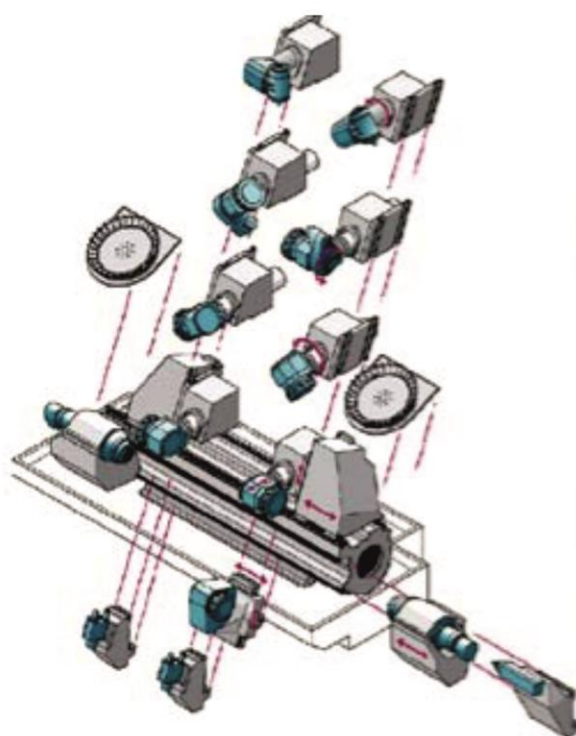




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ**



**ΑΛΠΑ ΜΑΡΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**





Στον αδερφό μου, Ματθαίο  
που μου απέδειξε θριαμβευτικά ότι όλα γίνονται

Στους γονείς μου, Βιβή και Κώστα  
για την απέραντη αγάπη, την υποστήριξη  
την ελευθερία προσωπικών επιλογών  
και το δικαίωμα στο λάθος

Στην οικογένεια μου στα Χανιά  
Τσούτσο, Ελένη, Σπύρο, Μελίνα, Ταξειίδη, Νέλη  
Αντιγόνη και Κύνθια  
Βασίλη  
Τάκη  
Ερμή  
Άννα  
για το φως και τη σκιά

Στον Πάνο  
που μου έδωσε την ομορφότερη αφορμή  
να θέλω περισσότερο από ποτέ να αρχίσουν τα όμορφα



Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν ανέφικτη χωρίς την καθοριστική συμβολή του καθηγητή μου, κυρίου Αριστομένη Αντωνιάδη, ο οποίος δεν υπήρξε μόνο επιβλέπωντας μιας μικρής χρονικής περιόδου, αλλά σχεδόν ολόκληρων των σπουδών μου. Με αυστηρότητα που προκαλεί προσωπικές ανησυχίες και ευγένεια που εμπνέει, φτάσαμε στο τέλος.

Κύριε Αντωνιάδη, σας ευχαριστώ πολύ από καρδιάς για την διακριτική επιμονή σας, την αστείρευτη υποστήριξη, την πάντα πολύτιμη βοήθεια σας, την υπομονή σας και την αφοπλιστική ειλικρίνιά σας. Αλλά κυρίως σας ευχαριστώ για την πνευματική αφύπνιση στην πρώτη μας συνάντηση, που πάντα θα θυμάμαι.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που πάντα ήταν δίπλα μου πιστεύοντας σε εμένα περισσότερο από εμένα και που καταφέρνει να αγαπά και τις πιο καταστροφικές συνέπειες της ανωριμότητας μου.

Και στους φίλους μου, που μοιραστήκαμε αγάπη που θα χορταίνει για πάντα τις ψυχές. Ευχαριστώ για τις ατελείωτες ώρες συζητήσεων, σκέψεων, προβληματισμών και διαμορφώσεων. Στα δυνατά μας γέλια, στους σιωπηλούς μας φόβους, ένα ευχαριστώ μεγάλο!

Show must go on...



## Περιεχόμενα

Αφιερώσεις	σελ. 3
Ευχαριστίες	σελ. 5
<b>1. Εργαλειομηχανές για διαδικασίες αφαίρεσης υλικού</b>	
<b>1.1 Βασικοί Ορισμοί και Ιστορία</b>	σελ. 13
1.1.1 Ιστορικές Παρατηρήσεις	σελ. 14
1.1.1.1. Βιομηχανική Επανάσταση	σελ. 14
1.1.1.2 Ο 19 <sup>ος</sup> αιώνας	σελ. 14
1.1.1.3 Η περίοδος 1900-1990	σελ. 16
1.1.1.4 Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια	σελ. 13
<b>1.2 Οι λειτουργικές απαιτήσεις μιας μηχανής</b>	σελ. 19
1.2.1 Τεχνολογικές απαιτήσεις και απαιτήσεις του χειριστή/χρήστη	σελ. 20
<b>1.3. Ο βασικός Μηχανισμός</b>	σελ. 23
<b>1.4 Η δομή του Μηχανισμού</b>	σελ. 26
1.4.1 Θεμέλια της Μηχανής	σελ. 28
1.4.2. Δομικά Υλικά Στοιχείων	σελ. 29
1.4.3 Δομική Ανάλυση	σελ. 29
1.4.4 Συναρμολογισιμότητα	σελ. 32
<b>1.5 Οδηγοί</b>	σελ. 34
1.5.1 Οδηγοί με περιορισμένη λίπανση	σελ. 35
1.5.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί	σελ. 36
1.5.3. Υδροστατικοί Οδηγοί	σελ. 36
<b>1.6 Ο ορισμός της βασικής κίνησης</b>	σελ. 37
<b>1.7 Ο ορισμός των Συστημάτων Κίνησης «Drive Trains»</b>	σελ. 39
<b>1.8 Η Εφαρμογή του CNC</b>	σελ. 41
<b>1.9 Επαλήθευση της Μηχανής</b>	σελ. 44
<b>1.10 Τυπικές Μηχανές για πολλές Εφαρμογές και Τομείς</b>	σελ. 45
1.10.1 Μία Μηχανή για μεγάλα Δομικά Εξαρτήματα Στροβιλοφόρου Κινητήρα	σελ. 45
1.10.2 Οριζόντια Φραιζα για Αυτοκινούμενα Στοιχεία	σελ. 46
1.10.3 Κέντρο Φραιζαρίσματος για καλούπια	σελ. 48
1.10.4 Μηχανή Φραιζαρίσματος για πρέσες και καλούπια	σελ. 49
1.10.5 Συμβατικές Μηχανές για Βοηθητικές Λειτουργίες	σελ. 50
1.10.6 Μηχανές Φραιζαρίσματος CNC για Γενική Παραγωγή	σελ. 51
1.10.7 Τόρνος Βαρέως Τύπου	σελ. 52
1.10.8 Μίτρα Πριονοκορδέλας	σελ. 52
<b>1.10.9 Μηχανές Μεταφοράς</b>	σελ. 53
1.10.10 Κέντρο Φραιζαρίσματος και Διεύρυνσης Οπών	σελ. 54
<b>2. Νέες Έννοιες Δομικών Στοιχείων</b>	
<b>2.1 Εισαγωγή και Ορισμοί</b>	σελ. 55
<b>2.2 Βελτιωμένες Δομές Μηχανών</b>	σελ. 57
2.2.1 Σύγκριση Μεταξύ Διαφορετικών Διαμορφώσεων Μηχανών	σελ. 57
2.2.2 Δομικά Στοιχεία στις Δομές Μηχανών	σελ. 61
2.2.3 Εύρωστα Έμβολα και Στήλες	σελ. 62
<b>2.3 Δομική Βελτιστοποίηση στις Μηχανές</b>	σελ. 64
2.3.1 Μηχανικές Απαιτήσεις για τις Μηχανές Οικολογικής Αποδοτικότητας	σελ. 64
2.3.2 Μοντελοποίηση FEM	σελ. 66
2.3.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση	σελ. 68
<b>2.4 Δομικά Υλικά</b>	σελ. 69

2.4.1 Σχετιζόμενες Παράμετροι	σελ. 69
2.4.2 Συμβατικά Υλικά για Δομικά Στοιχεία	σελ. 70
2.4.3 Καινοτόμα Υλικά για Δομικά Στοιχεία	σελ. 70
2.4.3.1 Πολυμερές Σκυρόδεμα ή Μεταλλική Χύτευση	σελ. 70
2.4.3.2 Γρανίτης	σελ. 71
2.4.3.3 Σύνθετα Ενισχυμένων Ινών	σελ. 71
2.4.3.4 Υβριδικά Υλικά και Δομές	σελ. 71
2.4.4 Κόστος Σχεδιασμού των Υλικών και των Δομών	σελ. 72
2.4.5 Η Επιρροή των Καινοτόμων Υλικών στην Παραγωγικότητα	σελ. 72
<b>2.5 Ενεργές Συσκευές Απόσβεσης</b>	σελ. 73
2.5.1 Η Εφαρμογή των ADD στις Δομές Μηχανών	σελ. 73
<b>2.6 Η Επιρροή των Νέων Δομικών Εννοιών στην Παραγωγικότητα</b>	σελ. 74
2.6.1 Η Επίδραση Νέων Εννοιών Σχεδιασμού για τα Δομικά Στοιχεία	σελ. 75
2.6.2 Η Επίδραση των ADDs στην Παραγωγικότητα	σελ. 77
<b>2.7 Μελλοντικές Τάσεις στα Δομικά Στοιχεία των Μηχανών</b>	σελ. 77
<b>3. Άξονες Εργαλειομηχανών</b>	
<b>3.1 Εισαγωγή</b>	σελ. 79
<b>3.2 Τύποι αξόνων</b>	σελ. 81
3.2.1 Μετάδοση της Κίνησης στον Άξονα με Ιμάντα	σελ. 81
3.2.2 Άξονες Μετάδοσης της Κίνησης από Οδοντοτροχούς	σελ. 82
3.2.3 Άξονες με Απευθείας Μετάδοση της Κίνησης	σελ. 83
3.2.4 Άξονες με Ενοποιημένο (ενσωματωμένο) Σύστημα Κίνησης	σελ. 83
<b>3.3 Διαμορφώσεις Αξόνων</b>	σελ. 84
3.3.1 Κοινές Διαμορφώσεις: Κάθετοι και Οριζόντιοι Άξονες	σελ. 84
3.3.2 Μηχανές με Περιστροφικές Κουκουβάγιες τόννου	σελ. 84
3.3.3 Ένας Βασικός Άξονας με έναν Βοηθητικό άξονα	σελ. 85
3.3.4 Δίδυμοι άξονες και Πολλαπλοί-άξονες	σελ. 86
3.3.5 Αυτόματη Ανταλλαγή Κεφαλής	σελ. 86
<b>3.4 Βασικά Στοιχεία του Άξονα</b>	σελ. 87
3.4.1 Κινητήρες	σελ. 87
3.4.1.1 Κινητήρες DC	σελ. 87
3.4.1.2 Κινητήρες AC	σελ. 88
3.4.1.3 Κινητήρες Ροπής	σελ. 89
3.4.2 Έδρανα	σελ. 89
3.4.2.1 Η Διάρκεια Λειτουργίας των Εδράνων	σελ. 93
3.4.2.2 Μεταλλικά και Υβριδικά-Κεραμικά Έδρανα	σελ. 94
3.4.2.3 Λίπανση	σελ. 95
3.4.2.4 Μαγνητικά Έδρανα	σελ. 96
3.4.2.5 Υδροστατικά Έδρανα	σελ. 97
3.4.2.6 Υδροδυναμικά Έδρανα	σελ. 97
3.4.2.7 Αεροστατικά Έδρανα	σελ. 97
3.4.3 Η Εργαλειοθήκη	σελ. 97
3.4.3.1 Κωνοειδές στοιχείο (taper)	σελ. 98
3.4.3.2 Σφιγκτήρες	σελ. 101
3.4.4 Η Ράβδος Έλξης	σελ. 104
3.4.5 Ο Μηχανοκίνητος άξονας	σελ. 104
3.4.6. Οι Αισθητήρες	σελ. 104
3.4.7 Το κιβώτιο (περίβλημα)	σελ. 105
<b>3.5 Ιδιότητες και Απόδοση της Ατράκτου</b>	σελ. 106
3.5.1 Ισχύς και Ροπή Ατράκτου Ενάντια Καμπυλών Ταχύτητας Ατράκτου	σελ. 106
3.5.2 Η Ακαμψία	σελ. 107
3.5.3 Δυναμική Συμπεριφορά και Κραδασμοί	σελ. 109
3.5.3.1 Η Δυναμική της Ατράκτου	σελ. 111
3.5.3.2 Η Εκτίμηση των Λοβών Σταθερότητας	σελ. 113

3.5.3.3 Μέθοδοι για την Μείωση και την Αποφυγή των Ιχνών Κραδασμού	σελ. 116
3.5.4 Η Θερμική Συμπεριφορά	σελ. 116
3.5.4.1 Πηγές Θερμότητας	σελ. 118
3.5.4.2 Η Ψύξη	σελ. 118
3.5.5 Άτρακτοι σε χρήση: Άλλα Προβλήματα	σελ. 119
3.5.5.1 Εκκεντρότητα	σελ. 119
3.5.5.2 Συγκρούσεις	σελ. 120
<b>3.6 Επιλογή Ατράκτου</b>	σελ. 120
3.6.1 Συμβατική Μηχανική Κατεργασία ή HSM	σελ. 121
3.6.2 Επιλογή Εργαλείου	σελ. 122
3.6.3 Το Υλικό του Επεξεργαζόμενου κομματιού	σελ. 123
3.6.4 Απαιτήσεις Ισχύος και Ταχύτητας της ατράκτου	σελ. 123
<b>3.7 Συνοπτικά Συμπεράσματα</b>	σελ. 125
<b>4. Νέες Εξελίξεις στην Κίνηση και στις Τράπεζες</b>	
<b>4.1 Εισαγωγή</b>	σελ. 127
4.1.1 Ακρίβεια και Δυναμική	σελ. 127
<b>4.2 Γραμμικοί Κινήσεις από Σφαιρικούς Κοχλίες</b>	σελ. 129
4.2.1 Διαστασιολόγηση	σελ. 129
4.2.1.1 Η Εξάλειψη του Κενού	σελ. 129
4.2.1.2 Τύποι Επανακυκλοφορίας	σελ. 130
4.2.1.3 Κρίσιμη Ταχύτητα και Εκτροπή	σελ. 130
4.2.1.4 Η Προφόρτιση	σελ. 131
4.2.1.5 Τιμή $d^*N$ και Λίπανση	σελ. 131
4.2.1.6 Χωρητικότητα και Διάρκεια Ζωής της Φόρτισης	σελ. 131
4.2.1.7 Δυναμικά Μοντέλα των Οδηγών Κίνησης	σελ. 134
4.2.1.7 Δυναμικά Μοντέλα των Οδηγών Κίνησης	σελ. 134
4.2.2 Ο Περιστροφικός Κοχλίας	σελ. 135
4.2.3 Άλλες Διαμορφώσεις	σελ. 135
<b>4.3 Γραμμικοί Οδηγοί Κίνησης από οδοντωτές ράβδους και τροχούς</b>	σελ. 136
4.3.1 Η εξάλειψη του Κενού	
4.3.2 Διαστασιολόγηση	σελ. 136
4.3.3 Δυναμικά Μοντέλα των Κινήσεων	σελ. 139
<b>4.4 Γραμμικές Κινήσεις από Γραμμικούς Κινητήρες</b>	σελ. 139
4.4.1 Στήριξη	σελ. 141
4.4.2 Διαμορφώσεις	σελ. 141
<b>4.5 Περιστροφικά Συστήματα Κίνησης</b>	σελ. 142
4.5.1 Μηχανικές Μεταδόσεις	σελ. 142
4.5.1.1 Μετάδοση Ατέρμονου Κοχλία	σελ. 142
4.5.1.2 Μετάδοση Οδοντοτροχού	σελ. 142
4.5.2 Άμεσα Περιστρεφόμενα Συστήματα Κίνησης	σελ. 143
<b>4.6 Συστήματα Μετάδοσης της Κίνησης</b>	σελ. 144
4.6.1 Οδηγοί Τριβής	σελ. 144
4.6.1.1 Υλικά	σελ. 144
4.6.1.2 Η Ικανότητα Φόρτισης και Απόσβεσης	σελ. 145
4.6.1.3 Η Κατασκευή	σελ. 145
4.6.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί	σελ. 146
4.6.2.1 Γραμμικά Έδρανα χωρίς Επανακυκλοφορία	σελ. 146
4.6.2.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί Επανακυκλοφορίας	σελ. 147
4.6.3 Υδροστατικοί Οδηγοί	σελ. 148
4.6.3.1 Η Απόσβεση	σελ. 150
4.6.3.2 Η Κατανάλωση Ενέργειας	σελ. 150
4.6.3.3 Το Υδραυλικό Κύκλωμα	σελ. 151
4.6.3.4 Τα Κριτήρια Σχεδιασμού	σελ. 151

4.6.4 Αεροστατικοί Οδηγοί	σελ. 151
<b>4.7 Το Παρόν και το Μέλλον</b>	σελ. 152
4.7.1 Κυλινδρικοί Οδηγοί με Ενσωματωμένες Λειτουργίες	σελ. 152
4.7.2 Το Υδροστατικό Πέλμα πάνω στις Ράγες Οδήγησης	σελ. 153
4.7.3 Καθοδήγηση και Κίνηση μέσω Μαγνητικής Μετεώρισης	σελ. 153
<b>5. Έλεγχος για Διαδικασίες Μηχανικής Κατεργασίας</b>	
<b>5.1 Εισαγωγή και Ιστορία</b>	σελ. 155
5.1.1 Υπολογιστικός Αριθμητικός Έλεγχος και Άμεσος Αριθμητικός Έλεγχος	σελ. 156
5.1.2 Διαδικτυακός Έλεγχος και Εποπτεία	σελ. 158
<b>5.2 Νέες Διαδικασίες Μηχανικής Κατεργασίας</b>	σελ. 159
5.2.1 Μηχανική Κατεργασία Υψηλής Ταχύτητας	σελ. 160
5.2.2 Μικρο-μηχανική Κατεργασία	σελ. 161
5.2.3 Μία Εισαγωγή στις Διαδικασίες Νάνο-κατεργασίας	σελ. 162
<b>5.3 Τα Σημερινά CNC: Επίπεδο Ελέγχου της Μηχανής</b>	σελ. 163
5.3.1 Η Διαδικασία Παρεμβολής	σελ. 164
5.3.1.1 Παραγωγή Τροχιάς	σελ. 165
5.3.2 Ο Σερβομηχανισμός Ελέγχου της Θέσης	σελ. 168
5.3.2.1 Συστήματα Ελέγχου Σφάλματος Ανίχνευσης	σελ. 169
5.3.2.2 Συστήματα Ελέγχου Σφάλματος Διαμόρφωσης Περιγράμματος	σελ. 173
<b>5.4 Προηγμένα CNC: Ιεραρχικός Έλεγχος Πολλαπλών Επιπέδων</b>	σελ. 174
5.4.1 Ο Έλεγχος της Διαδικασίας Κατεργασίας	σελ. 176
5.4.2 Ο Εποπτικός Έλεγχος της Διαδικασίας Κατεργασίας: Μεταβλητές Αξίες	σελ. 177
5.5 Το Σύστημα Αισθητήρων για την Διαδικασία Κατεργασίας	σελ. 179
5.5.1 Σωστές Συνθήκες Παρακολούθησης	σελ. 183
5.5.2 Χαρακτηριστικά Κατεργασίας και η Μέτρησή τους	σελ. 183
5.5.3 Δύο Μελέτες Περίπτωσης	σελ. 185
<b>5.6 Συστήματα CNC Ανοιχτής Αρχιτεκτονικής</b>	σελ. 185
5.6.1 Δικτυωμένος Έλεγχος και Εποπτεία	σελ. 190
5.6.1.1 Επικοινωνίες σε ένα Βιομηχανικό Περιβάλλον	σελ. 190
5.6.1.2 Η Δομή ενός Συστήματος Δικτυωμένου Ελέγχου και Εποπτείας	σελ. 191
5.6.1.3 Δικτυωμένος Έλεγχος και Εποπτεία μέσω Ethernet	σελ. 192
5.6.1.4 Δικτυωμένα Συστήματα Ελέγχου	σελ. 195
<b>5.7 Συστήματα Υποστήριξης Προγραμματισμού:</b>	σελ. 197
<b>Χειροκίνητος Προγραμματισμός</b>	
5.7.1 Προγραμματισμός Υποβοηθούμενος από Υπολογιστή	σελ. 202
5.7.2 Γραφική Προσομοίωση	σελ. 203
<b>5.8 Σύγχρονες Αρχιτεκτονικές CNC</b>	σελ. 204
5.8.1 Συστήματα που βασίζονται στην Αρχιτεκτονική του Πολλαπλού-Μικροεπεξεργαστή	σελ. 205
5.8.2 Ο H/Y Front/end	σελ. 205
5.8.3 Η Κάρτα Ελέγχου της Κίνησης με έναν H/Y	σελ. 206
5.8.4 Η Βασισμένη στο Λογισμικό Λύση	σελ. 206
5.8.5 Πλήρως Ψηφιακές Αρχιτεκτονικές: Προς τις Έξυπνες Εργαλειομηχανές	σελ. 208
<b>6. Απόδοση και Ακρίβεια Εργαλειομηχανών</b>	
<b>6.1 Εισαγωγή και Ορισμοί</b>	σελ. 211
6.1.1 Μία Εισαγωγή Στη Κατεργασία Ακριβείας	σελ. 212
6.1.2 Βασικοί Ορισμοί: Ακρίβεια, Επαναληψιμότητα και Ανάλυση	σελ. 214
6.1.3 Ιστορικές Παρατηρήσεις και η Κατάσταση της Τεχνολογίας	σελ. 215

<b>6.2 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού και Προϋπολογισμός Σφάλματος</b>	σελ. 217
6.2.1 Πηγές Σφαλμάτων στις Εργαλειομηχανές	σελ. 217
6.2.2 Εκτίμηση Προϋπολογισμού του Σφάλματος	σελ. 218
6.2.2.1 Σφάλματα Εργαλειομηχανών	σελ. 218
6.2.2.2 Σφάλματα Μηχανικής Επεξεργασίας	σελ. 218
6.2.2.3 Βοηθητικά Συστήματα Ευθυγράμμισης και η Ρύθμιση της Αναφοράς	σελ. 219
6.2.2.4 Ο Συνολικός Προϋπολογισμός Σφάλματος	σελ. 220
6.2.3 Βασικές Αρχές για τον Σχεδιασμό Μηχανής Ακριβείας	σελ. 221
6.2.3.1 Η Δομή της Εργαλειομηχανής	σελ. 222
6.2.3.2 Η Αρχή Κινηματικού Σχεδιασμού και η Ομαλή Κίνηση	σελ. 222
6.2.3.3 Η Βασική Αρχή ABBE	σελ. 223
6.2.3.4 Η Μέτρηση Τοποθέτησης	σελ. 224
6.2.3.5 Η Αρχή της Διόρθωσης Σφάλματος	σελ. 226
6.2.3.6 Έλεγχος Τοποθέτησης Εργαλειομηχανής	σελ. 226
6.2.4 Σφάλμα Μετάδοσης	σελ. 227
6.2.5 Θερμικά Σφάλματα	σελ. 230
6.2.6 Σφάλματα παρεμβολής του CNC	σελ. 233
<b>6.3 Σφάλματα Προερχόμενα από την Διαδικασία Κατεργασίας</b>	σελ. 234
6.3.1 Σφάλματα Προερχόμενα από την γενιά προγραμμάτων CNC	σελ. 235
6.3.2 Σφάλματα Προερχόμενα από την Φθορά του Εργαλείου	σελ. 236
6.3.3 Σφάλμα Απόκλισης Εργαλείου	σελ. 237
<b>6.4 Διαδικασίες Επαλήθευσης</b>	σελ. 241
6.4.1 Πρότυπες Διαδικασίες για την Επαλήθευση της Εργαλειομηχανής	σελ. 241
6.4.2 Εξαρτήματα Ελέγχου	σελ. 245
6.5 Ένας Σύντομος Επίλογος	σελ. 247
 <b>7. Εξελίξεις στους Τόρνους και στις Φρέζες</b>	
<b>7.1 Εισαγωγή</b>	σελ. 249
<b>7.2 Διαμόρφωση Μηχανής</b>	σελ. 250
7.2.1 Τόρνοι Υψηλής Παραγωγής	σελ. 250
7.2.1.1 Διαδικασίες Υψηλής Παραγωγής: Σκληρή Τόρνευση Ενάντια Λείανσης	σελ. 252
7.2.2 Φρέζες: Μηχανές Πολλαπλών Εργασιών	σελ. 252
7.2.2.1 Μηχανές Μεγάλου Μεγέθους για Διαδικασίες Βαρέως Τύπου	σελ. 254
7.2.2.2 Νέες Ιδέες στην Έννοια του Διαρθρωτικού Μηχανήματος	σελ. 254
<b>7.3 Οι Τελευταίες τεχνολογίες που Εφαρμόστηκαν στους Τόρνους και στα κέντρα Τόρνευσης</b>	σελ. 257
7.3.1 Τεχνολογίες Γενικής Διαμόρφωσης	σελ. 257
7.3.2 Συμπληρωματικές Τεχνολογίες Βελτίωσης της Απόδοσης της Μηχανής	σελ. 258
<b>7.4 Ειδικές Διαδικασίες Κατεργασίας που Εφαρμόζονται στις Μηχανές Πολλαπλών Εργασιών</b>	σελ. 259
7.4.1 Η Εφαρμογή Λείζερ	σελ. 260
7.4.2 Τροχός Λείανσης και Βαθύ Τρόχισμα	σελ. 261
7.4.3 Υπερηχητικά Υποβοηθούμενη Τόρνευση	σελ. 263
7.4.4 Τόρνευση Υποβοηθούμενη από Κρυογονικό Αέριο	σελ. 263
7.4.5 Κατεργασία Υποβοηθούμενη από Ψυκτικό Υψηλής Πίεσης	σελ. 264
<b>Βιβλιογραφία</b>	σελ. 267



# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Εργαλειομηχανές για διαδικασίες αφαίρεσης υλικού

## Περίληψη Κεφαλαίου:

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται οι βασικές αρχές των εργαλειομηχανών και η εξέλιξη της ιστορίας της τεχνολογίας και της τεχνικής που χρησιμοποιείται. Η ιστορία αρχίζει τους δύο τελευταίους αιώνες, ωστόσο οι αλλαγές που έχουν σημειωθεί τα τελευταία δέκα χρόνια είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Οι βασικότερες αρχές που αφορούν τον σχεδιασμό μηχανών θα εξηγηθούν μία προς μία, και θα εξηγηθούν σε βάθος στα παρακάτω κεφάλαια, συμπληρώνοντας μία γενική θεώρηση του κόσμου των εργαλειομηχανών και συμβάλλοντας στην ευρύτερη κατανόηση λειτουργίας των μηχανών.

