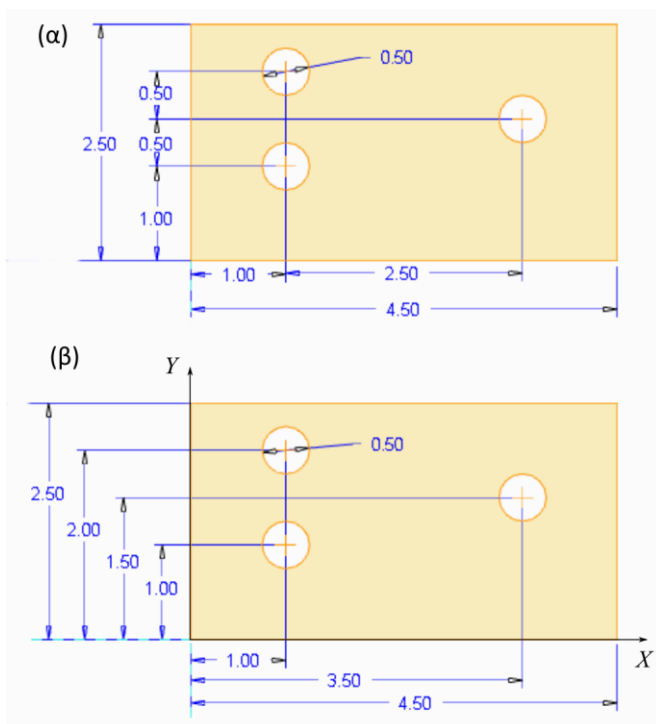
- Αριθμός εντολής (N-word / sequence number). Προσδιορίζει τον αριθμό/θέση μιας εντολής στο πρόγραμμα.
- Λέξη προετοιμασίας (G-word / preparatory word). Χρησιμοποιούνται για να προετοιμάσουν τον ελεγκτή σχετικά με το βασικό τύπο κίνησης που ακολουθεί. Η λέξη G02, π.χ. προετοιμάζει τον ελεγκτή της E/M για κίνηση κατά μήκος καθορισμένης τροχιάς, με κυκλική παρεμβολή κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού.
- Συντεταγμένες (X-, Y-, Z-word και A-, B-, C-word). Προσδιορίζουν τη θέση του κοπτικού εργαλείου ως προς τους τρεις άξονες συντεταγμένων (X, Y, Z) και περιστροφής (A, B, C) που περιγράφουν την κίνησή του (βλ. παρ. 2.2.2 και Σχ. 2.8α).
- Ρυθμός πρόωσης (F-word / feed rate).
- Ταχύτητα κοπής (S-word / cutting speed). Καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου ή της κύριας ατράκτου της E/M.
- Επιλογή κοπτικού εργαλείου (T-word / tool selection). Χρησιμοποιείται για E/M που διαθέτουν διατάξεις αυτόματης αλλαγής εργαλείου και προσδιορίζει το εργαλείο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένη κατεργασία. Η λέξη π.χ. T05 μπορεί να δηλώνει το εργαλείο που βρίσκεται στη θέση #5 του πυργίσκου του εργαλειοφορείου της E/M.
- Διάφορες λειτουργίες (M-word / miscellaneous functions). Καθορίζει τις βοηθητικές ή άλλες λειτουργίες που μπορεί να διαθέτει η E/M. Η λέξη π.χ. M03 ξεκινά την περιστροφή της κύριας ατράκτου της E/M.

Σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιούν όλες οι εργαλειομηχανές τις ίδιες λέξεις ούτε ερμηνεύουν με τον ίδιο τρόπο μια συγκεκριμένη λέξη. Έτσι μια συγκεκριμένη λέξη για την εκτέλεση μιας εντολής σε ένα τόρνο μπορεί να μη εφαρμόζεται σε μία φρέζα. Κώδικας *G* χρησιμοποιείται επίσης για τον προγραμματισμό άλλων μηχανών αριθμητικού ελέγχου, όπως οι 3D εκτυπωτές, όπου επίσης διαφέρει σημαντικά ο τρόπος ερμηνείας διάφορων λέξεων. Ο τρόπος γραφής του προγράμματος εξαρτάται, συνεπώς, από την συγκεκριμένη E/M NC που θα χρησιμοποιηθεί, από τον τρόπο ελέγχου της κίνησης του κοπτικού εργαλείου, ακόμη δε και από τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατεργασίας αυτής καθαυτής.

Ο προγραμματισμός κομματιού με το χέρι είναι ιδιαίτερα επίπονη εργασία και απαιτεί σημαντική προσπάθεια, όταν το κομμάτι έχει πολύπλοκη μορφή ή/και όταν οι κατεργασίες που εκτελούνται είναι σύνθετες και πολλές. Για αυτό το λόγο συνιστάται μόνο σε σημειακού τύπου κατεργασίες, όπως η διάνοιξη οπών σε δράπανο, ή όtn εκτελείται κατεργασία απλών γεωμετρικά κομμάτων. Το παρακάτω παράδειγμα αποτελεί τυπικό δείγμα εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου προγραμματισμού.

Παράδειγμα

Σε ορθογωνικό επίπεδο κομμάτι πρόκειται να δημιουργηθούν τρεις οπές σύμφωνα με το μηχανολογικό σχέδιο του Σχ. 2.49α. Για να πληρούνται οι κατασκευαστικές προδιαγραφές, η διάνοιξη των οπών επιβάλλεται να γίνει σε δύο πάσσα χρησιμοποιώντας πρώτα τρυπάνι διαμέτρου 0,484 mm και κατόπιν 0,500 mm. Η ταχύτητα περιστροφής του δράπανου συνιστάται να είναι 592 rpm και 382 rpm για το πρώτο και δεύτερο πάσσο κατεργασίας αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες προώσεις επιβάλλεται να είναι 3,55 mm/min και 3,82 mm/min. Το δράπανο NC που χρησιμοποιείται, διαθέτει απόλυτο σύστημα τοποθέτησης και δυνατότητα αυθαίρετου καθορισμού της αρχής του συστήματος συντεταγμένων (κινητό μηδέν). Η αλλαγή του τρυπανιού γίνεται από τον χειριστή της E/M.

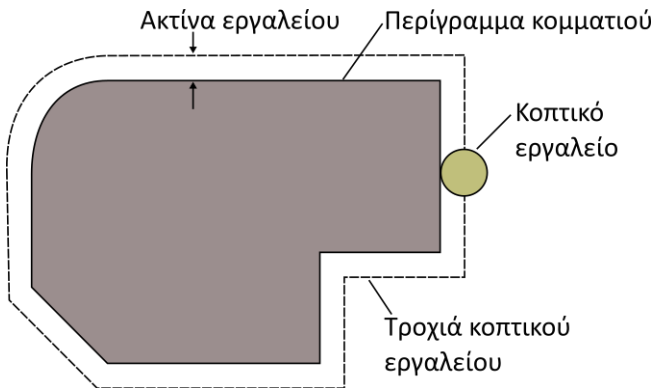


Σχήμα 2.49 Διάνοιξη οπών σε ορθογωνικό κομμάτι.