## 1.1. Βασικοί Ορισμοί και Ιστορία

Στην εγκυκλοπαίδεια «Britannica», δίνεται η ακόλουθη περιγραφή για τις εργαλειομηχανές:

«Κάθε μηχανή καθοδηγούμενη από σταθερή ισχύ, που χρησιμοποιείται για να δώσει σχήμα σε μεταλλικά εξαρτήματα ή εξαρτήματα από άλλα υλικά. Η σχηματοποίηση επιτυγχάνεται με τέσσερις τρόπους:

1. κόβοντας το περίσσειμα του υλικού υπό τη μορφή θραυσμάτων από το εξάρτημα
2. μοιράζοντας το υλικό
3. πιέζοντας τα μεταλλικά μέρη στο επιθυμητό σχήμα
4. εφαρμόζοντας ηλεκτρισμό, υπερήχους, ή διαβρωτικά χημικά στο υλικό.»

Ο παραπάνω ορισμός παρέμεινε αμετάβλητος για τα τελευταία διακόσια χρόνια, αν και η πρόοδος των τελευταίων ετών μπορεί να κάνει τον ακόλουθο ορισμό πιο κατάλληλο, ότι τελικά μία εργαλειομηχανή είναι ένας σερβο-ελεγχόμενος χωρικός μηχανισμός που οδηγεί ένα εργαλείο κοπής κατά μήκος μίας σύνθετης τροχιάς, δημιουργώντας ένα νέο σχήμα στο προς κατεργασία υλικό. Και οι δύο ορισμοί είναι συμπληρωματικοί, ωστόσο, ο τελευταίος ταιριάζει με τις νέες εξελισσόμενες λειτουργίες των εργαλειομηχανών, που θα αναπτυχθούν καλύτερα στα ακόλουθα κεφάλαια.

Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναφερθεί η διαίρεση των εργαλειομηχανών σε κατηγορίες με κριτήριο τις φυσικές διαδικασίες κατεργασίας και διαμόρφωσης του ακατέργαστου υλικού. Οι πέντε βασικές κατηγορίες είναι:

Οι τεχνολογίες απόθεσης-προσθήκης υλικών, όπως η χύτευση μετάλλου σε καλούπι και η σύντηξη, ή οι νέες τεχνικές «ταχείας παραγωγής» που αναπτύχθηκαν ταχύτατα τα τελευταία δέκα χρόνια.

Σύνθετες τεχνικές, στις οποίες ανήκουν η ίλωση, η ηλεκτροσυγκόλληση χάλυβα-αλουμινίου (FSW), η συγκόλληση και η συναρμολόγηση.

Σχηματοποίηση-Διαμόρφωση, στην οποία συμπεριλαμβάνονται τεχνικές όπως οι εν θερμώ κατεργασίες (π.χ. η σφυρηλάτηση) και εν ψυχρώ κατεργασίες (π.χ. η σχηματοποίηση, η κλώση και η τοποθέτηση σφηνών εξελιγμένης παραγωγής)

Η κοπή των υλικών, που συμπεριλαμβάνει την διάτμηση, την διάτρηση, την κοπή με λείζερ και την κοπή με χρήση νερού σε υψηλή πίεση ή την κοπή με νερό και λειαντικά μέσα (AWJ).

Και τέλος, οι διαδικασίες απομάκρυνσης-αφαίρεσης υλικού, επίσης γνωστές ως μηχανουργικές διαδικασίες. Εδώ, η χρήση εργαλείων κοπής με καθορισμένη αιχμή ή με μη καθορισμένη αιχμή διακρίνει δύο ακόμα μικρότερες κατηγορίες τις διαδικασίες κοπής και

λείανσης αντίστοιχα. Μία τρίτη ομάδα αφορά τις μη συμβατικές μηχανουργικές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να οριστούν ως διαδικασίες διάβρωσης.

### **1.1.1. Ιστορικές Παρατηρήσεις**

Η σχηματοποίηση των σκληρών υλικών υπήρξε διαχρονικά μία πρόκληση σε ολόκληρη την ιστορία του ανθρώπινου είδους. Από τον μεσαίωνα έως την βιομηχανική επανάσταση το «violinauch» χρησιμοποιήθηκε ως ο βασικός μηχανισμός για να επιτευχθεί ταχεία κίνηση περιστροφής σε έναν ξύλινο άξονα. Περίπου στα 1250, μία καθοδηγούμενη από το πόδι μεταβολή σήμανε μεγάλη πρόοδο, αφού τα χέρια του χρήστη ήταν ελεύθερα να εκτελέσουν άλλες κατεργασίες στο ξύλινο τεμάχιο.

Ο LeonardodaVinci, σχεδίασε πολλά εργαλειομηχανήματα, αλλά τα περισσότερα από αυτά δεν ήταν φτιαγμένα για να μπορούν να αντιμετωπίσουν τεχνικά εμπόδια. Ο Plumier (1701), ανέλυσε τις δυσκολίες της κατεργασίας μεταλλικών τεμαχίων στο βιβλίο του η τέχνη της αλλαγής «L' artdeTourner» και συγκεκριμένα στην περίοδο που η χρήση μηχανισμού στροφάλου που λειτουργούσε με το πόδι αποτελούσε μία γενίκευση ακόμα. Ο Ramsden (1777), εφεύρε τον τόρνο, στον οποίο συγχρονίζονταν μία περιστροφή και μία διαμήκης κίνηση.

Η διεύρυνση οπής με το χέρι, χρησιμοποιούνταν μέχρι το 1372, αλλά γρήγορα αντικαταστάθηκε από περιστροφικούς άξονες που ήταν καθοδηγούμενοι από υδραυλική ισχύ.

#### **1.1.1.1. Βιομηχανική Επανάσταση**

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, η εφεύρεση της ατμομηχανής χάρη στους Papin, Newcomen και JamesWatt αποτελούσε πλέον γεγονός. Αυτή η καινοτομία αποτέλεσε απαραίτητο συστατικό στην μετεξέλιξη των εργαλειομηχανών καθ' όλη τη διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ωστόσο, η εφεύρεση αυτή ήταν επίσης σημαντική επειδή απαιτούσε την κατασκευή μίας οριζόντιας διεύρυνσης οπής φραιζαρίσματος από τον JohnWilkinson (1775), για την επίτευξη ακριβούς λειτουργίας στα πιστόνια της μηχανής.

Αργότερα, ο HenryMaudslay (1797), ανέπτυξε έναν τόρνο που συμπεριλάμβανε τις τέσσερις βασικές δομές των εργαλειομηχανών: ένα μεταλλικό πλαίσιο, επίπεδους γραμμικούς οδηγούς για την κίνηση των εργαλείων, εναλλασσόμενα γρανάζια και έναν μηχανισμό τροφοδοσίας σπειρών.

#### **1.1.1.2. Ο 19<sup>ος</sup> αιώνας**

Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερη ακρίβεια και επανάληψη στην παραγωγή, η πρόοδος που σημειώθηκε από τους τρεις μαθητές του Maudslay ήταν μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα ο Roberts ανέπτυξε την μηχανή πλανίσματος (metalplanningmachine), ο Witworth την μηχανή κοπής γραναζιού, και ο Nasmyth τις μηχανές διαμόρφωσης (shaping), τις μηχανές για το λιμάρισμα χαλύβδινων βραχιόνων, διάτρησης και τις μηχανές λείανσης.

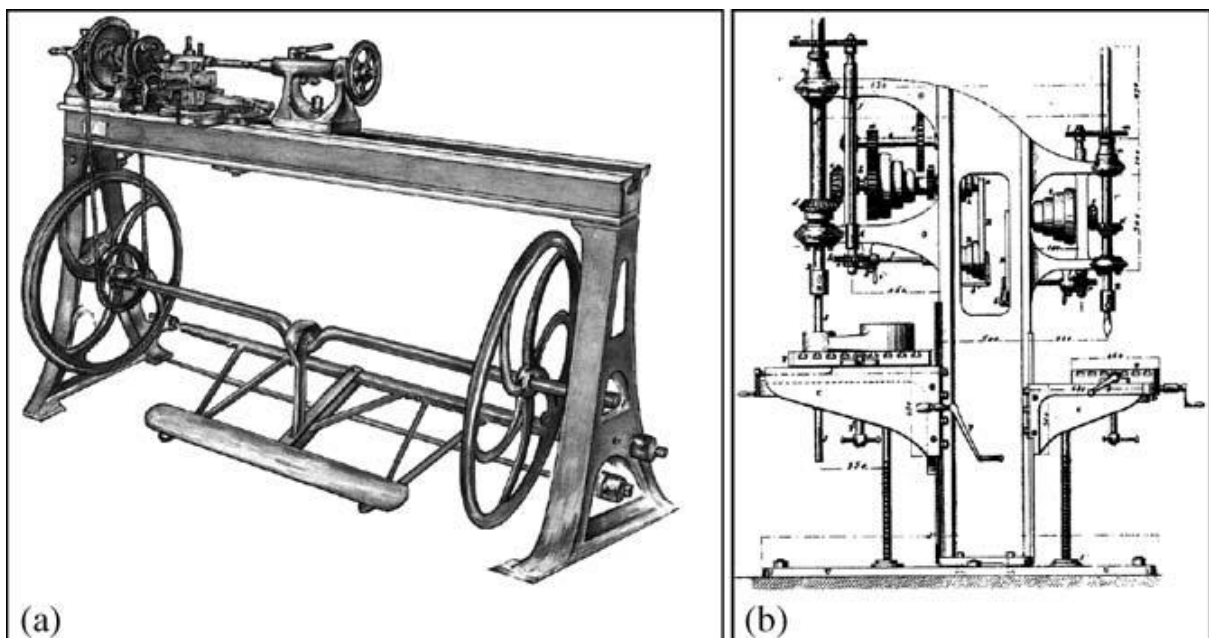
Στις ΗΠΑ, η μηχανή φραιζαρίσματος, ανακαλύφθηκε από τον E. Whitney (1818) και τελειοποιήθηκε αργότερα, κατά το έτος 1830. Το 1862 ο J. R. Brown παρουσίασε παγκοσμίως την πρώτη μηχανή φραιζαρίσματος, με έναν ευθυγραμμιστή, ένα τραπέζι εργασίας με κάθετη μετατόπιση, και εγκάρσια κίνηση του τραπεζιού μέσω ενός συνδέσμου.

Ο μηχανικός F. Holz της εταιρίας «CincinnatiScrewandTap», συμπεριέλαβε στον σχεδιασμό αυτόν ένα αξονικό έμβολο (ram), το έτος 1884. Ο Γάλλος P. Hure, το έτος 1894, παρουσίασε ένα πρωτότυπο τμήμα τórνου με κεφαλή, που επέτρεπε κατεργασία σε όλες τις χωρικές γωνίες.

Η πρώτη παγκόσμια μηχανή λείανσης, είχε ξεκινήσει από τους Brown και Sharpe το 1870. Η αυτοματοποίηση με την χρήση κινηματικών αλυσίδων, άρχισε να κερδίζει έδαφος με τους αυτοματοποιημένους τórνους που αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά από τον Miner το 1870, και στη συνέχεια, δύο χρόνια αργότερα από τον J. Schwizer. Στο τέλος του 19ου αιώνα, η εταιρία «Acme» κατασκεύασε έναν τórνο με τέσσερις πολλαπλές ατράκτους.



Σχήμα 1. 1 – (a) Μία θεώρηση των καθοδηγούμενων από ιμάντες μηχανών που χρησιμοποιούνται σήμερα στο μουσείο εργαλειομηχανών «Elgoibar» (Ισπανία). (b) Λεπτομέρεια από ένα τύμπανο περιστρεφόμενου πυργίσκου τórνου.



Σχήμα 1. 2 – (a) Τórνος καθοδηγούμενος από πηδάλιο. (b) Τρύπημα μεταβλητής πίεσης, στο τέλος του 19ου αιώνα.

Η διαδικασία για την κατασκευή γραναζιών, εφαρμόστηκε πρώτα από τον Bilgran το 1884, και αμέσως μετά από τον Fellow. Δέκα χρόνια αργότερα, η γερμανική εταιρία «Reickner» παρουσίασε την αρχή της κυλίσεως, χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο κοπής ζεστού τύπου. Οι εικόνες 1.1 και 1.2 δείχνουν κάποιες μηχανές του 19ου αιώνα

#### 1.1.1.3. Η περίοδος 1900-1990

Ο 20<sup>ος</sup> αιώνας σημείωσε την μεγαλύτερη ανάπτυξη στην βιομηχανία αυτοκινήτων, αφού το 1908 ο H. Ford κατασκεύασε το πρώτο αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής. Η μαζική παραγωγή, σε συνδυασμό με τις διαστατικές και σχηματικές απαιτήσεις της παραγωγής, οδήγησε σε βελτιώσεις στους τύπους των μηχανών κατεργασίας που ήταν γνωστές ως το τέλος του προηγούμενου αιώνα.

Το 1933, ο L. Wilkie, ανέπτυξε άλλη μία βασική εργαλειομηχανή, το πριόνι μεταλλικής κοπής με ζώνη μέτρησης των οριακών τιμών. Το 1984, ο J. Parson, ένας μηχανικός της εταιρίας «Bendix», ανέπτυξε έναν αυτοματισμό για τον έλεγχο μίας τρισδιάστατης μηχανουργικής λειτουργίας, που βελτιώθηκε από το MIT κατά την διάρκεια των επόμενων τριών χρόνων.

Στα χρόνια εκείνα, ο δυαδικός κώδικας προγραμματισμού υποστηριζόταν από διάτρητες κάρτες, και αργότερα από διάτρητες ταινίες. Αλλά η πραγματική διάδοση του αριθμητικού ελέγχου (NC) ήταν στις δεκαετίες 1970 και 1980, όταν ο μικροεπεξεργαστής έγινε το «μυαλό» του μηχανισμού ελέγχου και η έννοια CNC (ψηφιακός αριθμητικός έλεγχος) αναπτύχθηκε πλήρως. Το 1990, η ηλεκτρονική απελευθέρωση των ελέγχων που βασιζόταν σε διαύλους και κάρτες H/Y, ενεργοποίησε την αναβάθμιση των μηχανών στα έξυπνα κατασκευαστικά συστήματα.

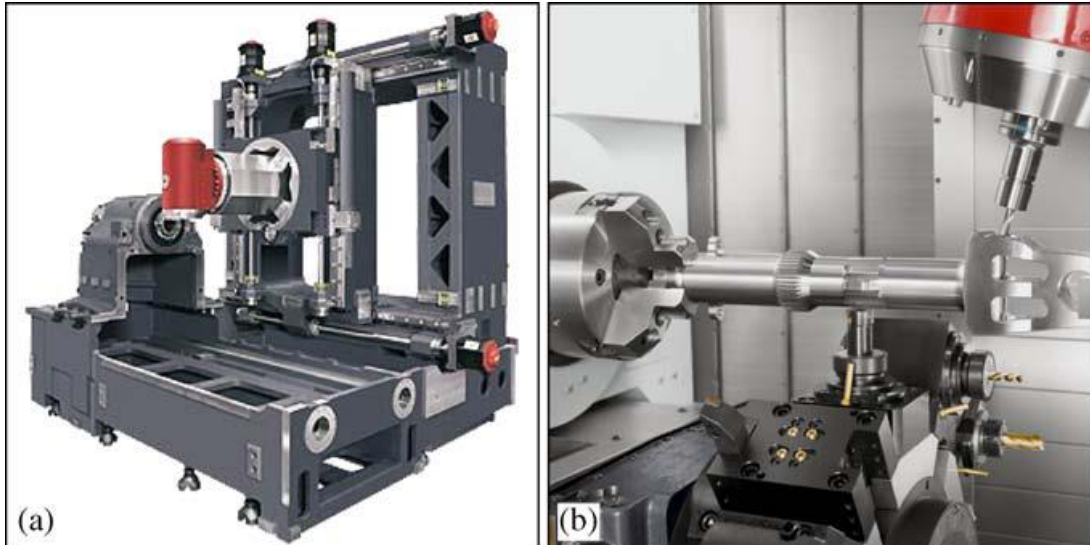
#### 1.1.1.4. Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια

Με την εμφάνιση των CNC μηχανών, οι εργαλειομηχανές μπορούσαν να είναι πλήρως αυτοματοποιημένες, καθώς συμπεριλάμβαναν πλέον AutomatedToolChange - ATC (αυτόματη αλλαγή κοπτικού εργαλείου), AutomatedPartChange – APC (αυτόματη αλλαγή τμήματος) καθώς και άλλα βοηθητικά χαρακτηριστικά, όπως αισθητήρες μετρήσεων, δυνατότητες δικτύου και άλλες εξελιγμένες λειτουργίες. Ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής αναβαθμίζεται, εκτελώντας αυτοματοποιημένα και προγραμματιζόμενα όλες τις μηχανικές λειτουργίες.

Με τον όρο «κέντρο κατεργασίας» σήμερα, αναφερόμαστε στην πιο κοινή μηχανή, η οποία συνδυάζει μία μηχανή φραιζαρίσματος CNC, με αλλαγή αυτόματου εργαλείου (ATC), έτοιμο για διάτρηση, επιπεδοποίηση, διεύρυνση οπών και σπειροτόμηση. Ομοίως, ένας τόρνος CNC με ελεγχόμενο τον άξονα C και περιστροφικά εργαλεία, που τοποθετείται σε ένα μηχανοκίνητο τύμπανο περιστρεφόμενου πυργίσκου (motorizeddrumturret), ορίζεται σήμερα ως «κέντρο περιστροφής».

Οι υψηλές απαιτήσεις σε χρόνο και ακρίβεια στην παραγωγή σε συνδυασμό με την ισχύ των ελεγκτών και τη δημιουργικότητα των μηχανικών, οδήγησαν στην κατασκευή των μηχανών πολλαπλών εργασιών – multi-taskingmachines, με δυνατότητες φραιζαρίσματος, περιστροφής και διάτρησης, ακόμη και λείανσης. Στο σχήμα 1.3 μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα από τον MoriSeiki. Το πλαίσιο εργασίας είναι μία δομή box-in-box τριών αξόνων, με μετατοπιζόμενο έναν περιστροφικό άξονα στον οποίο η κεφαλή της ατράκτου στρίβει περίπου  $\pm 120^\circ$ . Τοποθετώντας εδώ, ένα εργαλείο περιστροφής, φραιζαρίσματος ή διάτρησης, μπορεί να μετακινηθεί σε μία μεγάλη επιφάνεια εργασίας. Μία άλλη βασική κίνηση παρέχεται από ένα τμήμα τόρνου ισχύος με κεφαλή, που τοποθετείται πάνω σε μία οριζόντια και επίπεδη επιφάνεια. αν εφαρμόζεται μία περιστροφική λειτουργία, αυτό το τμήμα γυρίζει το κομμάτι επεξεργασίας, όπου αν εφαρμόζεται μία λειτουργία φραιζαρίσματος, αυτή η κεφαλή κινεί αργά το κομμάτι επεξεργασίας, ελέγχοντας τη θέση της

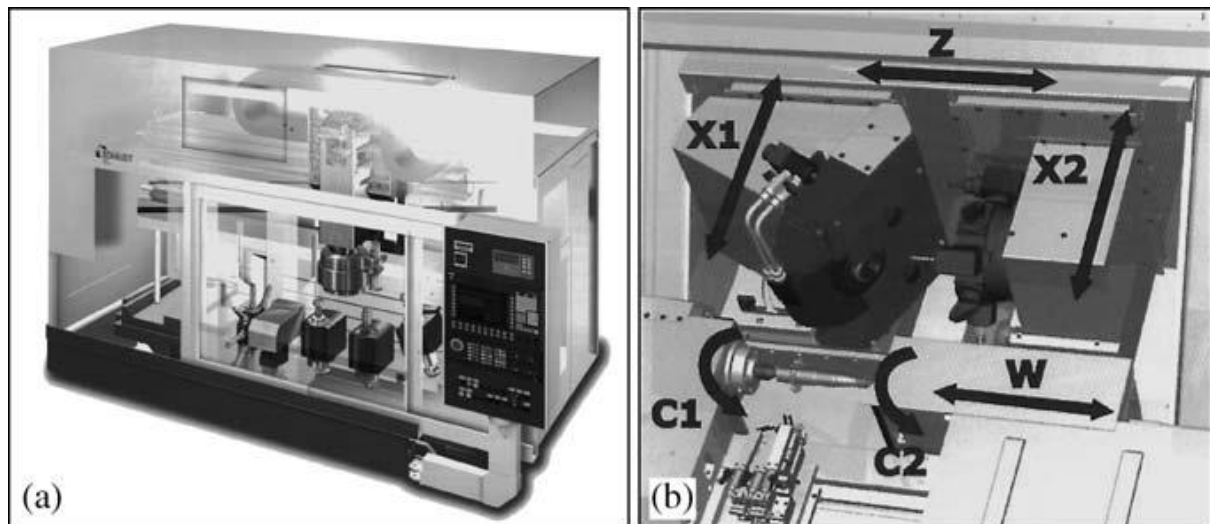
γωνίας του. Συγχρόνως, ένας περιστροφικός πυργίσκος τυμπάνου κινεί κατά μήκος τους οριζόντιους οδηγούς. Στο σχέδιο αυτό, ένας κινητήρας δομείται μέσα στον περιστροφικό πυργίσκο (και ονομάζεται «built-in motorturret»).



Σχήμα 1.3 – Η μηχανή πολλαπλών εργασιών MoriSeiki. (α) Δομή box-in-box με μία ram οκταγωνικού τομέα. (β) Επίπεδη επιφάνεια με ένα τμήμα τόνου με κεφαλή και την δυνατότητα περιστροφικού πυργίσκου χαμηλής μηχανοκίνησης.

Πρόσφατα, οι λειτουργίες κοπής και λείανσης συμπεριλαμβάνονται στο ίδιο μηχάνημα, όπως στις μηχανές που φαίνονται στο σχήμα 1.4, από τον Schaudt.

Αποτέλεσμα της ευρηματικότητας των σχεδιαστών μηχανικών, είναι η χρήση παράλληλων κινηματικών δομών. Η πρώτη εφαρμογή τους ήταν το πρωτότυπο Variax από τους Gidding και Lewis, που παρουσιάστηκε το 1994 στο IMTS του Σικάγο. Η παράλληλη κινηματική δεν αποτελεί μία παγκόσμια λύση για όλες τις εργαλειομηχανές, ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί σε κάποιες μηχανές μεγάλου μεγέθους.



Σχήμα 1. 4 – Υβριδικές μηχανές. (α) Μοντέλο ComboGrind από τον Schaudt. Συνδυάζοντας περιστροφή και εσωτερική λείανση. (β) CombiGrind από τον Schaudt, συνδυάζοντας περιστροφή και κυλινδρική λείανση.

**Πίνακας 1.1** – Πρόσφατη ταξινόμηση των σύγχρονων εργαλειομηχανών

<p><u>Προσδιορισμένη αιχμή (κοπή)</u></p> <p><u>Βασική κίνηση:</u> ορισμοί κινήσεων Μηχανή αρχικής διάτρησης Πριονοκορδέλα και σιδηροπρίονο Μηχανή πλανίσματος και μηχανή διαμόρφωσης Μηχανή εγκοπής <u>Βασική κίνηση:</u> περιστροφή <b>Στροφή:</b> Γενική μηχανή τόννου Κάθετος τόννος Περιστρεπτός πυργίσκος τυμπάνου Μηχανή πολλαπλών ατράκτων <b>Επιτεδοποίηση:</b> Γενική μηχανή φραιζας Κάθετη μηχανή φραιζας <b>Διεύρυνση οπής:</b> Οριζόντια μηχανή εσωτερικής τόννευσης <b>Διάτρηση:</b> Τρυπάνι πάγκου Πρέσα οπών Ακτινωτή πρέσα οπών Τρυπάνι πολλαπλών ατράκτων Τρυπάνι περιστρεπτού πυργίσκου τυμπάνου Μηχανή για βαθιές τρύπες <b>Πριόνισμα:</b> Περιστροφικό πριόνι ή πριόνι δίσκου (εν ψυχρώ) <b>Κέντρο κατεργασίας:</b> οι μηχανές σχεδιάζονται για να χρησιμοποιούν περιστροφικά εργαλεία, με την δυνατότητα φραιζαρίσματος, διάτρησης και διεύρυνσης οπών: Κάθετα Οριζόντια <b>Κέντρο στρωφών:</b> Μηχανές που προέρχονται από έναν τόννο με δυνατότητα στροφής και φραιζαρίσματος, συμπεριλαμβάνοντας: Μηχανοκίνητα εργαλεία σε έναν περιστρεπτό πυργίσκο τυμπάνου ή/και Ένα τμήμα τόννου με κεφαλή Μηχανές και συστήματα μεταφοράς Μηχανές κατασκευής γραναζιών</p>	<p><u>Απροσδιόριστη αιχμή (λείανση)</u></p> <p><b>-Λείανση:</b> Κυλινδρικός λειαντής: Εξωτερικός Εσωτερικός Επιφανειακός λειαντής: Περιστροφή Παλινδρομική κίνηση Λείανση κοπής μεγάλου βάθους Σημειακός λειαντής: Άκεντρος λειαντής Εργαλείο λείανσης <b>-Ακόνισμα:</b> Σύντομο χτύπημα Συνεχές χτύπημα <b>-Λείανση:</b> Μονής όψης Διπλής όψης <b>-Πριόνια πραγματικής τριβής (δίσκου και κορδέλας)</b> <b>-Πριόνια με δίσκο</b></p> <p><u>Μη-συμβατικά (διάβρωση)</u> <b>Κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης:</b> Καλώδια (WEDM) Πόντισμα (SEDM) Ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM) Κατεργασία δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) Κατεργασία υπερήχων (USM)</p> <p><u>Λείζερ:</u> Αυτό το νέο εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κοπή μεταλλικών επιφανειών, τη συγκόλληση, την προσθήκη και αφαίρεση υλικών.</p> <p><u>Μηχανή πολλαπλών εργασιών:</u> Μηχανή που συνδυάζει δύο διαδικασίες κατεργασίας: Επιτεδοποίηση και στροφή Στροφή και λείανση Επιτεδοποίηση και λείανση</p> <p><u>Υβριδική μηχανή:</u> Μηχανή που συνδυάζει μία διαδικασία κατεργασίας και άλλες παραγωγικές διαδικασίες.</p>
--	--

## 1.2. Οι λειτουργικές Απαιτήσεις μίας Εργαλειομηχανής

Η βασική λειτουργία μίας εργαλειομηχανής για τις διαδικασίες απομάκρυνσης-αφαίρεσης υλικού, είναι να μετακινήσει ένα εργαλείο κοπής κατά μήκος μίας περισσότερο ή λιγότερο σύνθετης τροχιάς, με επαρκή ακρίβεια, αντιστεκόμενη στις πιέσεις αντίδρασης του υλικού. Αυτό πρέπει να πραγματοποιηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια και τον βαθμό απομάκρυνσης του υλικού. Το παγκόσμιο σχέδιο για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την πιστοποίηση μίας εργαλειομηχανής συνοψίζεται στον Πίνακα 1.2 και περιγράφεται στις ακόλουθες υποενότητες, ωστόσο, όλα κρίνονται από τις απαιτήσεις του χρήστη.

**Πίνακας 1.2** – Τα βασικά βήματα στον σχεδιασμό και στην κατασκευή μίας εργαλειομηχανής απομάκρυνσης υλικού. Σχετίζονται οι είσοδοι και οι παράγοντες.

<p>Ορισμός απαιτήσεων Μέγεθος του επεξεργαζόμενου κομματιού Γεωμετρία του επεξεργαζόμενου κομματιού Βαθμός απομάκρυνσης Ακρίβεια Κινηματική συμπεριφορά Μέγεθος παρτίδας Τιμή Επιλογή του βασικού μηχανισμού Προσδιορισμός της βασικής κίνησης Προσδιορισμός της δομής -Διαμόρφωση</p> <p>Επίπεδη επιφάνεια Δομικά στοιχεία Επιλογή καθοδήγησης Προσδιορισμός συστημάτων κίνησης</p>	<p>Χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής και των συστημάτων της</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Μέγεθος μηχανής</li> <li>-Φραιζάρισμα ή τόρνος</li> <li>-Μηχανή φινιρίσματος</li> <li>-Συναρμολόγηση, θερμικές όψεις</li> <li>-Μάζες στοιχείων, δίσκοι</li> <li>-Συστήματα αυτοματισμού, ATC και APC</li> <li>-Ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής</li> <li>-Βαθμός ελευθερίας της μηχανής</li> <li>-Βασικός κινητήρας, περιστροφή εργαλείου</li> <li>-Ατσάλινος σκελετός</li> <li>-Χυτοσίδηρος, συμπαγές πολυμερές</li> <li>-Χυτοσίδηρος, ατσαλοσίδηρος, συμπαγές πολυμερές, συγκολλημένος χάλυβας</li> <li>-Τριβή, ρουλεμάν, υδροστατικό</li> <li>-Κινητήρες, βίδες, γραμμικοί κινητήρες, συζεύξεις</li> </ul>
<p>-Επιλογή και εφαρμογή του ελέγχου CNC Απαιτήσεις και επιλογή Προσαρμογή του CNC στην μηχανή Διεπιφάνεια χρηστών (usersinterface)</p> <p>-Προσδιορισμός ελέγχων του βρόχου Εκτόπισμα των συσκευών μέτρησης Έλεγχος κάθε άξονα</p> <p>-Βασική αυτοκίνηση από βοηθητικές λειτουργίες Αισθητήρες και είσοδοι/έξοδοι Προγραμματισμός PLC</p> <p>-Κατασκευή και συναρμολόγηση στοιχείων των μηχανών Έλεγχος και πιστοποίηση</p>	<p>Αριθμός αξόνων και περιπλοκότητα παρεμβολών Παράμετροι μηχανής, χτυπήματα αξόνων Προσαρμογή και διεπιφάνειες προσανατολισμένες για εφαρμογές</p> <p>Κανόνες μέτρησης και κωδικοποιητές Παράγοντας <math>K_v</math> και άλλες παράμετροι ελέγχου αξόνων</p> <p>Αυτοματοποιημένη αλλαγή εργαλείου ή εξαρτήματος Συστήματα ασφαλείας</p> <p>Ποιοτικοί έλεγχοι ISO, και έλεγχος κατεργασίας εξαρτημάτων</p>

### 1.2.1 Τεχνολογικές απαιτήσεις και απαιτήσεις του χειριστή/χρήστη

Εφαλτήριο για τους σχεδιαστές των εργαλειομηχανών, αποτελούν απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες οδηγούν στον ορισμό των βασικών χαρακτηριστικών των μηχανών, που περιγράφονται πάντα στους εμπορικούς καταλόγους της μηχανής. Οι χρήστες μπορεί να μην είναι συγκεκριμένοι πελάτες και να επιθυμούν απλού τύπου μηχανές, με κοινές απαιτήσεις, ή ιδιαίτεροι χειριστές με υψηλά προσδιορισμένες προδιαγραφές. Οι μικρές και μεσαίες μηχανές παράγονται συνήθως λαμβάνοντας υπόψη υποθετικούς πελάτες, αντιθέτως οι μεγάλες μηχανές υψηλών απαιτήσεων κατασκευάζονται κατόπιν σχεδιασμού και παραγγελίας. Σε κάθε περίπτωση, οι απαιτήσεις σχετίζονται με τα παρακάτω:

Το μέγιστο μέγεθος του τμήματος προς επεξεργασία: Ο χώρος εργασίας της μηχανής πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το κομμάτι επεξεργασίας.

Βασική γεωμετρία του επεξεργαζόμενου τμήματος: Το γενικό σχήμα του τμήματος είναι το σημείο κλειδί για την επιλογή ενός τύπου μηχανής. Αν το εξάρτημα είναι κυλινδρικό, ο τόρνος είναι το πρώτο μηχανήμα που θεωρείται. Αν είναι πρισματικό, ένα κέντρο φραιζαρίσματος μπορεί να είναι πιο ικανοποιητικό.

Η δεύτερη όψη της γεωμετρίας: είναι ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των λεπτομερειών. Αν τα χαρακτηριστικά και οι λεπτομέρειες είναι λίγες, δεν συνεισφέρουν στην αύξηση της πολυπλοκότητας της μηχανής που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Αντιθέτως, αν είναι πολλές και σύνθετες, η απαιτούμενη εργαλειομηχανή πρέπει να είναι δομικά πολύ πιο σύνθετη. Ένα παράδειγμα είναι πάλι τα κέντρα φραιζαρίσματος πέντε αξόνων, όπου δύο άξονες προσανατολισμού προστίθενται στην βασική καρτεσιανή μηχανή τριών αξόνων, κάνοντας δυνατή την επεξεργασία όλων των επιφανειών όλων των πολύπλοκων σχηματισμών σε μία διαμόρφωση. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι επίσης τα «κέντρα στροφών». Στην περίπτωση αυτή, οι φρέζες αναβαθμίζονται σε τόρνο για να εκτελέσουν λεπτομέρειες, όπως πολυγωνικές επιφάνειες ή κεκλιμένα επίπεδα στην ίδια διαμόρφωση.

Κλίμακα απομάκρυνσης του υλικού: Αναλόγως το είδος της παραγωγής, ζητούμενο είναι είτε η ακρίβεια, είτε σε άλλες περιπτώσεις η υψηλή παραγωγικότητα. Το πρώτο, αφορά στα «μηχανήματα φινιρίσματος», στα οποία η βασική κίνηση δεν απαιτεί υψηλή ροπή και ισχύ, ενώ το δεύτερο αφορά στις «μηχανές ξεχονδρίσματος» για εργασίες βαρέων καθηκόντων, με υψηλή ροπή και ισχυρό βασικό κινητήρα και άτρακτο. Οι λύσεις για ακρίβεια και παραγωγικότητα αντιτίθενται. Συνήθως οι χρήστες απαιτούν μία μηχανή κατάλληλη για πολλές εφαρμογές, απαιτώντας μία μηχανή «επαρκώς ακριβής» και «υψηλά παραγωγική», στην χαμηλότερη τιμή. Αυτό είναι το βασικό ζητούμενο για τις περισσότερες σημερινές μηχανές φραιζαρίσματος και τους τόρνους.

Ακρίβεια: Όταν πρόκειται για μηχανές εμπλέκει δύο έννοιες την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα. Η ακρίβεια είναι η ικανότητα κατασκευής με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση μεταξύ απαιτούμενου και τελικώς κατασκευαζόμενου αποτελέσματος. Αντιθέτως, η επαναληψιμότητα είναι η ικανότητα προσέγγισης της ίδιας τιμής-μεγέθους ξανά και ξανά. Συνεπώς μία μηχανή μπορεί να είναι επαναλαμβανόμενα ανακριβής σε κάποια ακραία περίπτωση, ή μη επαναλαμβανόμενα ακριβής σε κάποια άλλη.

Η ορθότητα και η ακρίβεια αποτελούν τους βασικούς στόχους των κατασκευαστών εργαλειομηχανών. Οι οδηγίες και οι μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό και τη συναρμολόγηση των μηχανών, η κατασκευή στοιχείων μηχανών, οι διαδικασίες ελέγχου και η χρήση βοηθητικών συστημάτων, διαμορφώνονται και εξελίσσονται βάσει της παραπάνω απαίτησης. Η υψηλή ακρίβεια είναι ιδιαιτέρως δαπανηρή απαιτεί την αναγνώριση, τον έλεγχο και την μείωση όλων των πηγών σφάλματος. Έτσι, για να επιτευχθεί ένα καθορισμένο σημείο ακρίβειας, απαιτείται μία προσεκτική μελέτη των παρακάτω:

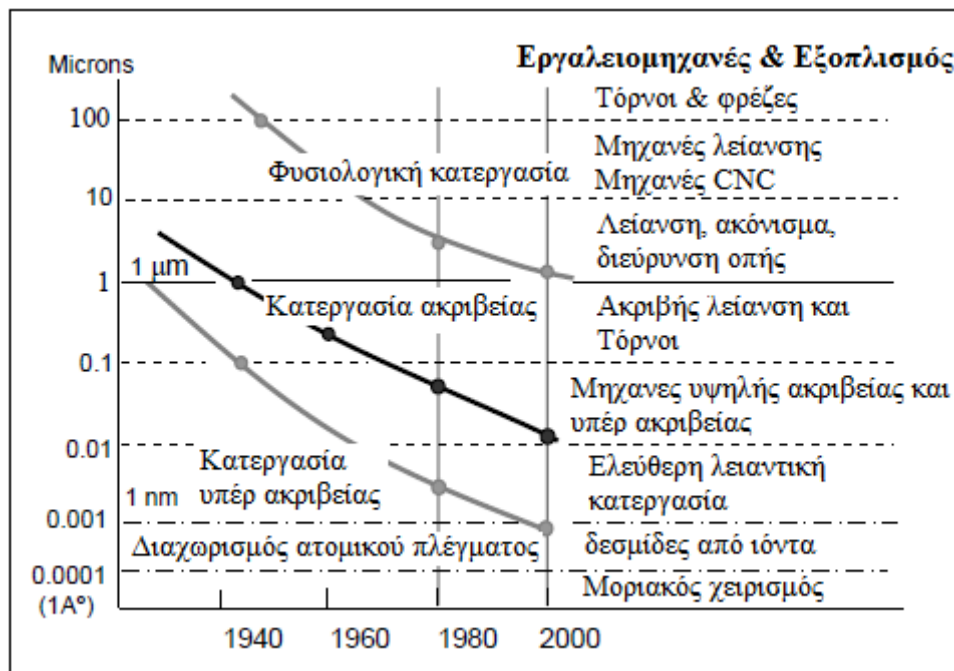
- Οι επιδράσεις των σφαλμάτων συναρμολόγησης των κινητών στοιχείων της μηχανής στην θέση του εργαλείου. Η συναρμολόγηση και οι μετρήσεις των σφαλμάτων μετά τη συναρμολόγηση, αποτελούν βασικές τεχνικές για την μείωσή τους.
- Η παραμόρφωση της δομής υπό την ενέργεια της κοπής και των δυνάμεων αδράνειας. Η υψηλή ακαμψία είναι πάντα επιθυμητή.
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος υπό την άσκηση των δυνάμεων κοπής, επειδή οι περισσότερες από τις λειτουργίες κατεργασίας παράγουν υψηλά μεταβλητές δυνάμεις.
- Οι επιδράσεις τριβής και των απότομων αντιδράσεων στους οδηγούς και στα συστήματα κίνησης.

Το απαραμόρφωτο αποτέλεσμα που σχετίζεται με τις πηγές θερμότητας. Στις εργαλειομηχανές υπάρχουν πέντε θερμές πηγές: η κύρια άτρακτος κινητήρα, οι κινητήρες δίσκων, η επεξεργασία, τα υλικά που απομακρύνονται και τελικά οι αλλαγές θερμοκρασίας του εργαστηρίου.

Ο έλεγχος τροχιάς του εργαλείου. Τα σφάλματα στο σχήμα και στις διαστάσεις του εξαρτήματος μπορεί να συμβούν αν είναι προγραμματισμένες πολύ γρήγορες αλλαγές κατεύθυνσης στην κίνηση του εργαλείου. Οι λειτουργίες εξομάλυνσης προσφέρονται για να μειώσουν αυτά τα σφάλματα από τα σύγχρονα CNC.

Μία πολύ επεξηγηματική σχήμα που αφορά στην ακρίβεια της κατεργασίας φαίνεται στο σχήμα 1.5, η ακρίβεια του 1μm επιτεύχθηκε για την συμβατική κατεργασία, ενώ η υπέρ-ακρίβεια του ενός εκατοστού του ενός μικρού επιτεύχθηκε σε μερικές περιπτώσεις. Προφανώς, αυτοί οι αριθμοί τοποθετούνται αναλογούν σε υψηλής ποιότητας, ακριβές μηχανές, ωστόσο αποτελούν καλή ένδειξη του τρέχοντος τεχνολογικού επιπέδου.

Απεικονίζεται μία σύγκριση με την μηχανή διεύρυνσης οπής από τον J. Wilkinson το 1775 «η οποία τρυπά με σφάλμα πυκνότητας ενός σεληνίου σε μία διάμετρο πηνήντα επτά ιντσών» (π.χ. 2,00μm), η οποία παρατέθηκε προηγουμένως στην ενότητα 1.1.1.



Σχήμα 1. 5 – Εξέλιξη της ακρίβειας των εργαλειομηχανών

Κινηματική συμπεριφορά (π.χ. ταχύτητα και επιτάχυνση). Αυτή η απαίτηση αφορά την ανάγκη για γρήγορη μηχανή «αδρανείς κινήσεις» μεταξύ διαδοχικών λειτουργιών κατεργασίας και για αλλαγή εργαλείων. Μερικές μηχανές κάνουν συνήθως λίγες αλλά μακροχρόνιες λειτουργίες σε σπάνια εξαρτήματα, ενώ άλλες κάνουν πολλές μικρές λειτουργίες σε κάθε επεξεργαζόμενο κομμάτι. Ένα παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης είναι το μεγάλο κέντρο φραιζαρίσματος για την σφράγιση και το φινίρισμα. Παραδείγματα της δεύτερης περίπτωσης είναι τα κέντρα φραιζαρίσματος για αυτοκινούμενα εξαρτήματα χυτού σιδήρου. Οι τελευταίες περιπτώσεις συναντώνται όπου οι γρήγορες κινήσεις αδράνειας προτείνονται έντονα.

Η επιτάχυνση δεν είναι μία άμεση απαίτηση του χρήστη; παρ' όλα αυτά θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη από τον μηχανικό όταν σχεδιάζει μία χωρική μηχανή, αφού όλες οι δυνάμεις αδράνειας σχετίζονται άμεσα στην επιτάχυνση από τον δεύτερο νόμο του Newton. Αυτή είναι μία σημαντική πλευρά στο φραιζάρισμα ανάγλυφης επιφάνειας, επειδή το εργαλείο αλλάζει συνεχώς τροχιά πάνω στις σύνθετες επιφάνειες; συνεπώς, η ευκινησία της μηχανής εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τις επιταχύνσεις των αξόνων. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί και για τις μηχανές αυτοκινούμενων στοιχείων, όπου το εργαλείο πρέπει να κινείται γρήγορα μεταξύ των πολλαπλών σημείων κατεργασίας.

Το μέγεθος της παρτίδας έχει μία επιρροή στο επίπεδο αυτοκίνησης των εργαλειομηχανών και στην χρήση των βοηθητικών συσκευών. Γενικά, μία γενική συσκευή CNC μπορεί να επεξεργαστεί μία ευρεία κλίμακα διαφορετικών κομματιών επεξεργασίας, μόνο κατεβάζοντας κάποιο άλλο πρόγραμμα CNC και με μερικές αλλαγές σε τμήματα των συσκευών συγκράτησης (δείτε παράδειγμα 1.10.6, αργότερα). Αντίθετα, μία γραμμή μεταφοράς (δείτε παράδειγμα 1.10.9) προσφέρει ένα ποσοστό υψηλής παραγωγής για κάποιο συγκεκριμένο εξάρτημα, αλλά χρειάζεται πολύ χρόνο για να υιοθετήσει σταθμούς και συστήματα μεταφοράς σε νέα εξαρτήματα. Ο όρος «σκληρός αυτοματισμός» αναφέρεται στην εγκατάσταση ειδικών συσκευών για τον χειρισμό και την κατεργασία συγκεκριμένων εξαρτημάτων, ενώ ο όρος «χαλαρός αυτοματισμός» αναφέρεται στην χρήση των μηχανών CNC με γενικά εξαρτήματα και αυτοματοποιημένη αλλαγή εργαλείου (στους καταλόγους μηχανών αυτό ορίζεται ως ATC) και αλλαγή εξαρτήματος (APC).

Τιμή. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής σε γραμμική αναλογία και ακρίβεια στην εκθετική σχέση. Σήμερα, η έννοια του «κόστους ζωής» συμπεριλαμβάνει όλα τα στάδια ζωής της μηχανής, π.χ., την αρχική επένδυση, το κόστος συντήρησης, τα πάγια έξοδα, και τα έξοδα ανάκτησης της μηχανής. Πολλές δυνατότητες χρήσης λογισμικού για μία σωστή ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής (LCC) είναι διαθέσιμες. Σήμερα, ο ίδιος ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των εργαλειομηχανών δεν είναι παράγοντας κλειδί; ωστόσο, εκείνος των διαδικασιών κατεργασίας λαμβάνεται υπόψη σε πολλά καινοτόμα έργα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι προαναφερθείσες απαιτήσεις οδηγούν σε έναν καθορισμό παραδοσιακών, κοινής λογικής λύσεων, επειδή όλες οι εφαρμογές μοιάζουν παρόμοιες με τις προηγούμενες. Αυτό ομοίως, κάνει τον σχεδιασμό μίας νέας μηχανής για μία «παραδοσιακή» εφαρμογή, εύκολο. Ωστόσο, όπως με άλλα προβλήματα μηχανισμών και μηχανών, οι νέες λύσεις ξεκινούν από τα θεμέλια, επανεξετάζοντας όλα τα σχεδιαστικά βήματα από το σημείο εκκίνησης π.χ., την θεώρηση των απαιτήσεων του χρήστη. Το γεγονός έγινε προφανές με την ανάπτυξη των μηχανών πολλαπλών εργασιών, όπως εκείνες που φαίνονται στο σχήμα 1.3.