Το φύλλο προγραμματισμού κομματιού για την διάτρηση των τριών οπών παρουσιάζεται παρακάτω. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχ. 2.49β και ο προγραμματιστής υπέθεσε ότι οι διαστάσεις του ορθογωνικού προγράμματος του κομματιού πληρούν τις κατασκευαστικές προδιαγραφές οπότε δεν απαιτείται κάποια κατεργασία στο περίγραμμα. Η λέξη M6 θέτει την E/M εκτός λειτουργίας για να πραγματοποιηθεί η αλλαγή τρυπανιού ενώ με τη λέξη M3 δίνεται η εντολή για την έναρξη περιστροφής του τρυπανιού. Οι λέξεις M7 και M9 ρυθμίζουν την παροχή ψυκτικού υγρού ενώ ο έλεγχος της ταχύτητας πρόωσης πραγματοποιείται με τη παράμετρο F στην εντολή κίνησης.

```
G21 (millimeters)
M6 T1 (Change Tool1)
M3 (Start Spindle)
M7 (Flood Coolant On)
G0 Z0.500
G0 X0.000 Y0.000 Z0.500
G0 Z0.500
G0 X1.000 Y1.000 (Hole1)
G0 Z0.000 (Fast plunge: 1)
G1 Z-0.250 F30.0 (Slow plunge: 1)
G0 Z0.000 (Retract to clean)
G0 Z0.500
G0 X1.000 Y2.000 (Hole2)
G0 Z0.000 (Fast plunge: 1)
G1 Z-0.250 F30.0 (Slow plunge: 1)
G0 Z0.000 (Retract to clean)
G0 Z0.500
G0 X3.000 Y1.000 (Hole3)
G0 Z0.000 (Fast plunge: 1)
G1 Z-0.250 F30.0 (Slow plunge: 1)
G0 Z0.000 (Retract to clean)
G0 Z0.500 (Retract)
M9 (Coolant Off)
M5 (Stop Spindle)
```

Ο προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε εργαλειομηχανές με σημειακό έλεγχο της κίνησης όσο και σε μηχανές με έλεγχο τροχιάς. Σε κάθε περίπτωση πάντως, για τη σύνταξη των εντολών πρέπει να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των διάφορων σημείων που επισκέπτεται το εργαλείο κατά την κίνηση. Για παράδειγμα, όταν ο προγραμματιστής καθορίζει τον τρόπο κίνησης του κοπτικού εργαλείου, πρέπει να λάβει υπόψη του τη διάμετρο του εργαλείου και να συνυπολογίσει τη σχετική αντιστάθμιση (cutter offset), έτσι ώστε να προκύψει το επιθυμητού σχήματος και διαστάσεων κομμάτι. Γενικά, η τροχιά κίνησης του κοπτικού εργαλείου (για την ακρίβεια, του κέντρου του) διαφέρει από το περίγραμμα του κομματιού. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη προς όλες τις διευθύνσεις κατά την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 2.50, ενώ σε άλλες μικρότερη (κοπή εσωτερικών εγκοπών). Σε κάθε περίπτωση, οι συντεταγμένες των σημείων που καθορίζουν την τροχιά του εργαλείου δεν είναι γνωστές και πρέπει να υπολογιστούν από το χρήστη.



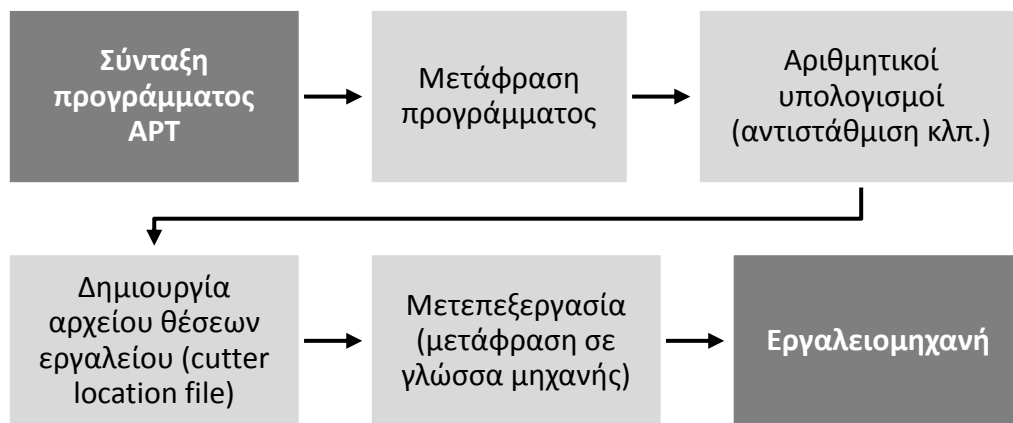
Σχήμα 2.50 Πραγματική (αντισταθμισμένη) τροχιά κοπτικού εργαλείου.

Η ανάγκη εκτέλεσης υπολογισμών από το χειριστή σημαίνει, πρακτικά, ότι όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του κομματιού (και των εργασιών που πρέπει να γίνουν), τόσο αυξάνεται και ο χρόνος προγραμματισμού (περισσότερα σημεία και εντολές). Μαζί με το χρόνο αυξάνεται σημαντικά και η πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων στον κώδικα. Για τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων επιβάλλεται, συνήθως, μια δοκιμαστική εκτέλεση (τρέξιμο) του προγράμματος, έτσι ώστε να εξακριβωθεί ότι η κατεργασία εκτελείται σωστά.

2.5.3 Προγραμματισμός σε γλώσσα ανώτερου επιπέδου

Ο προγραμματισμός σε γλώσσα μηχανής είναι αρκετά χρονοβόρος και ενέχει μεγάλη πιθανότητα σφαλμάτων, γι' αυτό το λόγο και εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις σχετικά απλών κατεργασιών κοπής. Για τον προγραμματισμό πιο σύνθετων κατεργασιών και γεωμετρικά πολύπλοκων κομματιών αναπτύχθηκαν σταδιακά διάφορες γλώσσες ανώτερου επιπέδου, που προσομοιάζουν στις συνηθισμένες γλώσσες προγραμματισμού H/Y. Η χρήση γλωσσών ανώτερου επιπέδου επιταχύνει τη διαδικασία προγραμματισμού, μειώνει τα λάθη και καθιστά πιο εύκολη την τροποποίηση των προγραμμάτων.

Μια γλώσσα προγραμματισμού ανώτερου επιπέδου (higher-level language) χρησιμοποιεί λέξεις αντίστοιχες με αυτές των αγγλικών για τον ορισμό πιο σύνθετων προτάσεων και συναρτήσεων ελέγχου της κίνησης σε μια μηχανή NC. Για τη μετάφραση του προγράμματος σε γλώσσα «κατανοητή» από τον ελεγκτή της εργαλειομηχανής, χρησιμοποιείται ειδικό λογισμικό εγκατεστημένο σε H/Y, το οποίο ερμηνεύει τα σχετικά δεδομένα, εκτελεί τους απαραίτητους γεωμετρικούς υπολογισμούς και αναλύει την τροχιά κίνησης του εργαλείου σε επιμέρους μικρο-κινήσεις (cutter location file). Το σχετικό πρόγραμμα μεταφράζεται στη συνέχεια αυτόματα σε γλώσσα μηχανής (G κώδικα) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα μετεπεξεργασίας (post-processing software). Ο μετεπεξεργαστής (post-processor) διαφέρει ανάλογα με τον τύπο και το μοντέλο της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιείται και το αντίστοιχο σύστημα ψηφιακού ελέγχου. Όπως είναι προφανές η χρήση μιας γλώσσας ανώτερου επιπέδου απαιτεί H/Y, και έτσι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γνωστή και ως «προγραμματισμός με τη βοήθεια η/υ» (computer-assisted part programming). Οι διάφορες εργασίες που εκτελούνται κατά τον προγραμματισμό μιας E/M με τη βοήθεια H/Y παρουσιάζονται διαγραμματικά στο Σχ. 2.51.



Σχήμα 2.51 Εργασίες που εκτελούνται κατά τον προγραμματισμό με τη βοήθεια H/Y.

Για τον προγραμματισμό μηχανών NC, έχουν αναπτυχθεί διάφορες γλώσσες, η πιο γνωστή εκ των οποίων είναι η APT (Automatically Programmed Tools). Η γλώσσα APT αναπτύχθηκε στο MIT στο πλαίσιο της μελέτης της τεχνολογίας αριθμητικού ελέγχου, στα τέλη της δεκαετίας '50, αρχές '60. Χρησιμοποιεί λέξεις από την αγγλική γλώσσα (προσομοιάζει στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN) και περιέχει επίσης υπολογιστικά εργαλεία για τον ακριβή προσδιορισμό των κινήσεων που εκτελούνται από το κοπτικό εργαλείο σε διάφορες κατεργασίες. Καθώς αναπτύχθηκε πριν την ανάπτυξη των εφαρμογών γραφικών, η APT χρησιμοποιεί εντολές (κείμενο) για τον ορισμό της γεωμετρίας του κομματιού. Πιο συγκεκριμένα ο προγραμματιστής πρέπει μέσω εντολών: (α) να περιγράψει ακριβώς τη γεωμετρία του κομματιού, (β) να καθορίσει τη σειρά των διαδοχικών κατεργασιών και διαδρομών που θα εκτελέσει το κοπτικό εργαλείο και (γ) να δώσει τις διάφορες βοηθητικές εντολές που εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία της E/M κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

2.5.4 Στοιχεία της γλώσσας APT

Οι γλώσσες προγραμματισμού κομματιού αναπτύχθηκαν για να διευκολύνουν τους προγραμματιστές κομματιών στην επικοινωνία τους (της μεταφοράς δηλαδή της πληροφορίας αναφορικά με την γεωμετρία του κομματιού και τον τρόπο κίνησης του κοπτικού εργαλείου) με τους H/Y που δημιουργούν το πρόγραμμα κατεργασίας (την διάτρητη ταινία ή το αρχείο κατεργασίας σε ένα μαγνητικό δίσκο).

Η κυριότερη γλώσσα που υπάρχει είναι η APT (Automatically Programmed Tools) και αναπτύχθηκε στο MIT μεταξύ των ετών 1956-59. Η γλώσσα APT χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα στον προγραμματισμό συστημάτων NC. Η γλώσσα APT χρησιμοποιεί λέξεις από την αγγλική γλώσσα. Περιέχει επίσης υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για τον ακριβή προσδιορισμό των κινήσεων που εκτελούνται από το κοπτικό εργαλείο στις διάφορες κατεργασίες. Η APT διαθέτει δυνατότητες για τον προγραμματισμό E/M NC με πέντε άξονες κίνησης και για γενικές κινήσεις στον 3-Δ χώρο.

Στα πλαίσια της παραγράφου αυτής θα παρουσιάσουμε τις κυριότερες μόνο εντολές της APT περιοριζόμενοι μόνο σε 2-Δ κατεργασίες κοπής που εκτελούνται στη φρέζα ή στο δρόπανο.

2.5.4.1 Γεωμετρικές εντολές

Οι *γεωμετρικές εντολές* (geometry statements) χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον καθορισμό της γεωμετρίας του κομματιού. Οι γεωμετρικές εντολές προηγούνται των εντολών που καθορίζουν τον τρόπο κίνησης του κοπτικού εργαλείου.

Η γενική μορφή των γεωμετρικών εντολών είναι:

$$\text{σύμβολο} = \text{γεωμετρικό στοιχείο} / \text{δεδομένα}$$

Το γεωμετρικό στοιχείο είναι λέξη της APT, όπως για παράδειγμα POINT, LINE, PLANE, CIRCLE, κλπ., υποδηλώνοντας το αντίστοιχο γεωμετρικό στοιχείο της αγγλικής λέξης. Τα σύμβολα, τα ονόματα δηλαδή των μεταβλητών, που χρησιμοποιούνται στην APT αποτελούνται από έξι το πολύ

χαρακτήρες, απαγορεύεται όμως να ταυτίζονται με κάποια από τις λέξεις που χρησιμοποιεί η APT ή να αποτελείται μόνο από αριθμητικά ψηφία.

Το απλούστερο γεωμετρικό στοιχείο είναι το σημείο, το οποίο ορίζεται με βάση τις συντεταγμένες του. Ο ορισμός για παράδειγμα της θέσης του σημείου P1 με συντεταγμένες x:5, y:4 και z:0 εκφράζεται στην APT ως εξής.

```
P1=POINT/5.0,4.0,0.0
```

Ο ορισμός ενός κύκλου απαιτεί τη δήλωση του κέντρου και της ακτίνας του. Έτσι ο κύκλος C1, που κείται στο επίπεδο XY, έχει ακτίνα (RADIUS) 5 και κέντρο (CENTER) το σημείο P1 ορίζεται ως εξής.

```
C1=CIRCLE/CENTER,P1,RADIUS,5.0
```

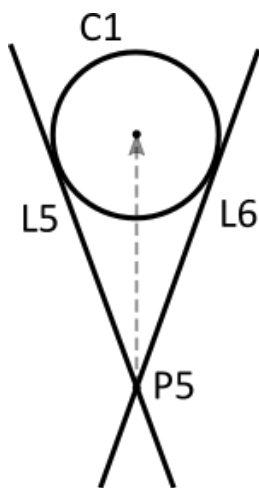
Για τον ορισμό μιας γραμμής (ευθείας) χρησιμοποιείται η λέξη LINE. Μια μέθοδος ορισμού της γραμμής χρησιμοποιεί δύο σημεία, όπως π.χ. στον παρακάτω ορισμό της γραμμής L3 η οποία περνά από τα σημεία P3 και P4.

```
L3=LINE/P3,P4
```

Μια γραμμή μπορεί να οριστεί και ως παράλληλη με μία άλλη και διερχόμενη από συγκεκριμένο σημείο, όπως στο παρακάτω παράδειγμα όπου η γραμμή L4 είναι παράλληλη (PARLEL) στη L3 και διέρχεται από το σημείο P5.

```
L4=LINE/P5,PARLEL,L3
```

Μια γραμμή μπορεί επίσης να οριστεί ως διερχόμενη από ένα σημείο και εφαπτόμενη (TANTO) σε ένα κύκλο. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να οριστεί και η πλευρά από την οποία η γραμμή εφάπτεται του κύκλου, εάν δηλαδή είναι δεξιά (RIGHT) ή αριστερά (LEFT) εφαπτόμενη σε αυτόν. Η πλευρά ορίζεται σε σχέση με το διάνυσμα με αρχή το σημείο, από το οποίο διέρχεται η ευθεία, και τέλος το κέντρο του κύκλου. Για παράδειγμα στο Σχ. 2.52 η γραμμή L5 διέρχεται από το σημείο P5 και είναι αριστερά εφαπτόμενη στον κύκλο C1, ενώ η L6 εφάπτεται σε αυτόν από δεξιά.



Σχήμα 2.52 Ορισμός δεξιά και αριστερά, εφαπτόμενης σε κύκλο, γραμμής.

που περιέχεται στο πρόγραμμα δηλώνει ότι η γραμμή L2 διέρχεται από το σημείο P4 και είναι εφαπτόμενη στον κύκλο C1 από τα αριστερά του διανύσματος με αρχή το P4 και πέρας το κέντρο του κύκλου C1.

Οι αντίστοιχες εντολές έχουν ως εξής.

```
L5=LINE/P5,LEFT,TANTO,C1
```

```
L6=LINE/P5,RIGHT,TANTO,C1
```

Η λέξη APT που χρησιμοποιείται για τον ορισμό επιπέδων είναι η PLANE. Η σύνταξη της σχετικής εντολής απαιτεί στη συγκεκριμένη περίπτωση τρία σημεία όπως στο παρακάτω παράδειγμα.

PL1=PLANE/P1, P4, P5

Για επίπεδο που ορίζεται ως παράλληλο με άλλο και διερχόμενο από συγκεκριμένο σημείο του χώρου έχουμε την εξής σύνταξη.