Οι πρώτες μηχανές αυτού του τύπου (το 1990) ήταν τροποποιημένοι τόρνοι, με έναν επιπρόσθετο άξονα κεφαλής και έναν νέο άξονα Υ, ελεγχόμενης κίνησης, τοποθετημένο στην επικλινή επιφάνεια. Σήμερα, η δομή αυτών των μηχανών είναι απολύτως διαφορετική από τον κλασικό τόρνο. Με κάποιους τρόπους, μπορεί να ειπωθεί πως μία δεύτερη γενιά μηχανών πολλαπλών εργασιών έχει γεννηθεί τα τελευταία τέσσερα χρόνια, αρχίζοντας τον σχεδιασμό τους από τις απαιτήσεις του χρήστη, που πρέπει να συλληχθούν από τα τμήματα πωλήσεων της εταιρίας της μηχανής.

### 1.3. Ο Βασικός Μηχανισμός

Οι εργαλειομηχανές, είναι χωρικοί μηχανισμοί με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας (που ονομάζονται άξονες) με επαρκή χώρο εργασίας για να φιλοξενήσουν ή να μετακινήσουν το κομμάτι προς επεξεργασία. Η λειτουργία αυτού του μηχανισμού είναι η μετακίνηση είτε του εργαλείου ή του προς επεξεργασία τμήματος, η και των δύο ταυτόχρονα.

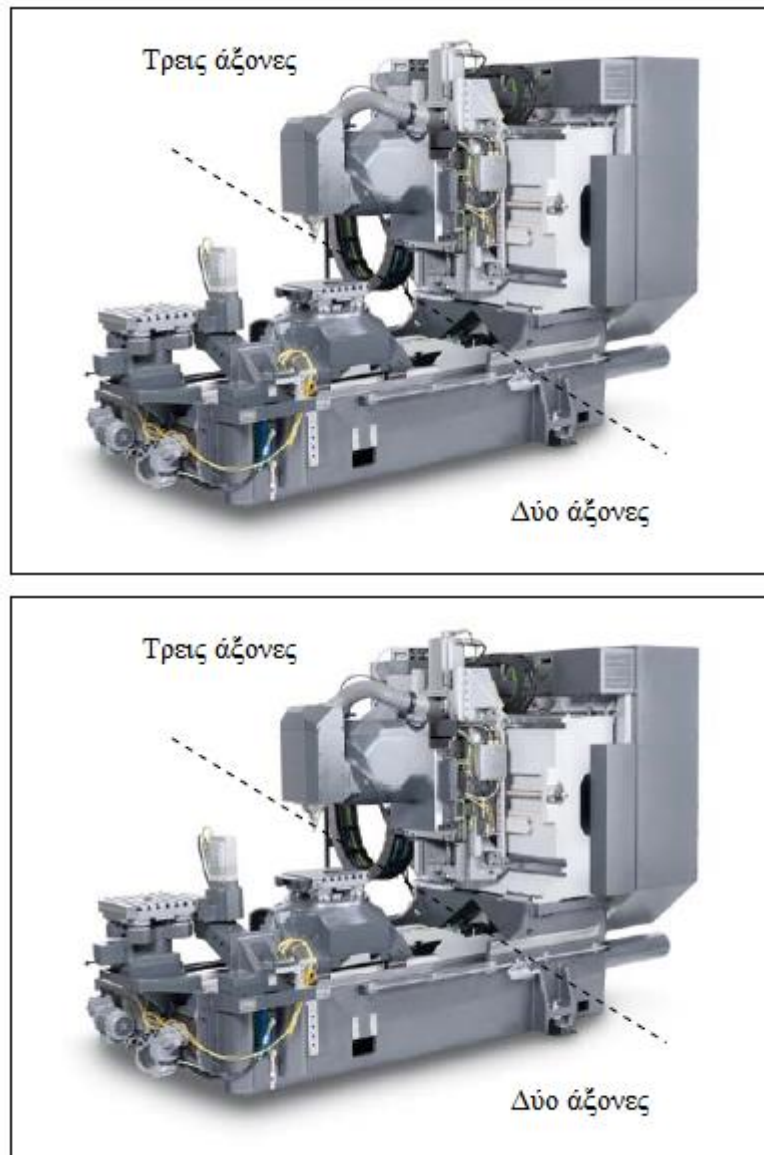
Μπορούν να προσδιοριστούν τρία συστήματα αναφοράς: 1. ένας παρατηρητής τοποθετημένος στο υπό επεξεργασία τμήμα (WRS, ή σύστημα αναφοράς τμήματος), 2. τοποθετημένος στην επιφάνεια της μηχανής (MRS, ή σύστημα αναφοράς της μηχανής) και τέλος, 3. τοποθετημένος στο άκρο του εργαλείου (TRS, ή σύστημα αναφοράς του εργαλείου). Και τα τρία είναι πολύ χρήσιμα. Συνεπώς, το πρώτο είναι εκεί όπου προσδιορίζονται και προγραμματίζονται όλες οι λειτουργίες κατεργασίας. Το δεύτερο είναι εκείνο που χρησιμοποιείται από έναν εξωτερικό παρατηρητή. Τέλος, το τελευταίο χρησιμοποιείται από τον έλεγχο της μηχανής για να μετακινήσει το άκρο του εργαλείου. Μία μετατροπή από το πρώτο στο τελευταίο πρέπει να εφαρμόζεται πάντα. Στις χειροκίνητες μηχανές, αυτός που το κάνει αυτό είναι ο χρήστης, ερμηνεύοντας τα σχέδια του προς επεξεργασία τμήματος, αλλά στις μηχανές CNC είναι αυτή η μηχανή ελέγχου, η οποία εκτελεί αυτή την λειτουργία, που είναι γνωστή ως λειτουργία παρεμβολής.

Η αναφορά της μηχανής είναι χρήσιμη για τον κατασκευαστή των εργαλειομηχανών, αφού καθορίζει ποιοι βαθμοί ελευθερίας σχετίζονται με τις κινήσεις των εργαλείων και ποιοι με τις κινήσεις του τμήματος προς επεξεργασία. Το σχήμα 1.6 δείχνει μία μηχανή DMG που ονομάζεται Duoblock λόγω της απαλλαγής των αξόνων της μηχανής και συνεπώς και των δύο βασικών υποδομών της μηχανής, των δύο αξόνων που επηρεάζουν το τμήμα προς επεξεργασία και των τριών που ενεργούν πάνω στο εργαλείο.

Τα ονόματα των βαθμών ελευθερίας της μηχανής προσδιορίζονται με σεβασμό στην βασική κίνηση που παρέχει ροπή και στην ισχύ για την απομάκρυνση του υλικού. Η ορολογία και οι θετικές και αρνητικές κατευθύνσεις των αξόνων προσδιορίζονται στο πρότυπο ISO 84:2001, που είναι ο άξονας Z, ο οποίος ταιριάζει με τον άξονα βασικής κίνησης.

Οι απαιτούμενες κινήσεις οδηγούν στις τυπικές κινηματικές λύσεις και στις διαμορφώσεις της μηχανής. Συνεπώς, για τα κυλινδρικά μέρη, η βάση είναι 2 μηχανισμοί DOF, που καταλήγουν στον τόρνο, ως την μηχανή που είναι να χρησιμοποιηθεί. Η κίνηση τριών αξόνων λύνεται με Καρτεσιανή διαμόρφωση, με τουλάχιστον δύο από τους άξονες τοποθετημένους σε σειρά. Σε μερικές περιπτώσεις, όλες οι κινήσεις εφαρμόζονται στο εργαλείο, άλλες διαιρούνται μεταξύ του εργαλείου και του προς επεξεργασία τμήματος, και στην πιο ιδιόρρυθμη περίπτωση όλες εφαρμόζονται στο τμήμα που πρόκειται να επεξεργαστεί.

Οι πέντε άξονες, όπως στην μηχανή που φαίνεται στο σχήμα 1.6, αποτελούν μία ευνοϊκότερη μηχανική λύση για το φραιζάρισμα, αφού επιτρέπει στο περιστροφικό εργαλείο, ένας κύλινδρος με πέντε βαθμούς ελευθερίας να κινηθεί σε οποιονδήποτε προσανατολισμό και θέση στον χώρο εργασίας. Με τον τρόπο αυτό, το εργαλείο φραιζαρίσματος μπορεί να τοποθετηθεί σε έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό με σεβασμό προς την επιφάνεια του κάθε επεξεργαζόμενου τμήματος. Αυτή είναι πραγματικά η καλύτερη λύση για το φραιζάρισμα, ενώ την ίδια στιγμή, έχει αυξηθεί η πολυπλοκότητα του μηχανισμού και ο έλεγχός του.



Σχήμα 1. 6 – Το DMG 60 UDublock, μία μηχανή RLLLR

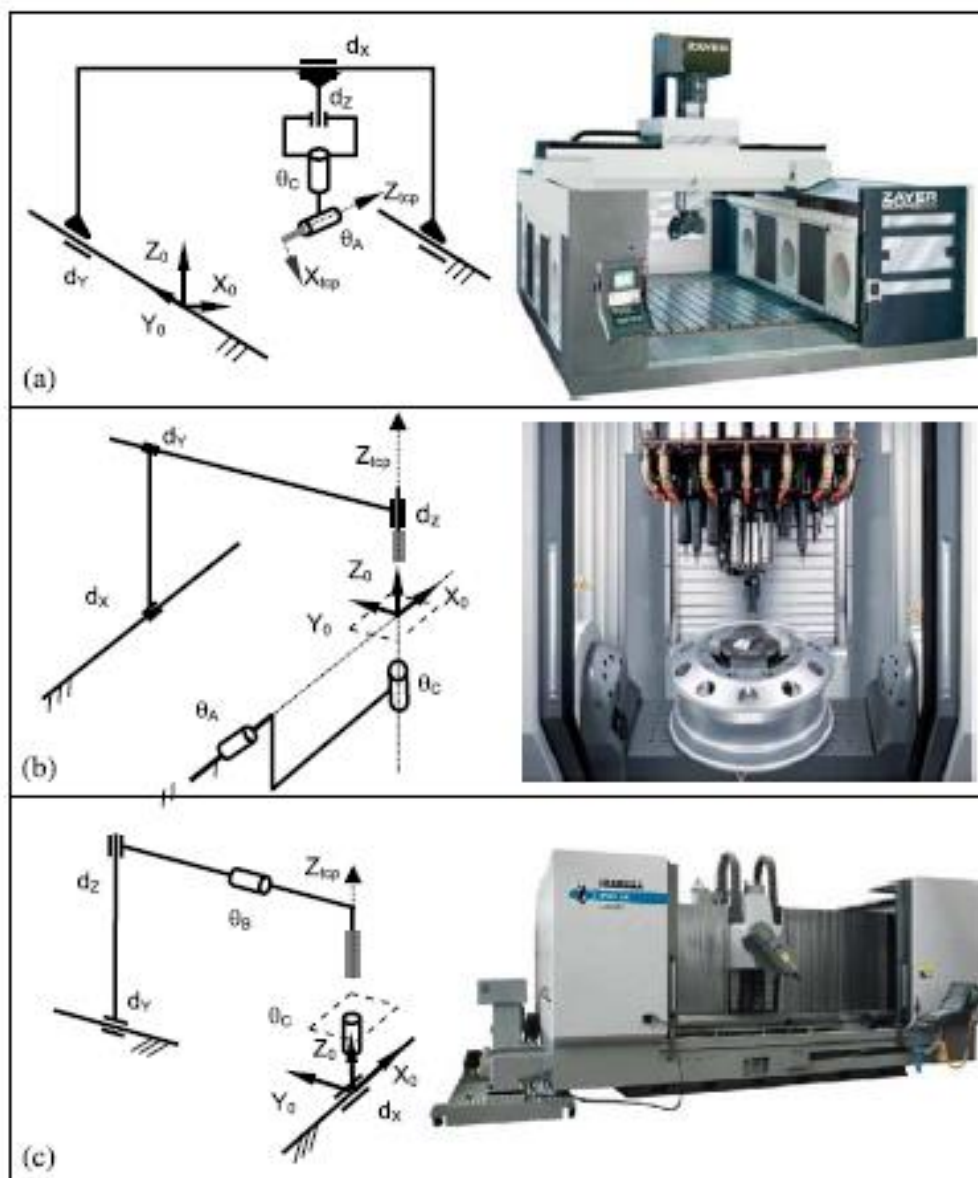
Τρεις διαμορφώσεις είναι κοινές στα κέντρα φραιζαρίσματος πέντε αξόνων; η κινηματική αλυσίδα πρόκειται να προσδιοριστεί ξεκινώντας από το επεξεργαζόμενο τμήμα ενάντια της άκρης του εργαλείου, όπου το L σημαίνει γραμμικός άξονας, και το R σημαίνει περιστροφικός άξονας. Συνεπώς, προσδιορίζονται τρεις τύποι στο σχήμα 1.7.

LLRR: Μία κεφαλή δύο περιστροφικών αξόνων, τοποθετείται στο τέλος του Καρτεσιανού μηχανισμού. Ο ένας άξονας περιστρέφει την κεφαλή, ενώ ο άλλος της δίνει κλίση. Από την άλλη, οι Καρτεσιανές κινήσεις μπορεί να παραχθούν είτε από το εργαλείο ή από την επίπεδη επιφάνεια της μηχανής (δείτε το διάγραμμα του σχήματος 1.7a, όπου η κίνηση είναι από το

εργαλείο). Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιείται σε εργαλειομηχανές με μεγάλο αστάλινο σκελετό, συνήθως σε μεγάλα καλούπια κατεργασίας.

**RRLLL:** Το επεξεργαζόμενο τμήμα υποστηρίζεται από μία επίπεδη επιφάνεια διπλής περιστροφής. Η μία περιστροφή είναι σαν λικνιζόμενη κίνηση, ενώ η άλλη γύρω από έναν άξονα, κάθετα στην πλάκα. Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιείται κοινώς σε μικρές συμπαγείς μηχανές, ή σε μηχανές τριών αξόνων που παρέχονται με συμπληρωματικές περιστρεφόμενες επίπεδες επιφάνειες. Οι τρεις μέσοι Καρτεσιανοί άξονες μπορούν να λυθούν από μία διαμόρφωση διανυσματικής στήλης, αλλά σε άλλες περιπτώσεις η λικνιζόμενη βάση παρέχεται με έναν γραμμικό βαθμό ελευθερίας.

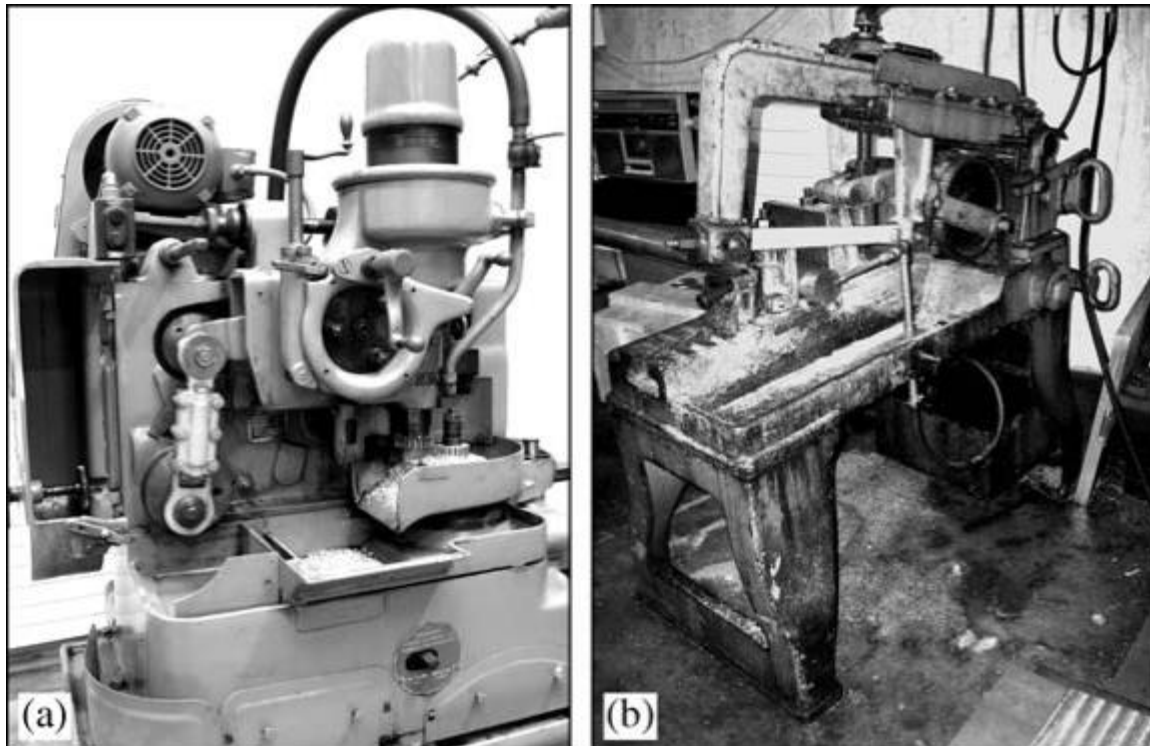
**RLLLR:** Το επεξεργαζόμενο τμήμα υποστηρίζεται από μία περιστροφική επίπεδη επιφάνεια και συγχρόνως μία περιστροφική κεφαλή παρέχει έναν άλλο περιστροφικό βαθμό ελευθερίας. Αυτές οι μηχανές πέντε αξόνων είναι πολύ κατάλληλες για ψηλά τμήματα προς επεξεργασία ή για κυλινδρικά τμήματα με αντικριστές πλάκες και περιμετρικές τρύπες.



Σχήμα 1. 7 – Τρεις μηχανισμοί για μία μηχανή φραιζαρίσματος πέντε αξόνων. (a) Μοντέλο LLLRR, (b) Μοντέλο RRLLL. (c) Μοντέλο RLLLR.

Οι σύγχρονες εργαλειομηχανές είναι πραγματικά πιο απλές στον σχεδιασμό από ότι ήταν πενήντα χρόνια πριν. Τότε, μόνο οι μηχανικές συσκευές ήταν διαθέσιμες για την αυτοματοποίηση των κινήσεων των μηχανών, ενώ τώρα ο σερβομηχανισμός των αξόνων των μηχανών είναι εύκολο να εφαρμοστεί και δεν είναι πολύ ακριβός. Για παράδειγμα, ο μηχανισμός του διαμορφωτή γραναζιών που φαίνεται στο σχήμα 1.8a, ενεργοποίησε όλες τις διαδικασίες κινήσεων να επιτευχθούν από έναν μονό ηλεκτρικό κινητήρα:

- Με μία κίνηση σμίλευσης του κόπτη γραναζιών, υπό τη μορφή μηχανισμού ολίσθησης-άρθρωσης.
- Η προς τα πίσω κίνηση του κόπτη γραναζιών, σε κάθε κάθετο χτύπημα από έναν αντιστρεπτό εμπλοκέα (σφιγκτήρα).
- Η κίνηση τροφοδοσίας κατά μήκος της παραγωγής γραναζιού.
- Τον έλεγχο του κύκλου.



Σχήμα 1. 8 – Δύο μηχανές όπου η κινηματική έλυσε όλες τις κινήσεις. (a) Σμιλευτής γραναζιών. (b) Σιδεροπρίονο

Στην περίπτωση αυτή, για να συγχρονιστούν όλες οι κινήσεις, χρησιμοποιήθηκαν ένα ολοκληρωμένο σύνολο από ανταλλάξιμα γρανάζια και ένας ιμάντας τοποθετημένος πάνω σε ανταλλάξιμες τροχαλίες. Ακόμη ένα παράδειγμα μίας πλήρους μηχανικής λύσης είναι το σιδεροπρίονο του σχήματος 1.8b, όπου βασική κίνηση του πριονιού και η τροφοδοσία εξασφαλίζονται από έναν μονό κινητήρα, χρησιμοποιώντας έναν επίπεδο μηχανισμό.

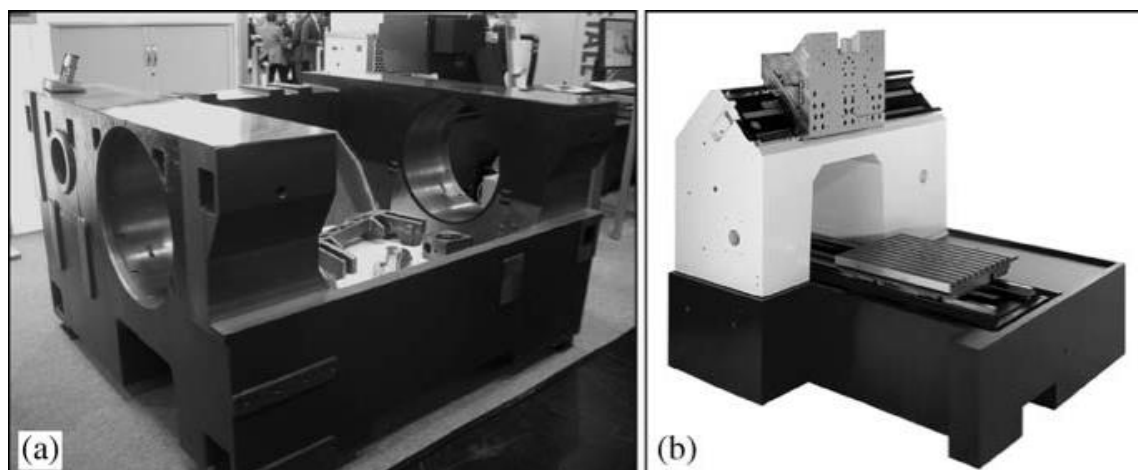
#### 1.4 Η Δομή του Μηχανισμού

Η δομή των εργαλειομηχανών πρέπει να κρατάει όλα τα στοιχεία των μηχανών και συγχρόνως να αντιστέκεται στις δυνάμεις που προέρχονται από την επεξεργασία, διατηρώντας αρκετή σκληρότητα ώστε να κρατά την απαιτούμενη ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, ένα υψηλό ποσοστό απόσβεσης και μία χαμηλή θερμική παραμόρφωση πρέπει να επιτυγχάνονται. Δύο βασικοί τύποι στοιχείων συμπεριλαμβάνονται στην δομή:

**Το πλαίσιο και η επίπεδη επιφάνεια.** Το κύριο σώμα της δομής αποτελεί το πλαίσιο της μηχανής. Μπορεί να δομηθεί μέσα σε ένα μεγάλο τμήμα υλικού ή συναρμολογώντας πολλά ξεχωριστά υπό-πλαίσια (βλ. [σχήμα 1.9](#)). Ένα σημαντικό στοιχείο είναι η οριζόντια επίπεδη επιφάνεια, όπου βασίζονται όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Είναι η συμπαγής βάση της μηχανής μετά την κατασκευή, που τοποθετείται στην βάση του συνεργείου χρησιμοποιώντας ένα είδος απομονωμένων υποστηριγμάτων.