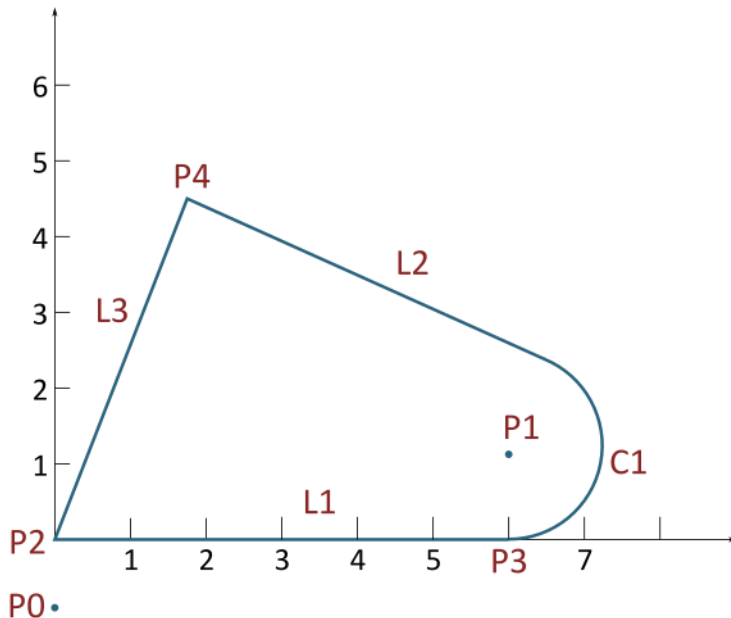
PL2=PLANE/P2, PARLEL, PL1

Οι κυριότεροι γενικοί κανόνες που διέπουν τον σχηματισμό των εντολών στην APT είναι:

- Τα δεδομένα που ακολουθούν το "/" στις εντολές, αντιστοιχούν στις συντεταγμένες x,y,z (με αυτή ακριβώς τη σειρά).
- Αν τα δεδομένα δεν καθορίζονται αριθμητικά, αλλά προσδιορίζονται με σύμβολα (ονόματα μεταβλητών) τότε τα σύμβολα αυτά πρέπει να έχουν οριστεί προηγούμενα.
- Το κάθε σύμβολο (όνομα μεταβλητής) πρέπει να χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός μόνου (γεωμετρικού) στοιχείου.
- Μόνο ένα σύμβολο μπορεί να χρησιμοποιείται για συγκεκριμένο στοιχείο.
- Οι γραμμές νοείται ότι εκτείνονται στο άπειρο, δεν ορίζονται δηλαδή ευθύγραμμα τμήματα.

Στο Σχ. (2.53) παρουσιάζεται ένα απλό κομμάτι, το περίγραμμα του οποίου μπορεί να οριστεί ως εξής.

```
P0=POINT/0,-1,0
P1=POINT/6,1.125,0
P2=POINT/0,0,0
P3=POINT/6,0,0
P4=POINT/1.75,4.5,0
L1=LINE/P2,P3
L2=LINE/P4,LEFT,TANTO,C1
L3=LINE/P2,P4
C1=CIRCLE/CENTER,P1,RADIUS,1.125
PL1=PLANE/P2,P3,P4
```



Σχήμα 2.53 Στοιχεία για τον ορισμό της γεωμετρίας (περιγράμματος) κομματιού.

2.5.4.2 Εντολές κίνησης

Οι εντολές κίνησης (motion statements) καθορίζουν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Η γενική μορφή των εντολών κίνησης είναι:

οδηγία κίνησης / δεδομένα

Πριν την αρχή των εντολών κίνησης πρέπει να ορίζεται σαφώς το σημείο εκκίνησης του κοπτικού εργαλείου (το σημείο αυτό είναι συνήθως το σημείο εκείνο στο οποίο ο χειριστής τοποθετεί το εργαλείο προτού αρχίσει η κατεργασία). Το σημείο εκκίνησης του εργαλείου καθορίζεται με την εντολή.

FROM / TARG

όπου TARG είναι το σύμβολο που έχει οριστεί για το σημείο εκκίνησης. Η εντολή FROM/ εμφανίζεται μία μόνο φορά στην αρχή συγκεκριμένης σειράς κινήσεων.

Αφού οριστεί το σημείο εκκίνησης ακολουθούν οι εντολές διαδοχικών κινήσεων. Σε ένα σύστημα σημειακού ελέγχου, οι εντολές κίνησης εμπεριέχουν, ουσιαστικά, τον ορισμό διαδοχικών θέσεων για το εργαλείο. Στην περίπτωση αυτή η εντολή κίνησης προς το επόμενο σημείο μπορεί να δοθεί είτε απόλυτα, χρησιμοποιώντας τη λέξη GOTO, είτε σχετικά, χρησιμοποιώντας τη λέξη GODLTA. Για παράδειγμα η εντολή

GOTO / P2

δηλώνει ότι το κοπτικό εργαλείο πρέπει να μετακινηθεί στην θέση του σημείου P2 (απόλυτη θέση με βάση το σύστημα συντεταγμένων). Αντίστοιχα, η εντολή

GODLTA / 2.0, 7.0, -1.0

δηλώνει ότι το εργαλείο πρέπει να μετακινηθεί σε σχέση με τη θέση που βρίσκεται κατά 2.0 στη διεύθυνση X, κατά 7.0 στη διεύθυνση Y και κατά -1.0 στη διεύθυνση Z.

Το πρόγραμμα APT που περιγράφει την κατεργασία, διάνοιξης οπών, στο κομμάτι του Σχ. (2.49) μπορεί να οριστεί και ως εξής.

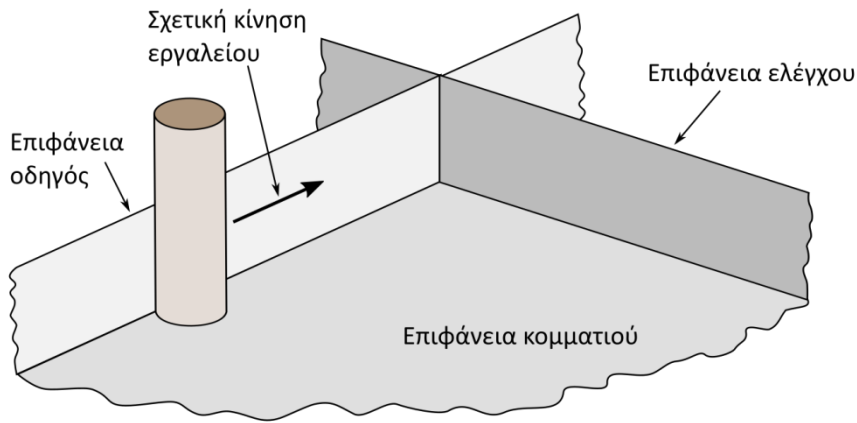
```
P1=POINT/1, 2, 0
P2=POINT/1, 1, 0
P3=POINT/3.5, 1.5, 0
FROM/P0
GOTO/P1
GODLTA/0, 0, -1
GODLTA/0, 0, +1
GOTO/P2
GODLTA/0, 0, -1
GODLTA/0, 0, +1
GOTO/P3
GODLTA/0, 0, -1
GODLTA/0, 0, +1
GOTO/P0
```

Οι εντολές κίνησης της APT που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κίνησης κοπτικού εργαλείου που ακολουθεί προκαθορισμένη τροχιά (σύστημα ελέγχου κίνησης συνεχούς τροχιάς) είναι σαφώς πιο πολύπλοκες. Η APT επιτυγχάνει τον έλεγχο της κίνησης του εργαλείου καθοδηγώντας το εργαλείο κατά μήκος δύο τεμνομένων επιφανειών, όπως φαίνεται στο Σχ. (2.53).

- Η *επιφάνεια οδηγός* (drive surface) χρησιμεύει για τον πλευρικό έλεγχο κίνησης του εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο κινείται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να παραμένει συνεχώς εφαπτόμενο (πλευρικά) στην επιφάνεια αυτή.
- Η *επιφάνεια κομματιού* (part surface) ελέγχει την κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά την κατακόρυφη έννοια. Η επιφάνεια αυτή είναι εκείνη επάνω στην οποία βρίσκεται συνεχώς η άκρη του κοπτικού εργαλείου κατά την κίνησή του. Προφανώς η επιφάνεια κομματιού μπορεί να είναι ή να μην είναι η πραγματική επιφάνεια του κομματιού.

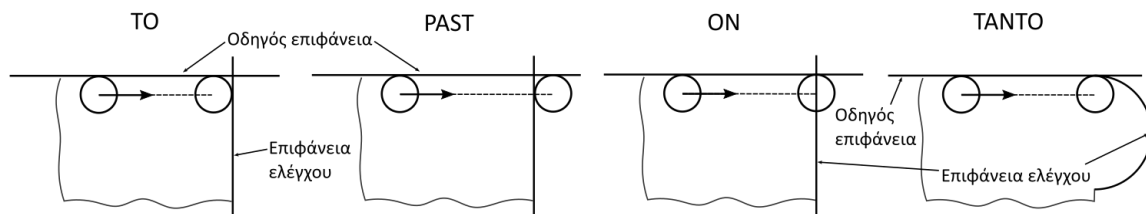
Για τον έλεγχο της κίνησης του εργαλείου ορίζεται και τρίτη επιφάνεια:

- Η *επιφάνεια έλεγχου* (check surface) χρησιμοποιείται για να σταματήσει την κίνηση του κοπτικού κατά συγκεκριμένη διεύθυνση, ορίζει δηλαδή ένα όριο μέχρι το οποίο θα κινηθεί το εργαλείο (βλ. Σχ. 2.54).



Σχήμα 2.54 Επιφάνειες καθορισμού μιας εντολής κίνησης.

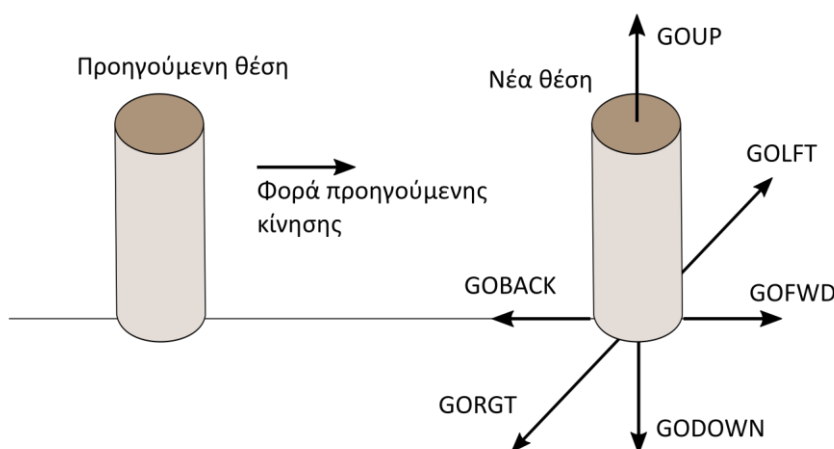
Η APT διαθέτει ειδικές τροποποιητικές λέξεις (modifier words) για να προσδιοριστεί ακριβώς ο τρόπος με τον οποίο θα σταματήσει την κίνησή του το εργαλείο μόλις φτάσει την επιφάνεια ελέγχου. Οι λέξεις αυτές είναι οι TO, ON, PAST και TANTO. Η σημασία της καθεμιάς από τις λέξεις αυτές παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. (2.55)



Σχήμα 2.55 Σημασία βοηθητικών "λέξεων" της APT.

Για τον προσδιορισμό της κίνησης σε ένα σύστημα ελέγχου τροχιάς χρησιμοποιούνται οι λέξεις GOLFT, GOFWD, GOUP, GORGT, GOBACK και GODOWN

Οι αντίστοιχες εντολές καθορίζουν την διεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το εργαλείο σε σχέση με την διεύθυνση που κινείται (ή κινήθηκε στην αμέσως προηγούμενη εντολή). Η ερμηνεία καθεμιάς από τις εντολές αυτές παρουσιάζεται στο Σχ. 2.56.



Σχήμα 2.56 Σημασία των διαφόρων εντολών κίνησης της APT.

Για να εκτελεστεί η οποιαδήποτε κίνηση πρέπει πρώτα να έχουν οριστεί η επιφάνεια οδηγός, η επιφάνεια κομματιού και η επιφάνεια ελέγχου. Στην αρχή οποιασδήποτε σειράς κινήσεων αμέσως μετά την εντολή FROM ακολουθεί η εντολή

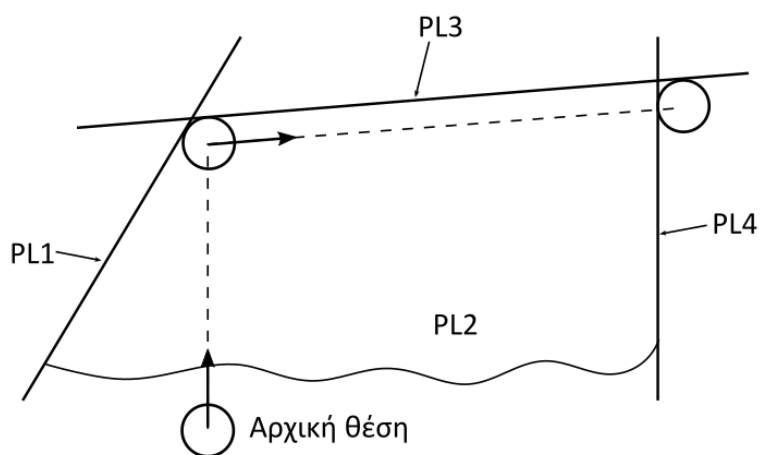
```
GO/TO, PL1, TO, PL2, TO, PL3
```

Το πρώτο στη σειρά επίπεδο PL1 είναι η οδηγός επιφάνεια, το δεύτερο επίπεδο PL2 είναι η επιφάνεια κομματιού και το τρίτο PL3 είναι η επιφάνεια ελέγχου (η σειρά γραφής των διαφόρων επιφανειών στις εντολές κίνησης είναι αυστηρά καθορισμένη).

Σε δεδομένη σειρά κινήσεων η επιφάνεια κομματιού ορίζεται μία μόνο φορά. Οι άλλες επιφάνειες προφανώς πρέπει να ορίζονται κάθε φορά που το κοπτικό εργαλείο αλλάζει διεύθυνση κίνησης.

Η κίνηση του εργαλείου που παρουσιάζεται στο Σχ. (2.57) εκτελείται από τις εξής εντολές κίνησης της APT:

```
GO/TO, PL1, TO, PL2, TO, PL3
GORT/PL3, PAST, PL4
```



Σχήμα 2.57 Παράδειγμα τρόπου κίνησης κοπτικού.

Επειδή πρόκειται για 2-Δ σχήμα τα επίπεδα PL3 και PL4 μπορούν να οριστούν απλά και ως γραμμές. (Σημειώνεται ότι η εντολή GO/TO είναι διαφορετική από την GOTO/).

Επιστρέφοντας στο κομμάτι του Σχ. 2.54 παρατηρούμε ότι οι εντολές κίνησης του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος του περιγράμματος του κομματιού έχουν ως εξής.

```
FROM/P0
GO/TO, L1, TO PL1, TO, L3
GORT/L1, TANTO, C1
GOFWD/C1, PAST, L2
GOFWD/L2, PAST, L3
GOLFT/L3, PAST, L1
GOTO/P0
```

2.5.4.3 Εντολές κατεργασίας

Οι εντολές κατεργασίας (postprocessing statements) χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του ρυθμού πρόωσης, της ταχύτητας κοπής καθώς και των άλλων χαρακτηριστικών της κατεργασίας. Οι εντολές αναφέρονται σε συγκεκριμένη E/M και σύστημα ελέγχου. Όσες από τις εντολές ακολουθούνται από "/" σημαίνει ότι απαιτούν (αριθμητικά) δεδομένα ή τον ορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων για να εκτελεστούν.

Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες εντολές κατεργασίας και είναι οι εξής.

END : Θέτει εκτός λειτουργίας την E/M (επανεκκίνησή της επιτυγχάνεται με την εντολή FROM).

FEDRAT/2.5: Δηλώνει ότι ο ρυθμός πρόωσης είναι 2,5 mm/min (οι μονάδες εξαρτώνται από την συγκεκριμένη E/M).

SPINDL/273: Ορίζει ότι η κυκλική συχνότητα περιστροφής είναι 273 rpm.

MACHIN/. . .: Καθορίζει τον τύπο E/M.

COOLNT/ON: Χρήση ψυκτικού (ON) ή διακοπή (OFF) παροχής ψυκτικού

RAPID: Δηλώνει ότι το εργαλείο μετακινείται ταχύτατα (χρησιμοποιείται όταν το εργαλείο δεν αφαιρεί υλικό).