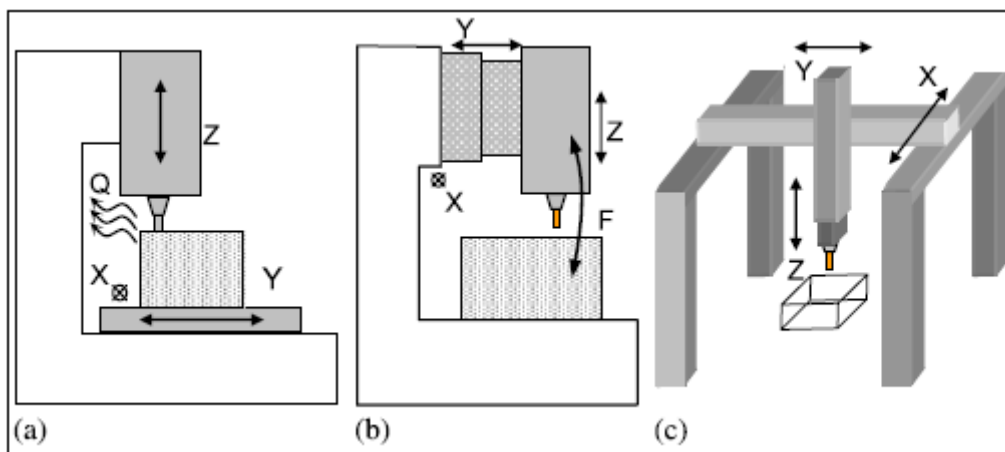
**Τα δομικά στοιχεία.** Αποτελούν τμήμα του μηχανισμού, όντας συνδεδεμένα με σχετική κίνηση μεταξύ τους. Η διεπιφάνεια αυτών των στοιχείων με την σχετική κίνηση πρέπει να είναι πολύ σκληρή και υγρή κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης, ώστε να γλιστράει ενώ επιτρέπει μία ήρεμη κίνηση κατά μήκος της.

Χρησιμοποιούνται δύο έννοιες σχεδιασμού της δομής, **οι διαμορφώσεις ανοιχτού βρόχου και κλειστού βρόχου**. Στην πρώτη περίπτωση οι δυνάμεις επεξεργασίας διεξάγονται στο έδαφος μέσω ενός μόνο δομικού τρόπου, ενώ στην κλειστή περίπτωση οι δυνάμεις απορρέουν από πολλούς τρόπους στο έδαφος. Προφανώς, στην πρώτη περίπτωση η δομή είναι πιο αδύναμη, επομένως ένα υψηλότερο σφάλμα που μετράται στην άκρη του εργαλείου παράγεται από την παραμόρφωση της μηχανής, χάρη στις δυνάμεις κοπής; στην δεύτερη περίπτωση, η σκληρότητα που μετράται στην άκρη του εργαλείου αυξάνει. Από την άλλη πλευρά, και για το ίδιο μέγεθος μηχανής, ο πρώτος τύπος προσφέρει συνήθως περισσότερο χώρο εργασίας και προσβασιμότητα, από ότι ο δεύτερος.



Σχήμα 1. 9 – Δομές μηχανών. (a) Οριζόντια επίπεδη επιφάνεια σε εύπλαστο σίδηρο από Alzmetall. (b) Δομή μηχανής από Roders.

Ο χαρακτηριστικός ανοιχτός βρόχος για τις μηχανές φραιζαρίσματος, είναι τα πλαίσια C ή G (γόνατο), που είναι πολύ κοινά στις μικρές μηχανές. Η πρόσβαση είναι εύκολη, αλλά αυτή η δομή είναι ευαίσθητη σε θερμικές και μηχανικές φορτίσεις (συστροφή και κάμψη) με ασύμμετρη απόκριση. Το πλαίσιο που προεξέχει παράγει σφάλματα Abbe στο τμήμα προς επεξεργασία (δείτε ενότητα 6.2.3). Στο [σχήμα 1.10](#) παρουσιάζονται δύο σχέδια. Συνεπώς, η περίπτωση (a) είναι η «σταθερή στήλη», που είναι πιο σκληρή αλλά επηρεάζεται από την θερμότητα που έρχεται την διαδικασία κατεργασίας, και μετακινώντας διαφορετικές μάζες, ανάλογα επίσης με το βάρος του επεξεργαζόμενου τμήματος. Η δεύτερη περίπτωση είναι «μετακινούμενη στήλη», λιγότερο σκληρή αλλά μετακινώντας την ίδια μάζα συνεχώς. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει στο εξάρτημα να εγκατασταθεί σε μία ζώνη, ενώ η επιπεδοποίηση εκτελείται στην άλλη, αν η οριζόντια επίπεδη επιφάνεια της μηχανής είναι αρκετά μακριά.



Σχήμα 1. 10—Τρία πλαίσια μηχανών. (α) Σταθερής στήλης πλαισίου-C. (β) Κάθετης στήλης πλαισίου-C. (γ) Ατσάλινου σκελετού με μετακινούμενη δέσμη, με όλες τις κινήσεις στο εργαλείο.

Με σεβασμό προς τα πλαίσια κλειστού βρόχου, η γέφυρα ή η δομή του ατσάλινου σκελετού χρησιμοποιούνται για μεσαίες και μεγάλες μηχανές, οι οποίες συνήθως εκτελούν εργασίες βαριών καθκόντων ή φινιρίσματος σε μεγάλα τμήματα. Σε μερικές περιπτώσεις, η γέφυρα είναι σταθερή και κινείται η επίπεδη επιφάνεια, σε άλλες το επεξεργαζόμενο τμήμα είναι σταθερό και όλες οι κινήσεις γίνονται από την γέφυρα ή από μία μετακινούμενη δέσμη, που είναι τοποθετημένη στην γέφυρα. (περίπτωση c στο σχήμα 1.10).

Σήμερα, υπάρχουν επίσης μερικές νέες αρχιτεκτονικές χρησιμοποιώντας παράλληλες κινηματικές, όπου η σκληρότητα, οι αρχές κινηματικής και δυναμικής είναι κάπως διαφορετικές. Σε αυτές τις μηχανές, η χρήση ισοστατικών δομών αποτρέπει την χωρική διαστροφή των σωμάτων της μηχανής. Το κεφάλαιο 10 είναι αφιερωμένο σε αυτόν τον τύπο μηχανών.

Για τους τόνους, οι δομές είναι ανοιχτού βρόχου για οριζόντια μοντέλα και κλειστού βρόχου για εκείνα που είναι κάθετα και τεράστια. Στους τόνους, οι δυνάμεις κοπής μεταφράζονται σε συστροφή της επίπεδης βάσης μέσω των οδηγών φορτίου. Για τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, οι οριζόντιοι τόννοι CNC είχαν επικλινείς επίπεδες βάσεις (επιφάνειες), στις οποίες ο περιστρεπτός πυργίσκος κινείται κατά μήκος; το γεγονός αυτό, κάνει εύκολο τον χειρισμό του εξαρτήματος και την εκκένωση του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Ωστόσο, πρόσφατα παρουσιάστηκαν κάποιες εξελίξεις με μία οριζόντια επίπεδη επιφάνεια, παραδοσιακή για την μηχανή των τόννων, και εμφανίστηκαν περιστροφικοί πυργίσκοι τοποθετημένοι κάτω από το προς επεξεργασία κομμάτι. (π.χ. η σειρά MoriSeikiNT δείτε 1.4b).

#### 1.4.1 Θεμέλια της Μηχανής

Όσον αφορά στα θεμέλια των εργαλειομηχανών, μερικές από αυτές είναι κρίσιμης υποστήριξης, ενώ άλλες όχι. Για μικρούς και μεσαίους τόνους και κέντρα κατεργασίας, τα ρουλεμάν απομόνωσης ή τα μεγάλα τμήματα υλικού, είναι συνήθως αρκετά για να μειώσουν την μετάδοση κραδασμών σε και από την εργαλειομηχανή. Αυτές οι υποστηρίξεις έχουν κάποιες απλές ρυθμίσεις του ύψους για να κάνουν την ευθυγράμμιση.

Όταν είναι επιθυμητή η απομόνωση κραδασμών σε μία εγκατάσταση κρίσιμης υποστήριξης, ένα σύστημα αδράνειας με θεμέλια μεγάλων τμημάτων, αποτελεί συχνά την καλύτερη λύση. Η μηχανή συνενώνεται με μία βάση σκυροδέματος από μπουλόνια αγκύρωσης, κοχλίες ή σφήνες ισοπέδωσης, για να ρυθμίσουν και να ευθυγραμμίσουν τα σώματα των μηχανών.

Αυτή είναι η περίπτωση όπου η επίπεδη επιφάνεια (τράπεζα) του επεξεργαζόμενου τμήματος ακουμπά στο έδαφος και η δομή της στήλης αποτελεί μία ξεχωριστή ομάδα που ακουμπά επίσης στο έδαφος. Μία άλλη περίπτωση αφορά τους τórνους με μακριά επίπεδη επιφάνεια (τράπεζα), με μετακινούμενη στήλη, όπου απαιτείται καλή ευθυγράμμιση.

#### **1.4.2 Δομικά Υλικά Στοιχείων**

Και η τράπεζα και τα δομικά στοιχεία, πρέπει να είναι σκληρά, ελαφριά και εύκολα στην κατασκευή. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, τέσσερις ομάδες υλικών χρησιμοποιούνται κυρίως στις δομές των μηχανών:

Ο γκρι χυτοσίδηρος είναι το πιο κοινό υλικό λόγω της σταθερότητάς του, του ότι χύνεται εύκολα, του υψηλού ποσοστού απόσβεσης, της ολισθηρότητας του και της οικονομίας στην κατεργασία. Ο μαλακός χυτοσίδηρος μπορεί να είναι μία επιλογή αύξησης της σκληρότητας μερικών στοιχείων. Το χυτό ατσάλι χρησιμοποιείται στα τμήματα τórνου με κεφαλή.

Τα συγκολλημένα πλαίσια χρησιμοποιούνται σε μεγάλες μηχανές λόγω των συνηθισμένων προβλημάτων χύτευσης των μεγάλων στοιχείων, ή όταν απαιτείται μικρός χρόνος παραγωγής. Το βασικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη απόσβεσης. Κάποιες λύσεις χρησιμοποιούν γεμίσματα, όπως με άμμο ή με πολυμερή, για να βελτιώσουν την απόσβεση και εξασθενήσουν τις δονήσεις. Άλλα προβλήματα πηγάζουν από τις παραμένουσες πιέσεις και στρεβλώσεις, τυπικές στις συγκολλήσεις και της μη ομογενοποιημένης συμπεριφοράς συγκόλλησης των ραφών (ενώσεων).

Τα συμπαγή πολυμερή, επίσης γνωστά και ως «χύτευση μετάλλων», υπήρξε το αντικείμενο πολλών ερευνών τα τελευταία χρόνια. Τώρα χρησιμοποιείται σε μερικούς τórνους ή στις επίπεδες επιφάνειες βάσης των φρεζών. Το θετικό χαρακτηριστικό είναι η υψηλή τους απόσβεση, αλλά το βασικό τους μειονέκτημα είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτό το υλικό μπορεί να ενισχύσει τον χυτοσίδηρο, για παράδειγμα, στη σειρά τórνων της QuestbyHardingInc. Μία άλλη εταιρία είναι η PolycretebyClevelandPolymer, ένα υλικό που σχηματοποιείται συνδυάζοντας μείγμα χαλαζία, ένα σύστημα εποξικής κόλας υψηλής δύναμης συγκόλλησης και επιλεκτικά πρόσθετα.

Ο γρανίτης χρησιμοποιείται από μερικούς κατασκευαστές ειδικών τórνων, λειαντήρες και άλλες μηχανές υψηλής ακρίβειας, για παράδειγμα για γυάλισμα γυαλιού.

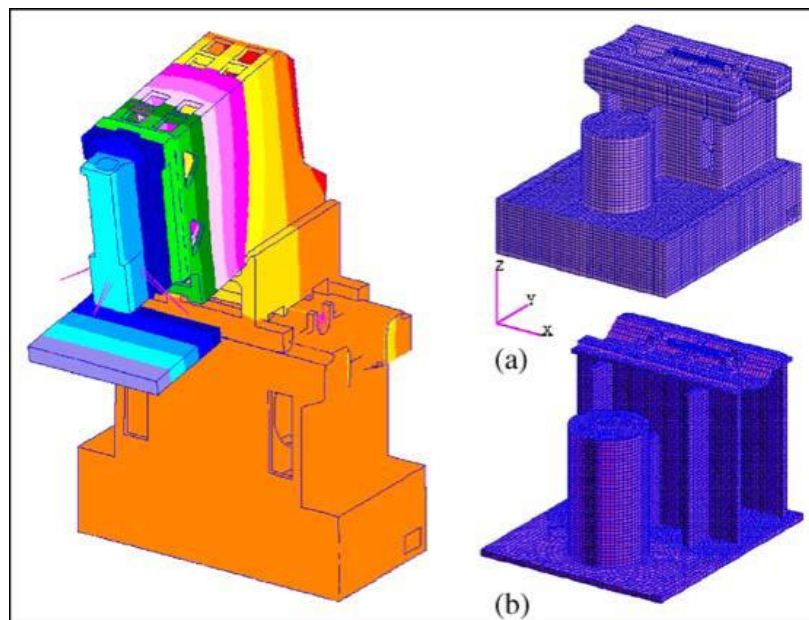
#### **1.4.3 Δομική Ανάλυση**

Η ανάλυση παρουσιάζει τρία στάδια, την ανάλυση αντοχής της δομής να αντιστέκεται στις στατικές δυνάμεις, την ανάλυση των φυσικών συχνотήτων, και τέλος στην δυναμική ανάλυση της μηχανής με σεβασμό στην διαδικασία κοπής.

Η δομική συμπεριφορά κάτω από στατικά φορτία ή φορτία αδράνειας εκτελούνται σήμερα με την μέθοδο του πεπερασμένου στοιχείου (δείτε Ενότητα 2.3.2). Αν και οι δυνάμεις κοπής είναι μεταβλητές, και στο όρισμα και στην κατεύθυνση, οι μέγιστες τιμές μπορεί να θεωρηθούν ως είσοδοι για το τρισδιάστατο μοντέλο. Η δομή των ισοδύναμων εντάσεων και παραμορφώσεων χαρτογραφούνται ως ένα αποτέλεσμα της ανάλυσης (σχήμα 1.11), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχεδιάσουν εκ νέου τα δομικά στοιχεία. Σήμερα, ακόμη και τα πιο απλά πακέτα λογισμικού μπορούν να εκτελέσουν μία καλή ανάλυση. Στην μέθοδο FEM, ο προσδιορισμός της πιο δύσκολης όψης σχετίζεται με τις

επαφές μεταξύ των δομικών στοιχείων κατά μήκος του DOF, όπου η ακαμψία, η απόσβεση, οι απότομες αντιδράσεις και άλλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, είναι δύσκολο να αποτιμηθούν.

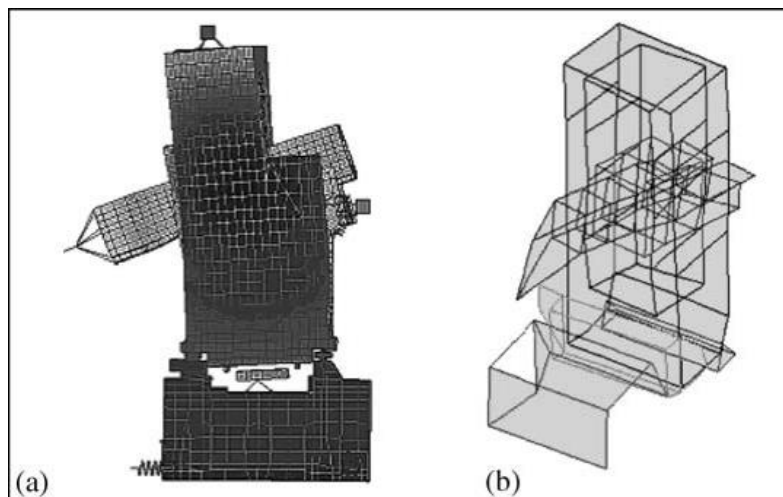
Τυπικές τιμές ακαμψίας της μηχανής, που μετρήθηκαν ως το εκτόπισμα της άκρης της ατράκτου με σεβασμό προς την επίπεδη επιφάνεια της μηχανής λόγω της δυναμικής δράσης, είναι όπως ακολούθως. Για ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας, οι τιμές ακαμψίας που είναι περίπου 62N/μμ στον X, 33N/μμ στον Y και 67N/μμ στον Z, υπολογίζονται στο [7]. Σε άλλη περίπτωση, σε μία μηχανή φραιζαρίσματος μετακινούμενης στήλης, η πειραματική ακαμψία είναι 16N/μμ στον άξονα X, 40N/μμ στον άξονα Y και 93.7N/μμ στον άξονα Z. Άλλες τιμές για μηχανές τριών αξόνων κυμαίνονται μεταξύ 15-25N/μμ στον άξονα X και Y και 70-100N/μμ στον άξονα Z, ο Z είναι πάντα ο πιο άκαμπτος στις φρέζες. Με σεβασμό προς τους λειαντήρες, οι εξωτερικοί κυλινδρικοί είναι περίπου στα 50-60N/μμ της κλίμακας ακαμψίας, η ευκαμψία που κυρίως έρχεται από την εγκατάσταση μεταξύ των σημείων (τοποθετημένη πάνω στο τμήμα της κεφαλής και στο τμήμα της ουράς) όπου υποστηρίζεται το εξάρτημα.



Σχήμα 1. 11 – Παραμόρφωση μίας μηχανής ηλεκτρο-φόρτισης, υπολογισμένη από FEM. Η μέγιστη παραμόρφωση είναι 12μm όταν κρατά ένα βαρύ ηλεκτρόδιο. (a) Πρότερο σχέδιο. (b) Βελτιωμένη περίπτωση.

Με μερικές μεταβολές που εξαρτώνται από τον τύπο της εργαλειομηχανής, οι πηγές ευκαμψίας είναι: το εργαλείο, η στήλη, η άτρακτος (άξονας) και η διεπιφάνεια συγκράτησης της επιφάνειας, τα φορτία των αξόνων και οι ράγες και η οριζόντια επίπεδη επιφάνεια.

Η ανάλυση των φυσικών τύπων και των συχνοτήτων είναι εύκολο να εκτελεστούν, αλλά δύσκολο να προσαρμοστούν στην πραγματικότητα. Στα μοντέλα πεπερασμένου στοιχείου, η απόσβεση είναι πάντα μία είσοδος, έτσι πρέπει να συμπεριλαμβάνεται ως μία στρογγυλοποιημένη τιμή. Ωστόσο, στις πραγματικές μηχανές, η απόσβεση έρχεται κυρίως από την επαφή στους οδηγούς, όπου τα ρουλεμάν στην μία περίπτωση ή οι τρόποι ολίσθησης της τριβής στην άλλη, περικλείουν αβεβαιότητα στο μοντέλο. Από την άλλη μεριά, μία προσεκτική πειραματική ανάλυση μπορεί να μετρήσει τις φυσικές συχνότητες μιας πραγματικής μηχανής που έχει μόλις κατασκευαστεί με επαρκή ακρίβεια, και συγχρόνως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αναβάθμιση του μοντέλου FEM που χρησιμοποιήθηκε στο σχέδιο; ωστόσο, το τελευταίο χρησιμοποιείται πλέον μόνο από ερευνητικά κέντρα.

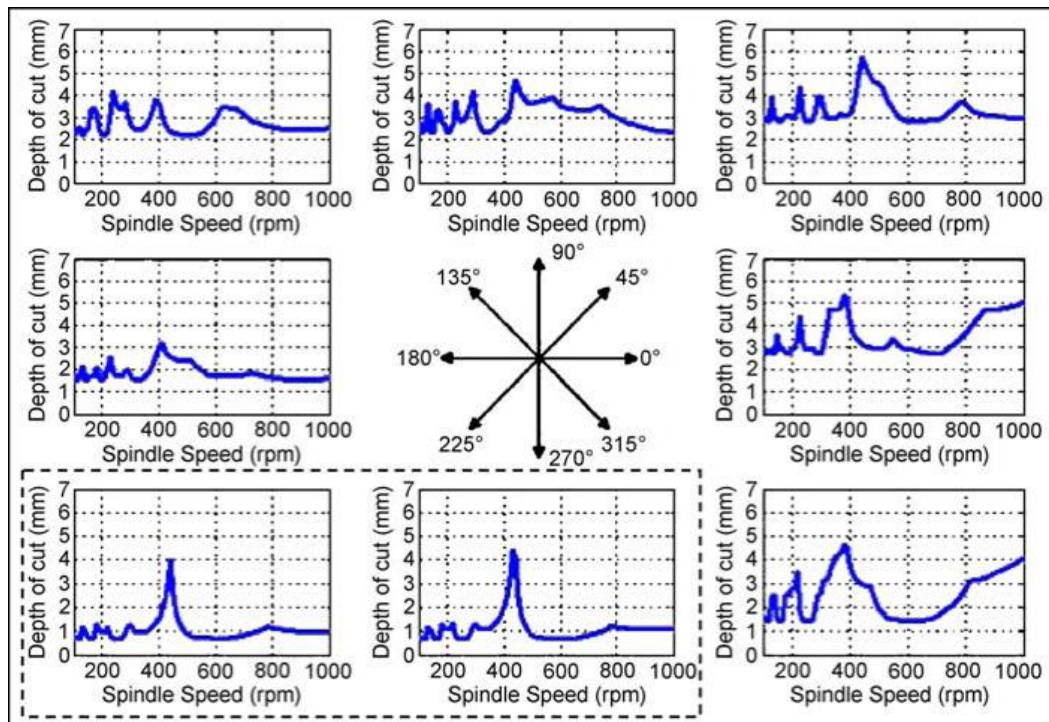


Σχήμα 1. 12 – Ανάλυση μίας μηχανής φραιζαρίσματος οριζόντιας στήλης. (a) Ανάλυση πεπερασμένου στοιχείου (τύπος των 80Hz). (b) Πειραματική ανάλυση (τύπος των 33Hz)

Η θερμική ανάλυση είναι ένα κλασικό αλλά ακόμη «καυτό» θέμα έρευνας. Η συνηθισμένη διαδικασία είναι η χρησιμοποίηση των θερμαντικών ικανοτήτων των πακέτων FEM, συμπεριλαμβάνοντας μερικές υποθέσεις που αφορούν στις μέγιστες πηγές θερμότητας, ως εισόδους. Μερικές αλλαγές στο σχέδιο θα μπορούσαν να προκύψουν από αυτή την ανάλυση.

Μετά τη συναρμολόγηση της μηχανής, το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι να ελεγχθεί η πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, που σχηματίζεται από την μηχανή και το εργαλείο, με ένα έλεγχο δουλεύοντας κάτω από δυσμενείς συνθήκες. Μετά, μπορούν να συμβούν δύο προβλήματα δόνησεων. Το πρώτο είναι η βεβαιωμένη δομική δόνηση, κάτω από την δράση των περιοδικών δυνάμεων κοπής. Αυτό είναι ένα πρόβλημα κοινό σε όλα τα μηχανικά συστήματα, που μελετώνται χρησιμοποιώντας την μέθοδο FRF. Για να αποτρέψουμε τον συντονισμό (αντήρηση), οι φυσικές συχνότητες του συστήματος πρέπει να είναι μακριά από τις συχνότητες ισχύος, οι οποίες μπορεί να γίνουν από την διακύμανση της ακαμψίας ή της μάζας των στοιχείων της μηχανής.

Επιπλέον, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο που είναι γνωστό ως «αναγεννητική δόνηση». Το Κεφάλαιο 3 εξηγεί την βάση του, λόγω της σχέσης του με τις δονήσεις της ατράκτου και την φθορά. Με σεβασμό προς την μηχανή, μπορεί να συμβεί διέγερση των δομικών τύπων της μηχανής, όταν οι συνθήκες κατεργασίας είναι αρκετά επιθετικές. Τότε, οι χαμηλής συχνότητας δονήσεις επηρεάζουν τη ζωή της μηχανής και εμφανίζεται τραχύτητα στο επεξεργαζόμενο τμήμα. Για να μελετηθεί αυτή η ζημιογόνα περίπτωση, αφού επιλυθεί ένα μοντέλο που βασίζεται σε μία διαφορική εξίσωση δεύτερου βαθμού, αποκτώνται τα λεγόμενα «διαγράμματα λοβού». Σε αυτά, η ταχύτητα της ατράκτου (άξονα) αναφέρεται στις τετμημένες συνιστώσες και στο βάθος της κοπής στον άξονα Y, δείχνοντας την οριογραμμή μεταξύ σταθερών και μη-σταθερών περιπτώσεων (π.χ. όπου εμφανίζονται αναγεννητικές δονήσεις).