2.5.4.3 Βοηθητικές εντολές

Οι *βοηθητικές εντολές* (auxilliary statements) χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του μεγέθους του εργαλείου που χρησιμοποιείται, για αναγνώριση συγκεκριμένου κομματιού, κλπ. Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες, βοηθητικές εντολές είναι και οι εξής.

CUTTER/5.0: Ορίζει ότι η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου είναι 5 mm (χρήσιμη πληροφορία για τον υπολογισμό αντιστάθμισης).

FINI: Τελευταία εντολή κάθε προγράμματος που δηλώνει ακριβώς τον τερματισμό του.

INTOL/, OUTTOL/: Προδιαγράφουν την εσωτερική και εξωτερική ανοχή στην προσέγγιση καμπύλης με τεθλασμένη γραμμή (βλ. παρ. 2.3.3).

Το πλήρες πρόγραμμα APT για την κατεργασία του κομματιού του Σχ. 2.54 σε φρέζα, με κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 4 mm, πρόωση 2,5 mm/min και ταχύτητα κοπής 500 rpm παρουσιάζεται παρακάτω (οι δεκαδικοί αριθμοί ακολουθούν το αγγλοσαξονικό πρότυπο).

```
EXAMPLE PART
MACHIN/MILL, 1
UNITS/MM
CLPRNT
INTOL/0.001
OUTTOL/0.001
CUTTER/4
P0=POINT/0, -1, 0
P1=POINT/6, 1.125, 0
P2=POINT/0, 0, 0
P3=POINT/6, 0, 0
P4=POINT/1.75, 4.5, 0
L1=LINE/P2, P3
C1=CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 1.125
L2=LINE/P4, LEFT, TANTO, C1
L3=LINE/P2, P4
PL1 =PLANE/P2, P3, P4
SPINDL/500
FEDRAT/2.5
COOLNT/ON
FROM/P0
GO/TO, L1, TO PL1, TO, L3
GORGT/L1, TANTO, C1
GOFWD/C1, PAST, L2
GOFWD/L2, PAST, L3
GOLFT/L3, PAST, L1
RAPID
GOTO/P0
COOLNT/OFF
FINI
```

2.5.4.4 Ορισμός μακροεντολής

Κατά την κατεργασία ενός κομματιού παρουσιάζεται συχνά η ανάγκη να επαναληφθεί μια εργασία αρκετές φορές, όπως π.χ. η διάνοιξη ίδιας διαμέτρου οπών σε πολλά διαφορετικά σημεία. Η εργασία αυτή μπορεί να καθορίζεται από μια σειρά εντολών που πρέπει να επαναληφθεί με ελάχιστες διαφοροποιήσεις (διαφέρει μόνο η θέση της οπής) σε διάφορα σημεία του προγράμματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι χρήσιμο προγραμματιστικά να οριστεί μία και μόνο φορά η σχετική ομάδα εντολών, η οποία στη συνέχεια «καλείται» (ενεργοποιείται) στα σημεία του προγράμματος που απαιτείται. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι ο προγραμματιστής δημιουργεί ένα υποπρόγραμμα (υπορουτίνα) το οποίο ενσωματώνεται και χρησιμοποιείται στο συνολικό πρόγραμμα κατεργασίας του κομματιού. Η δήλωση υποπρογραμμάτων στην APT πραγματοποιείται με τη χρήση της εντολής MACRO, η οποία προέρχεται από τον αγγλικό όρο “macrocommand”, ο οποίος αποδίδεται στα ελληνικά και με τον όρο «μακροεντολή». Η χρήση και η λειτουργία της MACRO ακολουθεί, ουσιαστικά, το πρότυπο που χρησιμοποιείται σε αρκετές γλώσσες προγραμματισμού H/Y για τον ορισμό υπορουτινών (subroutines) ή συναρτήσεων (functions).

Η μορφή της εντολής MACRO έχει ως εξής.

όνομα = MACRO / παράμετροι

Το όνομα του υποπρογράμματος, μακροεντολής μπορεί να έχει μέχρι έξι χαρακτήρες. Οι παράμετροι (μεταβλητές) αποτελούν το στοιχείο του υποπρογράμματος που μεταβάλλεται κάθε φορά που αυτό εκτελείται (καλείται). Το υποπρόγραμμα ενεργοποιείται, καλείται, από το κυρίως πρόγραμμα με την εντολή CALL που έχει την παρακάτω μορφή

CALL / όνομα μακροεντολής, παράμετροι

Οι τιμές των παραμέτρων είναι εκείνες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο υποπρόγραμμα κατά την εκτέλεσή του. Η τελευταία εντολή στο υποπρόγραμμα πρέπει υποχρεωτικά να είναι η TERMAC η οποία δηλώνει και το τέλος της, μεταφέρει δηλαδή τον έλεγχο στο κυρίως πρόγραμμα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η εφαρμογή της εντολής MACRO για την εκτέλεση της κατεργασίας, διάνοιξη οπών, του κομματιού του Σχ. 2.48 (για τον ορισμό της γεωμετρίας βλ. παρ. 2.4.2). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ορίζεται η μακροεντολή ‘DRILL’, η οποία έχει μια και μόνο παράμετρο, την θέση του εργαλείου πριν την διάνοιξη των οπών (PX). Η μακροεντολή καλείται στη συνέχεια τρεις φορές για τη διάνοιξη οπών σε τρία σημεία, τα P1, P2 και P3.

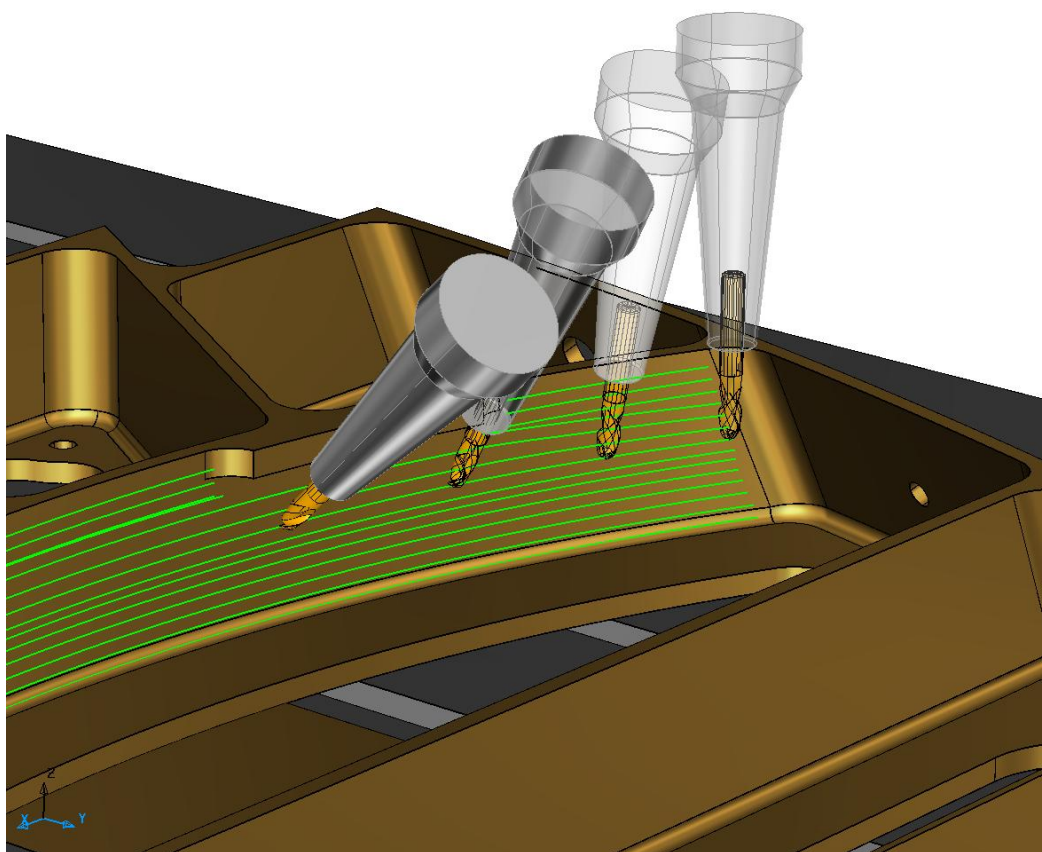
```
DRILL=MACRO/PX
GOTO/PX
GODLTA/0,0,-1
GODLTA/0,0,+1
TERMAC
FROM/P0
CALL/DRILL,PX=P1
CALL/DRILL,PX=P2
CALL/DRILL,PX=P3
GOTO/P0
```

2.5.5 Προγραμματισμός χρησιμοποιώντας συστήματα CAD/CAM

Ο προγραμματισμός με τη χρήση μιας γλώσσας ανώτερου επιπέδου, όπως η APT, έχει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα και επιτρέπει περισσότερες λειτουργίες από τον προγραμματισμό σε γλώσσα μηχανής. Η εργασία του προγραμματισμού, ωστόσο, μπορεί να αυτοματοποιηθεί περαιτέρω με τη χρήση ειδικού λογισμικού CAM (Computer-Aided Manufacturing), το οποίο χρησιμοποιεί το 3D μοντέλο του κομματιού ως βάση για την κατάστρωση της τροχιάς του εργαλείου. Το πρόγραμμα CAM μπορεί να είναι ανεξάρτητο από αυτό του μηχανολογικού σχεδιασμού CAD αλλά συνήθως συνδέεται άμεσα με αυτό στο πλαίσιο του συστήματος (πακέτου) CAD/CAM. Τα βασικά οφέλη από τη χρήση ενός συστήματος CAM είναι η περαιτέρω μείωση του χρόνου προγραμματισμού και η βελτίωση της ποιότητας των προγραμμάτων. Συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα της χρήσης των συστημάτων CAD/CAM στον προγραμματισμό NC είναι τα εξής.

- Ευκολότερος ορισμός γεωμετρίας. Επειδή το σύστημα CAD διαθέτει στην βάση δεδομένων του την γεωμετρία του κομματιού από τη φάση του σχεδιασμού, δεν απαιτείται ο ορισμός της εκ νέου από τον προγραμματιστή.
- Άμεσος οπτικός έλεγχος. Τα γραφικά άμεσης επικοινωνίας που χρησιμοποιούν τα συστήματα CAD παρέχουν τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης της τροχιάς που εκτελεί το κοπτικό εργαλείο κατά την διάρκεια της κατεργασίας (Σχ. 2.58). Έτσι πιθανά λάθη προγραμματισμού αναγνωρίζονται και διορθώνονται ταχύτατα.
- Χρησιμοποίηση αυτόματων υποπρογραμμάτων προγραμματισμού. Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα CAD/CAM διαθέτουν υποπρογράμματα βιβλιοθήκης για τον προγραμματισμό απλών, αλλά και συνήθων κατεργασιών κοπής, όπως οι διαδικασίες αφαίρεσης υλικού εσωτερικά ή εξωτερικά από καθορισμένο περίγραμμα (pocketing or profiling).
- Δυνατότητα προγραμματισμού κομματιών για μεμονωμένη παραγωγή. Επειδή ακριβώς ο προγραμματισμός κομματιού διευκολύνεται με τη χρήση του συστήματος CAD/CAM το κόστος προγραμματισμού NC για την παραγωγή ακόμα και ενός μόνο κομματιού δεν είναι υπέρογκο.
- Δυνατότητα ολοκλήρωσης προγραμματισμού NC με άλλες λειτουργίες. Η δυνατότητα ολοκλήρωσης της διαδικασίας σχεδιασμού με τον προγραμματισμό NC είναι προφανής. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα ολοκλήρωσης με διαδικασίες όπως ο σχεδιασμός ειδικών εργαλείων, ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής, η κατάταξη διαφόρων κομματιών σε κατηγορίες ανάλογα με τα γεωμετρικά ή κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά (group technology), η προετοιμασία εντολών αρχικών ρυθμίσεων της E/M, κλπ.

Στον προγραμματισμό με τη χρήση συστημάτων CAD/CAM ο ρόλος του χειριστή περιορίζεται, συχνά, στην επιλογή των εργαλείων και των βασικών παραμέτρων στις επιμέρους κατεργασίες (ταχύτητες κοπής, βοηθητικές λειτουργίες). Στη συνέχεια το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα την τροχιά του εργαλείου, η οποία μπορεί να ελεγχθεί γραφικά και να τροποποιηθεί/προσαρμοστεί από τον χειριστή. Στη συνέχεια το λογισμικό δημιουργεί το αντίστοιχο πρόγραμμα σε μια γλώσσα APT, το οποίο μεταφέρεται στο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας για τη μετάφρασή του σε γλώσσα μηχανής. Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα CAD/CAM διαθέτουν ενσωματωμένη βάση δεδομένων που επιτρέπει τη χρήση έτοιμων σετ παραμέτρων και εργαλείων για διάφορες τυπικές κατεργασίες (π.χ. χονδρικό φρεζάρισμα), δυνατότητα που διευκολύνει ακόμα περισσότερο τον προγραμματισμό. Γενικά, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας προγραμματισμού συνεχίζεται με αμείωτο ενδιαφέρον και εκτιμάται ότι σε συνδυασμό με την εξέλιξη και των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης θα αναπτυχθούν στο άμεσο μέλλον πακέτα CAD/CAM που θα μπορούν να προγραμματίσουν μηχανές NC με την ελάχιστη ανθρώπινη συμμετοχή.



Σχήμα 2.58 Γραφική αναπαράσταση τροχιάς κοπτικού εργαλείου από σύστημα CAD/CAM ([PowerMILL Toolpaths Image](#) by Delcam Plc.. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikipedia).

2.5.6 Προγραμματισμός με τον ορισμό παραμέτρων στη μηχανή

Η σύνταξη προγραμμάτων με τις προηγούμενες μεθόδους απαιτεί συνήθως σημαντική επένδυση σε χρήμα (για την αγορά του εξοπλισμού) και χρόνο (για την εκμάθηση των συστημάτων). Μια άλλη μέθοδος προγραμματισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πιο απλό εξοπλισμό και για πιο απλές κατεργασίες είναι η σύνταξη του προγράμματος απευθείας στη μηχανή, γνωστή και ως τεχνική MDI (Manual Data Input). Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται, το ενσωματωμένο στη μηχανή, σύστημα προγραμματισμού, το οποίο αποτελείται από χειριστήρια, πληκτρολόγιο, οθόνη και λογισμικό. Η τεχνική αυτή ονομάζεται και *διαλογικός προγραμματισμός* (conversational programming), καθώς ο χειριστής απαντά σε μια σειρά ερωτήσεων, που, ουσιαστικά, τον καθοδηγούν στον ορισμό της γεωμετρίας και των παραμέτρων της κατεργασίας. Προφανώς, ο προγραμματισμός με τη μέθοδο MDI θέτει σοβαρούς περιορισμούς στην πολυπλοκότητα των εργασιών που μπορούν να προγραμματιστούν, αποτελεί όμως μια σχετικά απλή και φθηνή μέθοδο για τη εκτέλεση απλών κατεργασιών με εργαλειομηχανές NC.