Σχήμα 1. 13 – Διαγράμματα λοβού για μία θέση της μηχανής φραιζαρίσματος, κατά μήκος πολλών κατευθύνσεων τροφοδοσίας.

Ένα παράδειγμα περιγράφεται στο [σχήμα 1.13](#). Στο διακεκομμένο τετράγωνο αυτού του σχήματος, υπάρχουν δύο πιο περιοριστικές κατευθύνσεις. Κατά μήκος τους, ένα βάθος του άξονα κοπής μικρότερο του 1mm πρέπει να εφαρμοστεί, ώστε να αποφευχθεί η αναγεννητική δόμηση.

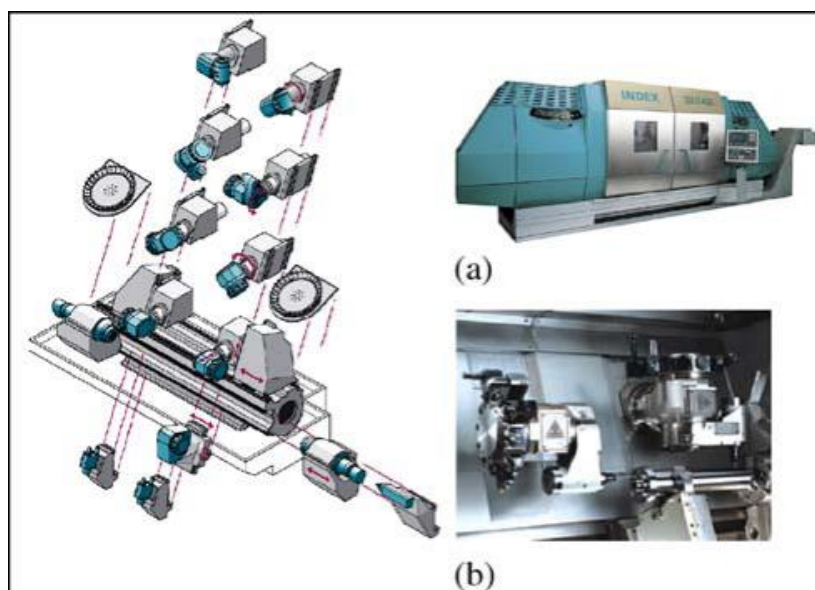
#### 1.4.4 Συναρμολογησιμότητα

Οι μηχανές πρέπει να προσαρμόζονται για την επιτυχία στην υψηλά ανταγωνιστική παγκόσμια αγορά, αλλά με μικρούς χρόνους παραγωγής και μειωμένο κόστος. Αυτοί οι παράγοντες έχουν οδηγήσει σε μία τακτική σχεδιασμού που βασίζεται σε διαφορετικές λειτουργικές μονάδες μηχανών, που είναι τοποθετημένες σε μία κοινή επίπεδη επιφάνεια. Τρία κύρια πλεονεκτήματα επιτυγχάνονται με αυτό:

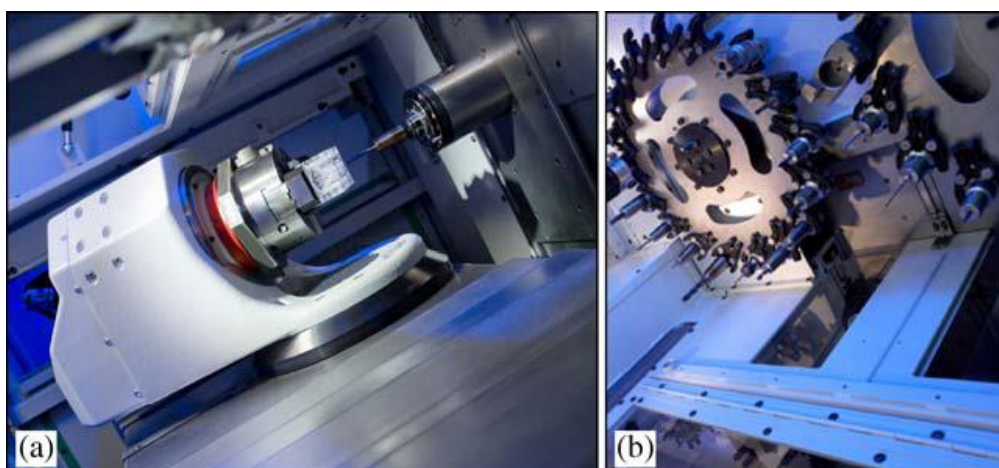
Οι επιφάνειες αυτές, για πολλά μοντέλα μηχανών, παράγονται χρησιμοποιώντας το ίδιο πολυστυρένιο μοντέλο και κάνοντας κατάλληλη χρήση κάθε χύτευσης σιδήρου. Το άμεσο πλεονέκτημα, μία καλύτερη τιμή, αποκτάται από τα χυτήρια.

Μερικές εταιρίες υπεργολαβίας φτάνουν επίπεδα υψηλής εξειδίκευσης, παράγοντας στοιχεία και μονάδες που μπορούν να εγκατασταθούν σε διαφορετικές μηχανές και για διαφορετικούς κατασκευαστές μηχανών, όπως περιστροφικές κεφαλές, μετατροπείς εργαλείων, τράπεζες κλπ.

Η επεξεργασία των προσφορών για τους πελάτες σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου μπορεί να εξορθολογιστεί, με καλή παραμετροποίηση στις απαιτήσεις του χρήστη, αλλά την ίδια στιγμή, αποφεύγοντας την ειδική μηχανική για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 1. 14 – Συναρμολογησιμότητα του τóρνου G400, από την Index. (a) Μηχανή. (b) Λεπτομέρειες λειτουργίας.



Σχήμα 1. 15 – (a) Μονάδα με δύο περιστροφικούς άξονες B και C της μηχανής μεταφοράς MultistepXT-200, της εταιρίας Mikron. (b) Επιλογή πολλαπλών αξόνων.

Τα δύο πρότερα σημεία είναι πολύ ενδιαφέροντα για τις μικρές και μεσαίες εταιρίες, των οποίων ο βασικός ανταγωνιστικός παράγοντας είναι η εγγύτητα και η υιοθέτηση της μηχανής σε έναν συγκεκριμένο πελάτη, όπου ο τελευταίος δείχνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μεγάλους παραγωγούς μηχανών καθιερωμένου τύπου.

Στο σχήμα 1.14 φαίνεται η συναρμολογησιμότητα τη οικογένειας τóρνου Index. Πολλές επιλογές μπορούν να εφαρμοστούν πάνω στην ίδια οριζόντια, επίπεδη επιφάνεια, όπως δύο περιστροφικοί πυργίσκοι, κεφαλές φραιζαρίσματος και διαφορετικοί τύποι εξαρτήματος συγκράτησης της ακίδας του τóρνου.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η μονάδα κατεργασίας με δύο περιστροφικούς άξονες που φαίνεται στο σχήμα 1.15a, από την Mikron. Αυτό μπορεί να τοποθετηθεί στις μηχανές μεταφοράς, όπου 5 πλευρές από εξαρτήματα 200x 200 x 200mm μπορεί να είναι επιπεδοποιημένες, διάτρητες, σπειροειδείς, οδοντωτές ή σκαλιστές. Επιπλέον, η ιδέα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την μηχανή, την Multi-stepXT-200, βασίζεται στις λειτουργικές μονάδες ξεχωριστών αξόνων. Μπορεί να χρησιμοποιούνται είτε σε αυτόνομη κατάσταση ή με επέκταση μέχρι τεσσάρων λειτουργικών μονάδων.

## 1.5 Οδηγοί

Οι οδηγοί είναι άμεσα υπεύθυνοι για την ακρίβεια και την ηρεμία των κινήσεων των αξόνων της μηχανής. Οι οδηγοί είναι συστήματα ολίσθησης όπου δύο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή; η σταθερή είναι γνωστή ως ο «οδηγός» (guide), ενώ εκείνη που βρίσκεται στο στοιχείο ολίσθησης (φορτίο), είναι γνωστή ως «counterguide». Οι απαιτούμενες λειτουργικές παράμετροι για τους επιμήκεις οδηγούς είναι οι παρακάτω:

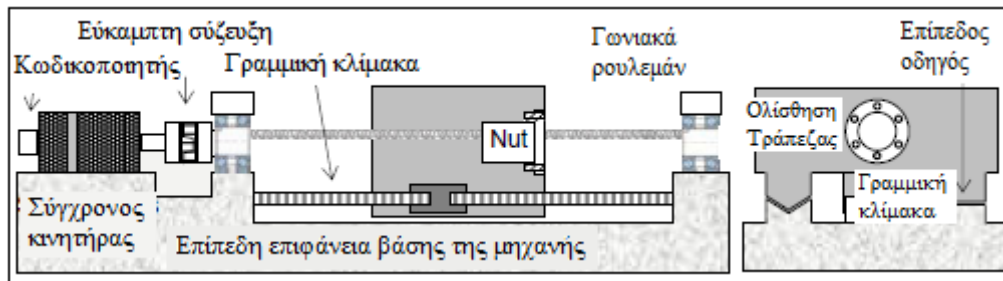
- Γεωμετρική τελειότητα, αφού κάθε ελάττωμα σε έναν οδηγό θα ερμηνευτεί ως ανακρίβεια του τμήματος.
- Ακαμψία, αφού οι οδηγοί πρέπει να αντέχουν τις δυνάμεις κοπής και τα φορτία αδράνειας χωρίς παραμορφώσεις. Αλλά κάποια παραμόρφωση είναι αναπόφευκτη και αν συμβεί, μία σταθερή τιμή παραμόρφωσης ή μία συμμετρική συμπεριφορά με σεβασμό προς το μήκος του οδηγού, είναι άκρως προτεινόμενη.
- Αντίσταση στην φθορά και καλά χαρακτηριστικά τριβής, με σεβασμό στην επιφάνεια counterguide, και των κυλινδρικών στοιχείων. Το σφίξιμο των τμημάτων ολίσθησης πάνω στους οδηγούς, είτε λόγω της χαμηλής λίπανσης ή μίας γεωμετρικής στρέβλωσης που προέρχεται από την θερμική τριβή, πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν σχεδιάζονται οι οδηγοί.
- Αρκετή ακαμψία για να αντέξει μικρές επιδράσεις που προέρχονται από την διαδικασία κατεργασίας, ειδικά στην περίπτωση υψηλά διακοπτόμενης κοπής.

Και για τους counterguides, οι επιπρόσθετες απαιτήσεις είναι οι παρακάτω:

- Προσαρμογή στους οδηγούς με αρκετή γεωμετρική ελαστικότητα. Για να επιτευχθεί αυτό, συνήθως ο οδηγός είναι σκληρός αλλά ο counterguide είναι πιο μαλακός ή πιο εύκαμπτος.
- Πρέπει να θεωρηθεί ένα σύστημα γρήγορης εκκίνησης των εφαρμογών (preload), για εξασφάλιση ακριβούς επαφή με τον οδηγό. Αυτό αποτελεί ένα στοιχείο κλειδί για να εφοδιάσει τον οδηγό με διάρκεια ζωής.
- Το ζευγάρι guide-counterguide πρέπει να παρέχει όσο το δυνατόν υψηλή απόσβεση, για να μειώσει την μετάδοση δονήσεων.
- Το πιο σημαντικό, είναι η ηρεμία των κινήσεων του κατά μήκος του οδηγού. Η αντίσταση στην ολίσθηση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλή.
- Τα κινητά στοιχεία των μηχανών είναι 6 βαθμών ελευθερίας (6DOF), έτσι, οι μηχανικές συνενώσεις πρέπει να περιορίζουν πέντε από αυτές, ενώ θα επιτρέπουν την μία επιθυμητή, μία περιστροφή στην περίπτωση ρουλεμάν ή μακροχρόνιας κίνησης.

Συνήθως οι οδηγοί μεταξύ των δομικών στοιχείων τοποθετούνται σε παράλληλα ζεύγη, διαχωρισμένοι επαρκώς, ώστε να παρέχουν την σωστή υποστήριξη του ενός στοιχείου με το άλλο. Η έννοια της χρήσης κινηματικής σύζευξης, που εξηγείται στο Κεφάλαιο 6, είναι ο βασικός στόχος σχεδιασμού. Για μηχανές ακριβείας, η σύζευξη σχήματος V και ο επίπεδος οδηγός χρησιμοποιούνται συχνά (δείτε το παράδειγμα στο [σχήμα 1.16](#)), αλλά για συμβατικές μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως δύο παράλληλοι επίπεδοι οδηγοί, μεταξύ της επίπεδης οριζόντιας επιφάνειας (bed) και του φορτίου (δείτε Σχήμα 1.9b), αποτρέποντας τους υπέρ-στατικούς περιορισμούς όταν γίνεται η εγκατάσταση. Συνήθως, ένας οδηγός είναι ο κυρίαρχος στην συναρμολόγηση των στοιχείων. όπου ο άλλος προσαρμόζεται στην τελική θέση.

Στην περίπτωση των περιστροφικών ενώσεων, τα ρουλεμάν είναι η συνήθης λύση. Τα υδροστατικά ρουλεμάν χρησιμοποιούνται μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές στους λειαντήρες ή στις περιστροφικές τράπεζες. Τα υδροδυναμικά ρουλεμάν χρησιμοποιούνται μόνο στον άξονα του τροχού των λειαντήρων, επειδή είναι προβληματική η εκκίνηση. Για μακροχρόνιες κινήσεις, οι τρεις βασικοί τύποι οδηγών που χρησιμοποιούνται σήμερα για διαδικασίες απομάκρυνσης υλικών, εξηγούνται παρακάτω (δείτε επίσης την ενότητα 4.6).



Σχήμα 1. 16–Το βασικό τρένο οδήγησης, με πλευρικές και μπροστινές όψεις.

### 1.5.1 Οδηγοί με Περιορισμένη Λίπανση

Σε αυτό τον τύπο, ένα φιλμ λαδιού, με πάχος μερικές εκατοντάδες του χιλιοστού μεταξύ guide και counterguide, μειώνει σε τεράστιο βαθμό την επαφή μεταξύ των επιφανειών. Αν και η επαφή μεταξύ των κορυφών ακαμψίας δεν μπορούν να αποφευχθούν τελείως, επιτυγχάνεται η μείωση του συντελεστή τριβής. Το λάδι πρέπει να ψεκαστεί περιοδικά μέσα στο counterguide για να εξασφαλιστεί πως έχει επιτευχθεί το λειτουργικό αυτό σύστημα. Την ίδια στιγμή, το counterguide έχει μερικά μικρά κανάλια στην εσωτερική επιφάνεια επαφής του, που ονομάζονται βραχίονες της αράχνης, για να παράγουν ομοιόμορφη τροφοδοσία λαδιού σε ολόκληρη την επιφάνεια επαφής.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του κλασικού τύπου οδήγησης, είναι το υψηλό ποσοστό απόσβεσης. Ως βασικό μειονέκτημα, η τριβή είναι πολύ υψηλή σε υψηλές ταχύτητες, και η θερμότητα τριβής μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και ακόμη και τον χρόνο ζωής του οδηγού. Το φαινόμενο κολλήματος και ολίσθησης συμβαίνει επίσης σε χαμηλές ταχύτητες.

Οι οδηγοί μπορούν να κατεργαστούν και να λειανθούν απευθείας πάνω στο υλικό δόμησης, ή να χτιστούν πάνω σε σκληρό ατσάλι και να βιδωθούν πάνω στην δομή της μηχανής, όπου τελικά γειώνονται, για να επιτευχθεί η τελική ευθύτητα. Σήμερα, μία επιφάνεια πολυμερούς, πάχους μερικών χιλιοστών, δένεται στην επιφάνεια επαφής του counterguide. Αυτά τα υλικά μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την τριβή με ατσάλι ή χυτοσίδηρο. Κάποιες συχνά χρησιμοποιούμενες εταιρίες είναι οι Turcite, Moglice, GlacierDP4 και GlacierDX.

Η τελική ρύθμιση του φορτίου στον οδηγό, είναι μία σημαντική λειτουργία, που εφαρμόζεται χειρωνακτικά από ικανούς χειριστές, χρησιμοποιώντας ξύστρες σχήματος λεπιδιού και βάμμα (Πρωσσικό μπλε ή κατακόκκινο). Η ποσότητα του υλικού που αφαιρείται από κάθε κίνηση της ξύστρας είναι περίπου 1-3μm, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία κάθε επιθυμητού σχήματος ή μορφής. Το μοτίβο της επιφάνειας που αποτελεί το αποτέλεσμα της απόξεσης, είναι επίσης ωφέλιμο για την συγκράτηση του λαδιού κατά μήκος της κίνησης του φορτίου.

Αυτός ο τύπος οδηγού χρησιμοποιείται στους τόνους, όπως και στις μηχανές υψηλής ακρίβειας, επειδή η απόξεση αποτελεί τον τρόπο επίτευξης πολύ καλής ευθύτητας και φραιζαρίσματος. Στις μηχανές υψηλής ταχύτητας, οι συνεχείς αντιστροφές της κίνησης, με

την συνακόλουθη αντιστροφή και τα προβλήματα κολλήματος και ολίσθησης, δεν συνιστούν αυτή τη λύση.

### **1.5.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί**

Ένας σφαιρικός ή κυλινδρικός γραμμικός οδηγός, είναι η «γραμμικοποίηση» της έννοιας του ρουλεμάν, όπου η περιορισμένη λίπανση υποκαθίσταται από την κύλιση των σφαιριδίων πάνω στον οδηγό; τα κυλιόμενα στοιχεία διαχωρίζονται από ένα εύκαμπτο κλουβί ή σταθεροποιητές, επανακυκλοφορώντας μέσα σε ένα κανάλι που συμπεριλαμβάνεται μέσα στο φορτίο. Οι σφαίρες είναι ικανοποιητικές για ελαφριά φορτία και υψηλές ταχύτητες, και οι κύλινδροι για υψηλά φορτία αλλά χαμηλές ταχύτητες, ακριβώς το ίδιο με την περίπτωση των ρουλεμάν.

Αυτό το σύστημα ολίσθησης, συμπεριλαμβάνει έναν σιδηροδρομικό οδηγό, με ένα φορτίο με αναβαθμισμένους ελαστικούς υαλοκαθαριστήρες στις ακραίες όψεις, λωρίδες σφράγισης στις υψηλότερες και χαμηλότερες επιφάνειες του φορτίου και τάπες για να σφραγίσουν τις σταθερές τρύπες στο κανάλι.

Το φορτίο και το κανάλι μίας γραμμικής κυλιόμενης σφαίρας ή κυλίνδρου, είναι ταιριαστά και προσαρμοσμένα μεταξύ τους, όπως ένα πρότυπο σύστημα, χάρη στην φόρτιση κλειστής ανοχής.

Οι κυλινδρικοί οδηγοί είναι πιο άκαμπτοι από τις τριβές ολίσθησης, με χαμηλότερη αντίσταση μετατόπισης. Η εγκατάσταση είναι εύκολη, όπως και η αντοχή από την γρήγορη αντικατάσταση στην περίπτωση βλάβης στους οδηγούς ή στα φορτία. Συνήθως οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών, τους αγοράζουν απλά συναρμολογημένους με το απαιτούμενο μήκος οδήγησης, με το φορτίο τοποθετημένο πάνω στον οδηγό και προφορτισμένους σε μία συγκεκριμένη τιμή, που εξαρτάται από την εκτίμηση του φορτίου που είναι να μετακινηθεί.

Το βασικό μειονέκτημα αυτού του συστήματος ολίσθησης, είναι η χαμηλή απόσβεση λόγω της άμεσης επαφής του μετάλλου με μέταλλο των επίπεδης επιφάνειας (bed) με τον οδηγό, με τον κύλινδρο και με το φορτίο. Μερικά επιπρόσθετα φορτία ειδικά σχεδιασμένα για υψηλή απόσβεση, χρησιμοποιώντας πολυμερή ή επαγωγή ενός φιλμ λαδιού, μπορούν να εισαχθούν μεταξύ των κυλιόμενων οδηγών.

Η ζωή των οδηγών αυτού του τύπου καθορίζεται από την αδράνεια των κυλινδρικών στοιχείων, με τον ίδιο τρόπο όπως και με τα ρουλεμάν. Συνεπώς, η επιλογή τους ακολουθεί μία παραλλαγή της προσέγγισης των Palgrem και Miner, που συνήθως είναι για περιστροφικά ρουλεμάν, που είναι τυποποιημένα κατά ISO 14728-1:2004.

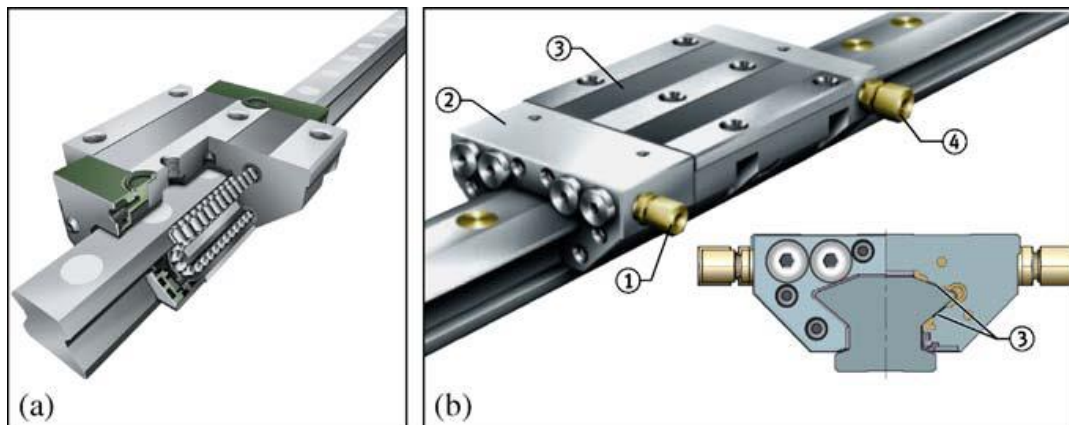
### **1.5.3 Υδροστατικοί Οδηγοί**

Στην υδροστατική λίπανση, ένα φιλμ λαδιού διαχωρίζει πάντα τα στοιχεία ολίσθησης με επαρκή πυκνότητα για να αποφευχθεί εντελώς η επαφή. Για να διατηρηθεί το φιλμ, απαιτείται μία εξωτερική αντλία που συνεχώς ψεκάζει το λάδι μέσα στο ρουλεμάν.

Όταν η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στις περιστροφικές διασυνδέσεις, το αποτέλεσμα είναι ένας άκρως άκαμπτος σχεδιασμός, με σχεδόν μηδενική ακτινική κίνηση σφάλματος; η πίεση που εξάγεται από το φιλμ, συγκεντρώνεται αυτόματα στον άξονα (άτρακτος) των ρουλεμάν. Από την άλλη πλευρά, η ακαμψία του ρουλεμάν ανάλογη με την παροχή της πίεσης.

Ωστόσο, το κύριο πλεονέκτημα των υδροστατικών ρουλεμάν λαδιού, είναι το εξαιρετικά υψηλό ποσοστό απόσβεσης, πολύ σημαντικό όταν κατεργάζονται σκληρά και/ή εύθραυστα υλικά. Συνεπώς, οι άξονες που υποστηρίζονται υδροστατικά, χρησιμοποιούνται σε λειαντήρες υψηλού κόστους.