2.6 Προγραμματισμός κατεργασιών με τη βοήθεια Η/Υ

Η κατασκευή ενός κομματιού με μεθόδους κοπής επιτελείται, συνήθως, σταδιακά μέσω της εκτέλεσης διάφορων κατεργασιών για τις οποίες χρησιμοποιούνται, συχνά, διαφορετικές μηχανές και εργαλεία. Ο καθορισμός αυτών των διαδοχικών εργασιών/σταδίων της κατασκευαστικής διαδικασίας είναι το αντικείμενο του *προγραμματισμού διαδικασίας/κατεργασίας* (process planning). Για τον προγραμματισμό της διαδικασίας, ο χειριστής πρέπει να διαθέτει γνώσεις τόσο του εξοπλισμού (εργαλειομηχανή και λογισμικό) και των δυνατοτήτων του, όσο και της γεωμετρίας και των κατασκευαστικών προδιαγραφών του κομματιού, έτσι ώστε να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα το συντομότερο και με το μικρότερο δυνατό κόστος. Το προϊόν του προγραμματισμού είναι ένα πλάνο διαδικασίας/εργασιών (process plan), το οποίο αποτυπώνεται στο φύλλο κατεργασίας ή διαδρομής (operation/route sheet) και λειτουργεί ως οδηγός για την κατασκευαστική διαδικασία. Το φύλλο κατεργασίας περιλαμβάνει συνήθως τα εξής:

- Όλες τις επιμέρους εργασίες/κατεργασίες στη σειρά με την οποία πρέπει να εκτελεστούν.
- Μια σύντομη περιγραφή της εργασίας, με μια σύντομη ίσως αναφορά στις σχετικές προδιαγραφές ή ανοχές ακριβείας του τεχνικού σχεδίου.
- Τον εξοπλισμό (μηχανές) που θα χρησιμοποιηθεί για κάθε κατεργασία.
- Τα εργαλεία και τις διατάξεις/ιδιοσυσκευές συγκράτησης (fixtures / workholding devices) που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε κατεργασία.

Σε κάποιες περιπτώσεις, το φύλλο εργασιών περιλαμβάνει και στοιχεία σχετικά με το χρόνο προετοιμασίας και κατεργασίας, καθώς και παραμέτρους κοπής.

Μέχρι την έλευση της ψηφιακής τεχνολογίας, η ανάλυση και ο προγραμματισμός της διαδικασίας πραγματοποιούνταν με βάση την εμπειρία και τις γνώσεις του χειριστή και αποτυπωνόταν με το χέρι στο φύλλο κατεργασίας. Όπως είναι προφανές, η παραδοσιακή μέθοδος προγραμματισμού απαιτεί σχετικά πολύ χρόνο ενώ και η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από τις γνώσεις του χειριστή. Υπάρχει, συνεπώς, μεγάλο ενδιαφέρον στην αυτοματοποίηση του προγραμματισμού, με τη χρήση Η/Υ και λογισμικού. Η χρήση ψηφιακών συστημάτων για τον προγραμματισμό εργασιών περιγράφεται με τον όρο “Computer Aided Process Planning - CAPP” (Προγραμματισμός κατεργασιών με τη βοήθεια Η/Υ). Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση Η/Υ στον προγραμματισμό εργασιών, είναι αντίστοιχα με αυτά που προκύπτουν γενικά από την εφαρμογή της αυτοματοποίησης και της ψηφιακής τεχνολογίας και μπορούν να συνοψιστούν στα εξής.

- Τυποποίηση και ορθολογικοποίηση των πλάνων εργασιών για συναφή κομμάτια/προϊόντα.
- Μείωση του χρόνου προγραμματισμού και συνεπώς του χρόνου διεκπεραίωσης μιας παραγγελίας (αύξηση της παραγωγικότητας).
- Μείωση των λαθών κατά τη σύνταξη των πλάνων, καθώς η γνώση από προηγούμενες κατασκευές συγκεντρώνεται σε μια κοινή βάση δεδομένων.
- Πιο ξεκάθαρη και σαφή αποτύπωση των πλάνων κατεργασίας, σε σχέση με αυτά που συντάσσονται με το χέρι.
- Δυνατότητα διασύνδεσης με άλλες εφαρμογές λογισμικού, όπως προγράμματα σχεδίασης, προγραμματισμού παραγωγής και διαχείρισης υλικών.

Ένα σύστημα CAPP μπορεί να λειτουργεί είτε όπως μια βάση δεδομένων, που περιέχει κωδικοποιημένα πλάνα εργασιών και σχετικό υλικό τεκμηρίωσης, είτε ως ένα έμπειρο σύστημα (expert system), το οποίο δημιουργεί νέα πλάνα/φύλλα εργασιών. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε ένα CAPP σύστημα *ανάκτησης* (retrieval CAPP) ενώ στη δεύτερη ένα σύστημα *παραγωγής/γένεσης* (generative CAPP) πλάνων. Τα συστήματα ανάκτησης εφαρμόζονται, συνήθως, σε συνδυασμό με μεθόδους τεχνολογίας ομάδων, έτσι ώστε να είναι εύκολη η αναγνώριση του καταλληλότερου πλάνου για κομμάτια συναφούς γεωμετρίας, με τις απαιτούμενες, φυσικά, τροποποιήσεις (εάν απαιτείται). Τα συστήματα παραγωγής πλάνων λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με αυτό που ακολουθεί ο άνθρωπος κατά τον προγραμματισμό, χρησιμοποιώντας δηλαδή γνώση ενσωματωμένη στο σύστημα για την δημιουργία νέων πλάνων με βάση το 3D μοντέλο του κομματιού. Η σχετική γνώση είναι, συνήθως, κωδικοποιημένη σε μορφή κανόνων και

λογικών διαδικασιών, όπως στα περισσότερα έμπειρα συστήματα. Νεώτερες, ωστόσο, εφαρμογές CAPP μπορεί να περιέχουν πιο πολύπλοκους και εξελιγμένους αλγόριθμους αναγνώρισης κατασκευαστικών χαρακτηριστικών (feature recognition) και τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence) για ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία στην διαχείριση διαφορετικών σχεδίων. Η χρήση τέτοιων προηγμένων τεχνικών αναμένεται να μειώσει ακόμα περισσότερο τον χρόνο παραγωγής πλάνων αλλά και να επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης νέων χειριστών, είναι ωστόσο ακόμα σε σχετικά πρώιμο και διερευνητικό στάδιο.

Βιβλιογραφία

- Bedworth, D.D., Henderson, M.R., Wolfe, P.M. (1991) *Computer-Integrated Design and Manufacturing*, Mc Graw-Hill, New York.
- Boothroyd, G. (1981) *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Mc Graw-Hill, Tokyo.
- Chang, C.-H., Melkanoff, M.A. (1989) *NC Machine Programming and Software Design*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Groover, M.P. (2006) *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 3rd Edition, Wiley.
- Groover, M.P. (2007) *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 3rd Edition, Prentice Hall.
- Groover, M.P., Zimmers, E.W. (1984) *CAD/CAM: Computer Aided Design and Manufacturing*, Prentice Hall, New Jersey.
- Kalpajian, S. (1992) *Manufacturing Engineering and Technology*, 2nd Edition, Addison Wesley, Reading MA.
- Lee, K. (2009) *Βασικές αρχές συστημάτων CAD/ CAM/CAE*, εκδ. Κλειδάριθμος.
- Nolen, J. (1989) *Computer-Automated Process Planning for World-Class Manufacturing*, 1st Edition, CRC Press.
- Radhakrishnan, P., Subramanyan, S., Raju, V. (2008) *CAD/CAM/CIM*, 3rd Edition, New Age International Publishers, New Delhi.
- Schmid, D. (1999) *CIM ολοκληρωμένη παραγωγή με υπολογιστές*, επιμ. Μ. Βούλγαρης, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις.
- Thyer, G.E. (1993) *Computer Numerical Control of Machine Tools*, Newnes, Oxford.
- Xu, X. (2009). *Integrating advanced computer-aided design, manufacturing, and numerical control: principles and implementations*. Hershey: Information Science Reference.
- Zeid, I. (1991) *CAD/CAM Theory and Practice*, Mc Graw-Hill, New York.
- Αντωνιάδης, Α.Θ. (2011) *Μηχανουργική τεχνολογία – Β' Κατεργασίες Κοπής*, εκδ. Τζιόλα.
- Μπιλάλης, Ν., Μαραβελάκης, Ε. (2014) *Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση*, 2η έκδοση, εκδ. Κριτική.
- Παπαδανήλ, Ε. (1979) *Σημειώσεις Εργαλειομηχανών*, Ε.Μ.Π.