Από την άλλη πλευρά, νέοι σχεδιασμοί γραμμικών οδηγών, που βασίζονται στην υδροστατική αρχή, βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Το πρόβλημα είναι ο ψεκάσμος και η συλλογή του λαδιού κατά μήκος της ολίσθησης του φορτίου πάνω στον οδηγό. Τα Hydroguide και Hydrorail, είναι πρόσφατα προϊόντα που έχουν εγκατασταθεί στους τόνους υψηλής ακρίβειας και στους λειαντήρες, παρέχοντάς τους υψηλή απόσβεση, μηδενική στατική τριβή, μηδενικό σφάλμα αναστροφής, υψηλή μείωση της θερμικής τριβής και επιτυγχάνουν υψηλή ευθύτητα. Σε αυτούς τους σχεδιασμούς, το φορτίο περιέχει όλη την υδροστατική αντιστάθμιση και περικλείεται στο σχήμα της εσωτερικής του επιφάνειας. Για τις συμβατικές μηχανές, τα φορτία που βασίζονται στην υδροστατική έχουν επίσης αναπτυχθεί, όπως το μοντέλο HLE45 της INA που φαίνεται στο σχήμα 1.17b.



Σχήμα 1. 17 – Γραμμικοί οδηγοί από την INA. (α) Μοντέλο RUE κυλινδρικής καθοδήγησης. (β) Μοντέλο HLE45 ειδικού υδροστατικού φορτίου: τα σημεία 1 και 4 είναι η είσοδος και η έξοδος του λαδιού.

Για μεγάλης διαμέτρου περιστροφικά πιάτα, η υδροστατική υποστήριξη του δίσκου φλάντζας, βοηθά τα πολύ βαριά εξαρτήματα να υποστηριχθούν χωρίς τριβές στην εξωτερική ακτίνα, όπου χρησιμοποιούνται στα ρουλεμάν πάνω στον κεντρικό άξονα του πιάτου.

## 1.6 Ο Ορισμός της Βασικής Κίνησης

Το τμήμα τόνου με κεφαλή, κάνει δυνατή την στοιχειώδη λειτουργία της μηχανής, για την απομάκρυνση των υλικών, αδειάζοντάς τα υπό τη μορφή θραυσμάτων ή σκόνης. Για να γίνει αυτό, πρέπει να εφαρμοστεί μία σχετική κίνηση μεταξύ των άκρων και του επεξεργαζόμενου κομματιού. Μία απαιτούμενη υψηλή στροφορμή σε μία επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής για να παρέχει την προτεινόμενη ταχύτητα κοπής ( $V_c$ ), είναι οι δύο είσοδοι που οδηγούν στην επιλογή ενός κινητήρα και άξονα. Η ισχύς του κινητήρα πηγάζει και από τα δύο στοιχεία, αφού αυτή η ισχύς είναι το προϊόν της στροφορμής και της ταχύτητας.

Σε λίγες περιπτώσεις, το εργαλείο σταθεροποιείται σε κάποιο είδος κινήσεων του φορτίου και του επεξεργαζόμενου κομματιού, όπως στους τόνους. Αλλιώς, στην διάτρηση, την επιπεδοποίηση και τις περισσότερες λειτουργίες, ένα περιστροφικό εργαλείο κινείται άμεσα από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Κινητήρες ασύγχρονης επαγωγής είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι, αποτελούμενοι από δύο στοιχεία, έναν εξωτερικό σταθερό στάτορα που έχει πηνία που φορτίζονται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) για να παράγουν ένα

περιστροφικό μαγνητικό πεδίο, και έναν εσωτερικό ρότορα προσκολλημένο στον άξονα εξόδου, που δίνεται στροφορμή από το περιστρεφόμενο πεδίο.

Στον σχεδιασμό μηχανής, μία καλή επιλογή του κινητήρα στροφορμής και ισχύος, είναι πολύ σημαντική. Για το σκοπό αυτό, ένας απλός υπολογισμός μπορεί να λύσει τις βασικές προδιαγραφές του κινητήρα. Το παρακάτω παράδειγμα δείχνει τον τρόπο ορισμού της στροφορμής και της ισχύος ενός τόρνου για μεγάλης διαμέτρου επεξεργαζόμενα κομμάτια. Για παράδειγμα, ένας υποθετικός πελάτης επιθυμεί να γυρίσει ένα 290mm εξάρτημα που φτιάχτηκε από Inconel 625 (250 HBN). Ο κατασκευαστής του εργαλείου SandvikCoromant προτείνει το P25 καρβίδιο να εισάγει RCMX 120400 GC235, εφαρμόζοντας  $f_0.3\text{mm/rev}$  και  $V_c 40\text{m/min}$ . Η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι 275rpm για αυτή την ταχύτητα κοπής στην διάμετρο αυτή. Μελετώνται δύο βάθη κοπής, με διάμετρο 2 και 4mm. Γίνονται μερικοί απλοί υπολογισμοί:

*Στροφορμή = ισχύς κοπής \* (διάμετρος/2)*

*Ισχύς κοπής = συγκεκριμένη ισχύς κοπής \* απαραμόρφωτο τμήμα θραύσματος*

*Απαρμόρφωτο τμήμα θραύσματος = τροφοδοσία \* (βάθος κοπής/2)*

*Ισχύς = στροφορμή \* ταχύτητα περιστροφής*

**Πίνακας 1.3** – Παράδειγμα της απαιτούμενης στροφορμής και ισχύος μία βασική οδήγηση.

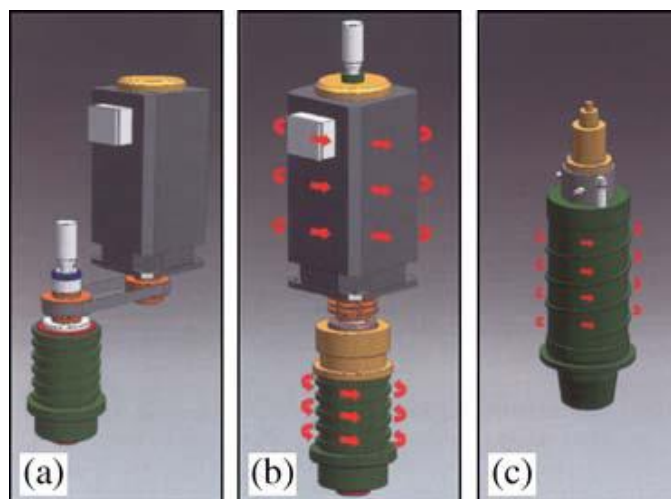
Βάθος κοπής	2	4
Απαρμόρφωτο τμήμα θραύσματος (mm <sup>2</sup> )	0.3	0.6
Συγκεκριμένη ισχύς κοπής (N/mm <sup>2</sup> )	5,073 (±3%)	4,775 (±4%)
Ισχύς κοπής (N)	1,522	2,850
Τόρνος (Nm)	221	415
Ισχύς (W)	6.364	11.988

Χρησιμοποιώντας τιμές για την «συγκεκριμένη ισχύ κοπής» που δίνονται από τον κατασκευαστή του εργαλείου Sandvik, που φαίνονται στον κατάλόγό του, τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 1.3. Υπάρχει μία υψηλή συγκεκριμένη ισχύς κοπής, επειδή είναι δύσκολο να κοπεί το κράμα μετάλλων. Συγκρατώντας τα αποτελέσματα αυτά στο μυαλό, ένας κινητήρας μπορεί να επιλεγεί για τον τόρνο αυτό εφαρμόζοντας έναν παράγοντα ασφαλείας, για παράδειγμα μία ισχύ των 17kW και μέγιστη στροφορμή των 500Nmaποτελούν υλοποιήσιμες τιμές.

Ουσιαστικά, υπάρχουν τρεις τύποι βασικών ρυθμίσεων κίνησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18. Ο πρώτος είναι ο συμβατικός και ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος, όπου ο κινητήρας συνδέεται με τον άξονα με έναν ιμάντα χρονισμού. Αυτή η λαστιχένια ζώνη είναι ένας καλός μονωτής δονήσεων; επιπλέον, δεν πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη φροντίδα για την συναρμολόγηση της ομάδας. Αυτή η λύση είναι δυνατή έως μία ταχύτητα περιστροφής των 6,000rpm.

Ο δεύτερος τύπος είναι ο άμεσος οδηγός χρησιμοποιώντας μία εύκαμπτη σύζευξη μεταξύ του κινητήρα και του άξονα (άτρακτος). Εδώ, επιτυγχάνεται μία πιο αξιόπιστη και καλύτερη

μετάδοση στροφορμής, είναι δηλαδή δυνατή μία 12,000rpm και ακόμη και 16,000rpm σε ειδικές περιπτώσεις. Συγχρόνως, η εύκαμπτη σύζευξη, είναι ένας αποτελεσματικός μονωτής θερμότητας, μεταξύ του κινητήρα και του άξονα. Επιπλέον, με την κατάλληλη συναρμολόγηση του άξονα στην δομή της μηχανής, όλη η θερμική ανάπτυξη προέρχεται από την κατεύθυνση της σύζευξης και του κινητήρα, με καμία επιρροή στην θέση του εργαλείου. Για το λόγο αυτό, αυτή είναι ή πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση για τις μηχανές ακριβείας.



Σχήμα 1. 18 – Τρεις λύσεις για εργαλειομηχανή βασικού άξονα. (a) Κινητήρας και ιμάντας, (b) άμεση σύζευξη, (c) Ηλεκτροάξονας.

Τέλος, οι μηχανές υψηλής ταχύτητας με ταχύτητα περιστροφής υψηλότερη από 18,000rpm απαιτεί συμπαγείς ηλεκτροάξονες, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι ενσωματωμένος μέσα στην άτρακτο (άξονας). Αυτή η μηχανική λύση παρέχει μία πολύ καλή ομοαξονικότητα της ομάδας, που χρειάζεται για τις υψηλές ταχύτητες. Τα γωνιακά ρουλεμάν είναι υβριδικά, με ακροφύσια από χάλυβα και κεραμικά σφαιρίδια, για να μειώσουν την υψηλή τριβή σε αυτές τις ταχύτητες, οι οποίες κάνουν την λύση αυτή πολύ εύθραυστη όταν αντιμετωπίζουν μία ενδεχόμενη σύγκρουση εργαλείων ενάντια το επεξεργαζόμενο τμήμα. Από την άλλη πλευρά, η θερμότητα από τον ίδιο τον κινητήρα και η τριβή στα ρουλεμάν είναι μεγάλη, απαιτώντας έναν εσωτερικό κυκλοφορητή νερού με εξωτερική ψύξη. Περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στο Κεφάλαιο 3.

## 1.7 Ο Ορισμός των Συστημάτων Κίνησης «DriveTrains»

Κλασικά, οι σφαιρικοί κοχλίες «ballscrews» (βλ. [σχήμα 1.19](#)), υπήρξαν ένα από τα σύμβολα των σύγχρονων εργαλειομηχανών, που χρησιμοποιούνται ευρέως επειδή αποτελούν μία αξιόπιστη μηχανική λύση για την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης (από τον ηλεκτρικό κινητήρα) σε κίνηση μετατόπισης που απαιτείται από τους μηχανικούς άξονες. Σήμερα οι γραμμικοί κινητήρες καθιστούν δυνατές τις μακροχρόνιες μετατοπίσεις, χωρίς άλλες μεταδόσεις, αλλά οι σφαιρικοί κοχλίες παραμένουν μία λιγότερο ακριβή και συγχρόνως αποδοτική λύση.

Στο [σχήμα 1.16](#) φαίνεται η κινηματική αλυσίδα (σύστημα κίνησης) ενός άξονα μηχανής. Εκεί, ο κινητήρας τροφοδοσίας, συνήθως ένας σύγχρονος χωρίς ψήκτρες κινητήρας, συνενώνεται με τον άξονα από μία εύκαμπτη σύζευξη, η οποία συγχρόνως είναι ένας καλός μεταδότης στροφορμής, ένας θερμικός μονωτής και εξαλείφει την αναγκαιότητα μίας τέλει ευθυγράμμισης του κινητήρα με σεβασμό προς τον κοχλία. Σε άλλες περιπτώσεις, η σύνδεση του κινητήρα στον κοχλία γίνεται υπό τη μορφή ενός ιμάντα χρονισμού, με τα ίδια

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που υποδείχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, στην περίπτωση της χρήσης ιμάντων για τον κύριο άξονα.

Ο κοχλίας υποστηρίζεται στα δύο του άκρα από γωνιακό σφαιρίδιο ή κωνικά ρουλεμάν, σε διαμόρφωση DB (DoubleBack) στην προηγούμενη περίπτωση, για να αυξηθεί η ακαμψία του άξονα. Για αυτόν τον ίδιο λόγο, ο κοχλίας προ-πιέζεται. Το γεγονός αυτό, μειώνει επίσης την επίδραση της θερμικής διαστολής του κοχλία.

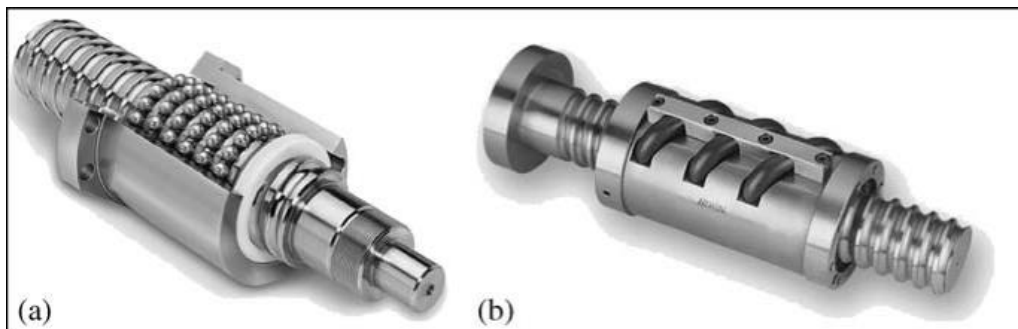
Το στοιχείο ολίσθησης είναι βιδωμένο στο περίβλημα, τα περιβλήματα μπορεί να είναι τετράγωνα, στρόγγυλα ή με φλάντζες για μία πιο άκαμπτη προσαρμογή στο στοιχείο της μηχανής.

Η διάμετρος του κοχλία κυμαίνεται από 6 έως 100mm, όπου ο οδηγός του κοχλία το κάνει μεταξύ 1 και 60mm, διατηρώντας μία συγκεκριμένη αναλογία μεταξύ αυτών των δύο χαρακτηριστικών. Αν ο οδηγός είναι υψηλός, μπορούν να ληφθούν γρήγορες κινήσεις, αλλά με χαμηλό μηχανικό πλεονέκτημα. Μικροί οδηγοί υποδηλώνουν αργές κινήσεις αλλά με υψηλό μηχανικό πλεονέκτημα; συγχρόνως, οι μικροί προτείνονται περισσότερο για την εξασφάλιση ακρίβειας και ελέγχου του συστήματος κίνησης.

Ο υπολογισμός των κοχλιών βασίζεται πρόληψη δύο μηχανικών προβλημάτων. Πρώτα, λύγισμα λόγω αξόνων που δουλεύουν υπό πίεση όταν το περίβλημα εκτοπίζεται κατά μήκος του κοχλία. Δεύτερον, οι κρίσιμες ταχύτητες στροβιλισμού πρέπει να αποφεύγονται, μόνο στην περίπτωση που ο άξονας περιστρέφεται και το περίβλημα κινείται κατά μήκος του κοχλία. Η άλλη περίπτωση είναι όταν ο κοχλίας είναι σταθερός και ο κινητήρας περιστρέφει το περίβλημα; προφανώς, ο κινητήρας πρέπει να τοποθετείται στο φορτίο. Δείτε το Κεφάλαιο 4 για επιπλέον λεπτομέρειες σχετικά με το σχεδιασμό και την χρήση των σφαιρικών κοχλιών.

Η θερμική ανάπτυξη του κοχλία είναι ένας παράγοντας κλειδί για να ληφθεί υπόψη και να μειωθεί. Κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής λειτουργίας των κοχλιών, η θερμότητα που έρχεται από την τριβή των κινήσεων των σφαιρών πάνω στο σπείρωμα, προκαλεί μία σημαντική μακροπρόθεσμη διαστολή του κοχλία. Περίπου 7-10% της ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα. Αν ο άξονας είχε τοποθετηθεί με προ-πίεση, κάποια διαστολή απορροφάται από αυτή την καλή πρακτική. Ωστόσο, εμφανίζονται πάντα μερικά μικρά. Για να μειωθεί η διαστολή στο ελάχιστο, μία λύση στις μηχανές υψηλής ακριβείας είναι η εξαναγκασμένη ψύξη των υγρών του κοχλία, εσωτερικά στον κούφιο άξονα, ή ακόμη η εξαναγκασμένη ψύξη του περιβλήματος. Αυτό αυξάνει την τιμή, αλλά διατηρεί την θερμική ανάπτυξη μέσα στις απαιτήσεις της μηχανής.

Ωστόσο, αν η θέση του άξονα μετράται από μία άμεση γραμμική κλίμακα, η θερμική ανάπτυξη γίνεται πολύ λιγότερο σημαντική, επειδή το CNC δουλεύει για να φτάσει την επιθυμητή θέση του άξονα, μέχρι να ταιριάξει με εκείνη που μετρήθηκε από την γραμμική κλίμακα. Συνεπώς, η θερμική μόνωση των εξωτερικών κλιμάκων μέτρησης από τις πηγές θερμότητας είναι απαραίτητη.



Σχήμα 1. 19 – Σφαιρικοί κοχλίες, από Hiwin. (a) Σχήμα περιβλήματος. (b) Σχέδιο για υψηλά φορτία.

## 1.8 Η Εφαρμογή του CNC

Συνήθως, το CNC και ο προμηθευτής κίνησης, μπορούν να επιλεγούν από τον χρήστη, ο οποίος επιλέγει την εταιρία και το μοντέλο του CNC για μία μηχανή. Αυτή είναι η περίπτωση των κατασκευαστών μικρών και μεσαίων μηχανών, που προσπαθούν να είναι ευέλικτοι όσον αφορά στις επιθυμίες του χρήστη. Αυτός είναι ένας σημαντικός ανταγωνιστικός παράγοντας για τις επιχειρήσεις τους. Ωστόσο, στην περίπτωση μεγάλων εταιριών εργαλειομηχανών, η χρήση των δικών τους ελέγχων και η ανάγκη απλοποίησης της αλυσίδας παραγωγής, σημαίνει πως αυτή η επιλογή δεν είναι κατάλληλη. Οι κατασκευαστές μεγάλων μηχανών συνήθως έρχονται σε συμφωνία με έναν προμηθευτή CNC για να αναπτύξουν συγκεκριμένα CNC για τις μηχανές τους, που βγαίνουν στο εμπόριο με την μάρκα της εργαλειομηχανής. Οι βασικές λειτουργίες του CNC φαίνονται στο σχήμα 1.20, συγκεκριμένα για μηχανή τριών αξόνων. Με περισσότερες λεπτομέρειες:

**Το βασικό λειτουργικό σύστημα:** Όλοι οι τρέχοντες έλεγχοι βασίζονται στην αρχιτεκτονική του μικροεπεξεργαστή, παρόμοια με ένα PC; συνεπώς χρειάζονται ένα βασικό λειτουργικό σύστημα.

**Ο μεταφραστής προγράμματος:** Το εξάρτημα προγραμματίζεται σε κώδικα ISO(που ονομάζεται κώδικας-G) ή σε μία ειδική γλώσσα NC. Το πρώτο είναι χρήσιμο στην γνώση χρήσης των μηχανών; δυστυχώς είναι πολύ απλό για τις νέες ικανότητες των μηχανών. Αυτός είναι ο τρόπος που οι κατασκευαστές CNC έχουν αναπτύξει τις δικές τους γλώσσες. Ο μεταφραστής διαβάζει πάντα μερικά μπλοκ πιο μπροστά, για να δώσει χρόνο για την εκτέλεση όλων των υπολογισμών πριν το εργαλείο να φτάσει τις επόμενες θέσεις. Όσο πιο ψηλά είναι η τροφοδοσία της μηχανής, τόσο πιο μπροστά πρέπει να επεξεργάζονται τα μπλοκ.

**Ο παρεμβολέας.** Αυτή είναι η πιο έξυπνη λειτουργία του CNC, όταν 3D, 5D (συνήθως τρεις μεταφράσεις και δύο προσανατολισμοί) ή ακόμη πορείες πολλαπλών αξόνων πρέπει να μετατρέπονται σε θέσεις αξόνων. Η υψηλή ακρίβεια απαιτεί η οδήγηση του παρεμβολέα να υπολογισμούς κάθε μερικά μικρά κατά μήκος των μονοπατιών των εργαλείων. Οι μέθοδοι υπολογισμών είναι χωρικές μετατροπές χρησιμοποιώντας ομογενείς μήτρες, ακτινική αποζημίωση του εργαλείου και άλλες γεωμετρικές διορθώσεις.

**Έλεγχος των αξόνων.** Όταν η θέση που είναι να καταληφθεί, λαμβάνεται από τον παρεμβολέα, η ταχύτητα κάθε άξονα του κινητήρα λαμβάνεται επίσης. Η τιμή της ταχύτητας είναι η είσοδος για την οδήγηση του κινητήρα. Ανάμεσα στις τεχνικές ελέγχου, η PDI είναι η πιο απλή, η κίνηση σε κάθε άξονα κρατιέται ψηλά στην πραγματική θέση και φτάνει τη θέση του στόχου. Επομένως, πρέπει να υπάρχει μία συσκευή μέτρησης της θέσης, ένας

κωδικοποιητής ή μία γραμμική κλίμακα που φαίνεται στο σχήμα 1.19, για να είναι γνωστή η πραγματική θέση του άξονα ανά πάσα στιγμή.

**Η διεπιφάνεια του χρήστη.** Σήμερα είναι ένας καθοριστικός παράγοντας πώλησης, χάρη στην υψηλή πολυπλοκότητα των μηχανών και των λειτουργιών που είναι να γίνουν. Οι χρήστες χρειάζονται online υποβοήθηση για να κάνουν τα προγράμματα των νέων και ανεπτυγμένων μηχανών ελεύθερα από σφάλματα. Μηχανές για ειδικές εφαρμογές, όπως λειαντήρες ή σχηματοποιητές γρاناζιών, ή οι νέες μηχανές πολλαπλών εργασιών (δείτε Εικόνες 1.3 και 1.4), απαιτούν υποβοήθηση προγραμματισμού, που βοηθά τους χρήστες να αναπαράγουν προγράμματα μηχανών για περίπλοκα εξαρτήματα.

**Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC),** ο οποίος συμπεριλαμβάνεται σήμερα στην ίδια αρχιτεκτονική ηλεκτρονικού εξοπλισμού με τις υπόλοιπες κάρτες ελέγχου, για την υποβοήθηση επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας με τις βασικές υπομονάδες NC. Ο PLC ελέγχει τις βοηθητικές λειτουργίες της μηχανής (γενικά κωδικοποιούνται ως λειτουργίες M στο ISO), εκτελώντας ένα πρόγραμμα που εφαρμόζεται από το εργαλείο δόμησης της μηχανής και λαμβάνοντας υπόψη την τιμή των ψηφιακών εισόδων που συλλέγονται από απλούς αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στην μηχανή. Η ψηφιακές έξοδοι του PLC, συνδέονται σε διακόπτες ή ηλεκτροβαλβίδες για να δώσουν εντολές στα εργαλεία αποθηκών, στο κύκλωμα ψύξης, στο σύστημα μεταφοράς παλετών και σε άλλες βοηθητικές μηχανές. Μία άλλη σημαντική λειτουργία επιτήρησης σχετίζεται με τους διακόπτες τέλους διαδρομής (end-of-stroke), που είναι τοποθετημένοι στο τέλος όλων των οδηγών για να εμποδίσουν τα κινούμενα στοιχεία να μην αφήσουν τα μονοπάτια ολίσθησης: όταν ένας μικροδιακόπτης ανιχνεύει πως ένα στοιχείο ολίσθησης βρίσκεται σε έναν end-of-stroke, το PLC σταματά αμέσως τον κινητήρα τροφοδοσίας του άξονα.



Στις μέρες μας, οι κατασκευαστές ελέγχου παράγουν δύο ή τρεις βασικές πλατφόρμες CNC, η οποία μπορεί να συμπεριλάβει πολλές επιλογές για διαφορετικά είδη μηχανών. Συνεπώς, ο κατασκευαστής εργαλειομηχανών πρέπει να τις υιοθετήσει σε κάθε συγκεκριμένο μοντέλο μηχανής, ακολουθώντας κάποια βήματα:

Ο ορισμός των αξόνων μηχανής σε σχέση με τα CNC, δίνοντας επίσης τις θετικές και αρνητικές έννοιες του κάθε άξονα. Οι παράμετροι ελέγχου του κάθε άξονα πρέπει να προσαρμόζονται στην δυναμική της μηχανής.

Ο προγραμματισμός του PLC για κάθε μοντέλο μηχανής με τις επιλογές του χρήστη. Προσαρμογή της διεπιφάνειας του χρήστη. Γενικά τα μοντέλα ελέγχου CNC είναι προετοιμασμένα για τις φρέζες, τους τόννους ή τους γενικούς λειαντήρες που πωλούνται κοινώς. Ωστόσο, για συγκεκριμένες εφαρμογές, είναι απαραίτητα ειδικά βοηθήματα για να προετοιμαστούν τα προγράμματα NC.

Τέλος, εφαρμόζονται δοκιμές βραχυχρόνιων διακυμάνσεων, χρησιμοποιώντας αδρανείς κινήσεις, και μερικοί έλεγχοι μηχανών. Αυτοί οι έλεγχοι επιτρέπουν την σωστή ρύθμιση των παραμέτρων CNC στην μηχανή, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια και ταχύτητα, όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα.

Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία της διαδικασίας κατεργασίας, και να διευκολυνθεί η συντήρηση των μηχανών, πολλοί αισθητήρες και τεχνικές παρακολούθησης μπορούν να διαχειριστούν από το CNC. Η κατανάλωση του άξονα, η ανίχνευση συγκρούσεων, η θερμική ανάπτυξη του άξονα και η ισορροπία του βασικού άξονα, παρακολουθούνται από το CNC στις μηχανές high-end.

## **1.9 Επαλήθευση Μηχανής**

Μετά την κατασκευή της μηχανής, μία ακαίρεη επαλήθευση της ακρίβειας και της απόδοσης της μηχανής πρέπει να πραγματοποιηθεί. Για το σκοπό αυτό, έχουν οριστεί μερικοί έλεγχοι. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων αντιστάθμισης CNC για τους άξονες της μηχανής. Παρ' όλα αυτά, οι έλεγχοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για πολλούς σκοπούς, έτσι ως έλεγχοι αποδοχής από τους αγοραστές της μηχανής, για συγκρίσεις μεταξύ παρόμοιων μηχανών, για περιοδικό έλεγχο της μηχανής σε όλη της διάρκεια ζωής της μηχανής, κλπ. Μπορούν να αναφερθούν τρία είδη ελέγχου.

Πρώτα, γεωμετρικά τεστ για την μέτρηση της ευθύτητας, του παραλληλισμού ή της συγκέντρωσης σφαλμάτων. Τα ISO 230:2006, ISO 10791:1998, ISO 13041: 2004 και άλλα πρότυπα προσδιορισμένα από την Τεχνική Επιτροπή ISO 39/SC 2 («Συνθήκες ελέγχου για εργαλειομηχανές κοπής μετάλλου») για τον προσδιορισμό μεθόδων για την αποτίμηση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας της τοποθέτησης των αριθμητικά ελεγχόμενων αξόνων των εργαλειομηχανών, από την άμεση μέτρηση των ξεχωριστών αξόνων. Στα πρότυπα, προτείνονται οι μέθοδοι για γραμμικούς και περιστροφικούς άξονες.

Η δεύτερη ομάδα συμπεριλαμβάνει διαδικασίες για την μελέτη ελέγχου της παρεμβολής, που βασίζεται στα λείζερ συμβολόμετρα, στην συσκευή «Ball-Bar» για την σχετική κίνηση των δύο Καρτεσιανών αξόνων, ή την τοποθέτηση των αισθητήρων για την μέτρηση της επαναληψιμότητας της μηχανής. Όταν θεωρούνται πολλοί περιστροφικοί άξονες ταυτόχρονα, δεν υπάρχουν πρότυποι έλεγχοι, εξαιρώντας εκείνους των δυο-περιστροφικών κεφαλών στις μηχανές με έναν οριζόντιο ή κάθετο άξονα Z. Ωστόσο, τα πρότυπα δεν

συμπεριλαμβάνουν ελέγχους για μηχανές πέντε-αξόνων με κεκλιμένες τράπεζες (διαμόρφωση RRLLL στο σχήμα 1.7) ή άλλες δομές.

Ένα άλλο σημαντικό δεδομένο για να επιτευχθεί η καλύτερη υιοθέτηση μηχανής – CNC, είναι η μέτρηση του σφάλματος χρονικής υστέρησης, χρησιμοποιώντας τα εσωτερικά βοηθήματα που εφαρμόζονται στα σύγχρονα CNC για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δίσκων των αξόνων με σεβασμό προς τις θέσεις τους.

Η τελευταία ομάδα συμπεριλαμβάνει τα «testparts», για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των τόνων και των κέντρων κατεργασίας κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Αυτή τη στιγμή, οι έλεγχοι φραιζαρίσματος εστιάζουν μόνο σε κέντρα φραιζαρίσματος τριών αξόνων. Το πιο γνωστό είναι το επεξεργαζόμενο κομμάτι NAS (που καθορίζεται στο ISO 10791-7:1998). Αλλά αυτός ο έλεγχος δεν συμπεριλαμβάνει περίπλοκες επιφάνειες, που είναι ο λόγος που διαφορετικά testparts έχουν σχεδιαστεί τα τελευταία χρόνια, όπως τα ονομαζόμενα Mercedes ή NCG εξαρτήματα (διαθέσιμα στον συνεταιρισμό NC-Gesellschaft). Ωστόσο, κανένα από αυτά δεν συμπεριλαμβάνεται ακόμη στα πρότυπα ISO. Επιπλέον, δεν υπάρχει συγκεκριμένο εξάρτημα που να ελέγχει κέντρα κατεργασίας πέντε αξόνων, έτσι οι πελάτες πρέπει να καθορίσουν τους δικούς τους ελέγχους για να εξετάσουν την μηχανή που ενδιαφέρονται να αγοράσουν, οι οποίοι είναι εξαιρετικά χρονοβόροι.

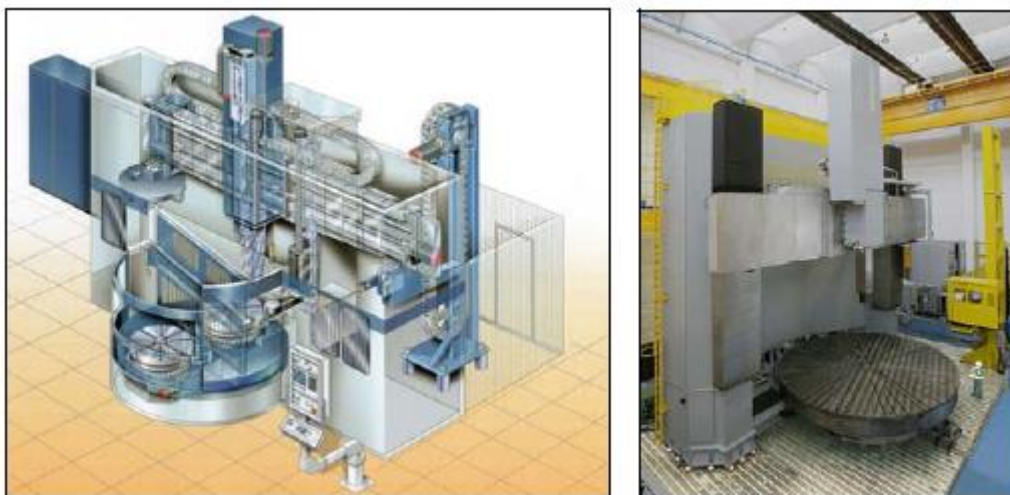
## **1.10 Τυπικές Μηχανές για πολλές Εφαρμογές και Τομείς**

Στο στάδιο σχεδιασμού, μία μηχανή θεωρείται για συγκεκριμένη βιομηχανική εφαρμογή, αλλά χρησιμοποιώντας μάλλον μη-συγκεκριμένες απαιτήσεις. Όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 1.2.1, ο τύπος και το μέγεθος του επεξεργαζόμενου κομματιού, οι λειτουργίες που είναι να εκτελεστούν, η παραγωγικότητα και η ακρίβεια επίτευξης, θα καθορίσουν τις προδιαγραφές της μηχανής. Στην ακόλουθη ενότητα, περιγράφονται μερικές τυπικές μηχανές από συγκεκριμένους τομείς; ομοίως, θα περιγραφούν και άλλα παραδείγματα σε βάθος, στα επόμενα κεφάλαια.

### **1.10.1 Μία Μηχανή για Μεγάλα Δομικά Εξαρτήματα Στροβιλοφόρου Κινητήρα**

Ο κάθετος τόνος είναι μία τυπική μηχανή για αυτή την εφαρμογή. Το επεξεργαζόμενο κομμάτι έρχεται από σφυρηλάτηση, όντας δίσκοι ή θήκες. Οι λειτουργίες κατεργασίας είναι περιστροφή, διεύρυνση οπής και επιπεδοποίηση. Η μέγιστη διάμετρος περιστροφής μπορεί να είναι έως 3m και το βάρος του εξαρτήματος έως 30 τόνους. Η ταχύτητα περιστροφής του πιάτου είναι στην κλίμακα των 200rpm με ισχύ των 50-100kW. Η διαδρομή του εμβόλου της μηχανής είναι μεγαλύτερη από 1,500mm. Μέσα στο έμβολο, μπορεί να τοποθετηθεί ένα περιστροφικό εργαλείο ή μία κεφαλή φραιζαρίσματος, στην τελευταία περίπτωση με μία ισχύ να κυμαίνεται από 20 έως 50kW. Δύο μηχανές αυτού του τύπου, από τον P. Carnaghi, φαίνονται στο σχήμα 1.21.

Ένα ακόμη παράδειγμα μίας μεγάλης μηχανής με δύο έμβολα τοποθετημένα στον ίδιο κοχλία, φαίνονται στο σχήμα 1.22, από Ibarria. Αυτή είναι μία μηχανή διάτρησης και φραιζαρίσματος, που είναι εστιασμένη στην διάτρηση κυκλικών δακτυλίων για πύργους υποστήριξης ανεμογεννήτριας. Και τα δύο έμβολα είναι ανεξάρτητα αν και μπορούν να εργαστούν παράλληλα.



Σχήμα 1. 21 – Οι κάθετοι τόρνοι του PietroCarnaghi, μοντέλα ATF14 και AP100



Σχήμα 1. 22 – Μηχανή διάτρησης της Ibarmia

### 1.10.2 Οριζόντια Φραιζα για Αυτοκινούμενα Στοιχεία

Στον υψηλά ανταγωνιστικό τομέα της αυτοκίνησης, οι εταιρίες ενθαρρύνονται να μειώσουν τους χρόνους και τις τιμές, ενώ διατηρούν ικανοποιητικά την ποιότητα. Επιπλέον, οι μηχανές πρέπει να παρέχουν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης μετάλλων, γρήγορες τροφοδοσίες, μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα, αυξημένη γενική παραγωγικότητα και τέλος, την ευκαμψία να συναντούν αλλαγές στους όγκους παραγωγής.

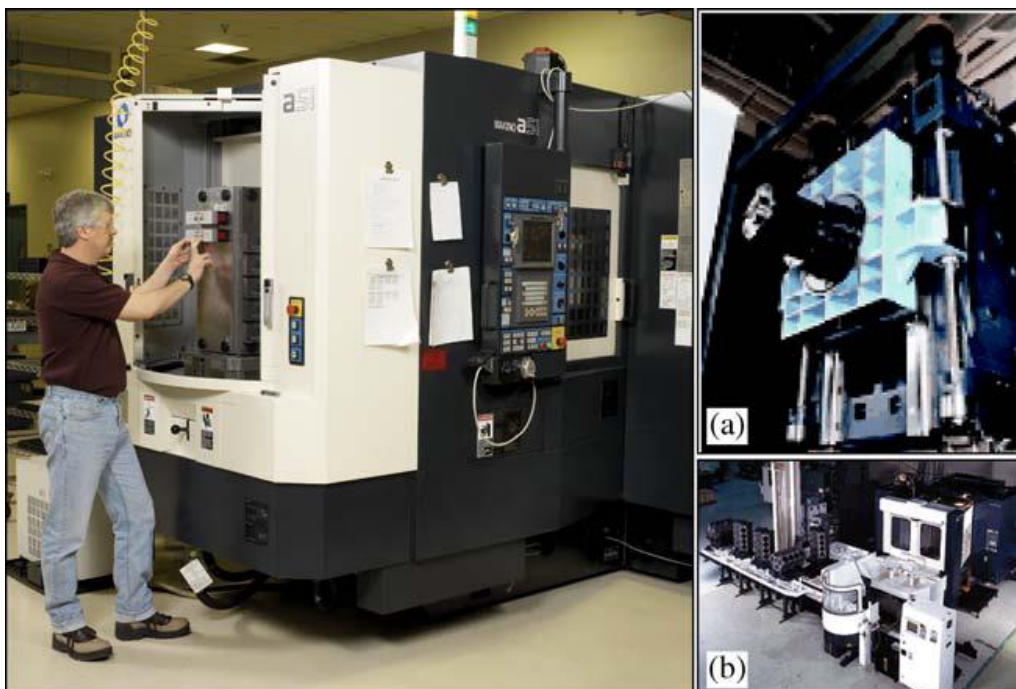
Τα κοινώς παραγόμενα εξαρτήματα είναι μπλοκ και κεφαλές κυλίνδρου σε χύτευση σιδήρου ή υψηλής σιλικόνης, θήκες στοιχείων, γρανάζια, στροφαλοφόροι άξονες, μοχλοί, ή μικρά κομμάτια για τα συστήματα μετάδοσης και διαθεσιμότητας.

Τα αυτοκινούμενα στοιχεία, είναι συνήθως κατεργασμένα σε οριζόντια κέντρα κατεργασίας τριών αξόνων, εφοδιασμένα με έναν άξονα Β για την περιστροφή του εξαρτήματος, ή σε μερικές περιπτώσεις με μία απλή περιστροφική τράπεζα (table) (Σχήμα 1.23). Τα οριζόντια κέντρα φέρουν οφέλη σε μία εφαρμογή, που τα κάθετα συνήθως δεν μπορούν να φέρουν, συμπεριλαμβάνοντας γρηγορότερους και περισσότερους ατράκτους (άξονες) ισχύος, μικρότερο αποτύπωμα και απομάκρυνση θραυσμάτων. Τα εξαρτήματα κρατιούνται και σταθεροποιούνται σε γενικές παλέτες, οι οποίες μπορούν να μεταφερθούν από

αυτοματοποιημένα συστήματα. Σε μερικές περιπτώσεις, ο συνυπολογισμός μίας περιστροφικής κεφαλής ή περιστροφικής τράπεζας, βοηθά στην παραγωγή πιο περίπλοκων σχημάτων.

Στις μηχανές αυτές, η αλλαγή χρόνου του εργαλείου πρέπει να είναι όσο πιο χαμηλή γίνεται; σήμερα, χρόνοι των 2–4 δευτερολέπτων είναι οι πιο κοινοί. Απαιτούνται επίσης, πολύ γρήγορες κινήσεις αδράνειας μεταξύ των λειτουργιών ή της τοποθέτησης των εργαλείων.

Οι άξονες είναι στην κλίμακα των 6–12.000 rpm, τροφοδοτούμενοι με κινητήρες των 60 – 90kW, για να μπορούν να μετακινούν μεγάλης διαμέτρου, πολλαπλών εισόδων περιστροφικά εργαλεία. Πιθανές είναι οι εκδοχές με μία προσανατολισμένη κίνηση ή μία άμεση σύνδεση του βασικού κινητήρα με τον άξονα, με την στροφορμή να είναι υψηλότερη στις προσανατολιζόμενες εκδοχές (στην κλίμακα των 600 – 1,100Nm).

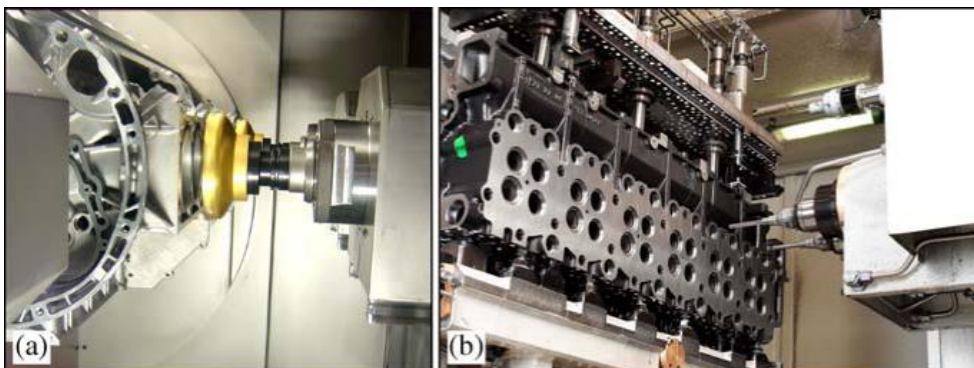


Σχήμα 1. 23 – Κέντρο οριζόντιας κατεργασίας, μοντέλο Makinoa51. (a) Μία λεπτομέρεια του άξονα και την στήλης του MakinoA77. (b) Αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής των μπλοκ μηχανής

Οι αποθήκες υλικών είναι οι μεγαλύτερες εργαλειομηχανές, με μία προαιρετική αποθήκευση που φτάνει τα περισσότερα από 400 εργαλεία.

Μερικές μηχανές συμπεριλαμβάνουν ως επιλογή δύο δίδυμους άξονες και τράπεζες ή τύμπανα, για να στερεώσουν πολλά εξαρτήματα σε μία εγκατάσταση; δείτε την Σχήμα 1.24. Όταν γίνει αυτό, η οριογραμμή μεταξύ των ξεχωριστών μηχανών και των μηχανών μεταφοράς (δείτε την Ενότητα 1.2.9) γίνεται διάχυτη.

Από την άλλη πλευρά, τα κάθετα κέντρα εφαρμόζονται στον τροχό, στα πηδάλια, στα φρένα ή στα εξαρτήματα ανάρτησης, για μικρή και μεσαία παραγωγή.



Σχήμα 1. 24 – (a) Σύστημα αλλαγής με διδυμο άξονα και τύμπανο. (b) Διπλός άξονας για την κατεργασία κεφαλής μηχανής από HellerMaschinenfabrik

### 1.10.3 Κέντρο Φραιζαρίσματος για Καλούπια

Στην περίπτωση αυτή, είναι κοινή μία φραιζαCNC με μία ζώνη εργασίας  $1 \times 1 \times 1$ , με τρεις άξονες και έναν κάθετο άξονα ως την βασική λύση, και πέντε άξονες ως την ευρέως χρησιμοποιούμενη επιλογή. Για μικρά καλούπια είναι τυπικό το πλαίσιο-C, όπως είναι το μοντέλο που φαίνεται στο [σχήμα 1.25](#). Για καλούπια μεσαίου μεγέθους το πλαίσιο του ατσάλινου σκελετού γίνεται πιο ενδιαφέρον λόγω της βελτιωμένης ακαμψίας, με μία τράπεζα ολίσθησης όπου τοποθετείται το καλούπι με βίδες ή συνδέσμους.

Για μεγάλα καλούπια, ο τύπος του ατσάλινου σκελετού, με μία μετακινούμενη δέσμη και με δύο περιστροφικές κεφαλές, επιτρέπει το ταίριασμα σύνθετων σχημάτων. Ωστόσο, για μικρά και μεσαία καλούπια, η περιστροφική οριζόντια επίπεδη επιφάνεια (bed) δύο αξόνων, είναι πιο άκαμπτη και συνεπώς περισσότερο χρησιμοποιήσιμη.

Όσον αφορά την βασική κίνηση, ένας ηλεκτρικός άξονας με 20,000 – 25,000rpm και 17 – 25kW, αποτελεί μία τυπική εικόνα, αλλά η άμεση κίνηση από μία εύκαμπτη σύζευξη είναι επίσης πολύ ευρέως χρησιμοποιούμενη. Αυτή η τελευταία λύση είναι πιο οικονομική, και πιο σκληρή ενάντια στις συγκρούσεις, και επιτρέπει 12,000rpm και ακόμη περισσότερα. Σήμερα, οι ηλεκτροάξονες μπορούν να δώσουν αρκετή απόσβεση ακόμη και σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, επιτρέποντας το ξεχόνδρισμα να εφαρμοστεί στο κέντρο φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας, ξεκινώντας από τα υλικά σκληρού χάλυβα.

Οι σφαιρικοί κοχλίες αποτελούν την οικονομική και υψηλής απόδοσης λύση για τα συστήματα κίνησης, επιτρέποντας μία επιτάχυνση των 0.8 – 1g.

Οι μηχανές δεν εφοδιάζονται συνήθως με μεταφορά παλέτας, επειδή η κατεργασία στα καλούπια είναι μία μακριά λειτουργία που δεν απαιτεί πολλά εργαλεία και, επιπλέον, ο χρόνος εγκατάστασης δεν είναι κρίσιμος.



Σχήμα 1. 25 – Η πέντε αξόνων μηχανή φραιζας, από Kondia.

#### 1.10.4 Μηχανή Φραιζας για πρέσες και καλούπια

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτές οι μηχανές είναι τύπου ασφάλινου σκελετού (Gantry), με μία εγκάρσια κινούμενη δέσμη και ένα μακρύ έμβολο για την κίνηση Z. Η βαριά πρέσα σταθεροποιείται στο τραπέζι, όπου όλες οι κινήσεις γίνονται από το εργαλείο. Συνήθως μία δύο περιστροφών κεφαλή χρησιμοποιείται για την επιπεδοποίηση των σκαλιστών επιφανειών, όπως φαίνεται στο [σχήμα 1.26](#). Εκεί, για να αποκτηθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια, οι άξονες B και C οδηγούνται και οι δύο από κινητήρες χωρίς ψήκτρες, και οι μετατροπείς στηρίζονται άμεσα πάνω στους άξονες.

Τα νέα μοντέλα των περιστροφικών κεφαλών που βασίζονται σε κινητήρες ροπής για τους άξονες προσανατολισμού που έχουν λανσαριστεί τα τελευταία τέσσερα χρόνια. Αυτή πρόκειται να είναι το βασικό σχέδιο λύσης στο κοντινό μέλλον, τουλάχιστον για τις μικρού και μεσαίου επιπέδου μηχανές. Οι κινητήρες ροπής είναι σε σχήμα δακτυλίου και μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας πάνω στους περιστροφικούς συνδέσμους, ελαχιστοποιώντας τις μεταδόσεις ταχυτήτων.

Μερικές μηχανές για μεγάλες πρέσες μπορούν να αλλάξουν αυτόματα την κεφαλή του άξονα, επιλέγοντας μία κεφαλή με προσανατολιζόμενο άξονα για το ξεχόνδρισμα και μία ακόμη για με δύο άξονες και έναν άξονα υψηλής ταχύτητας για το φινίρισμα. Οι σύνδεσμοι γρήγορης αλλαγής πρέπει να στηρίζονται και στο έμβολο και στην βάση της κεφαλής για τον ηλεκτρισμό, το λάδι και τις προμήθειες ψυκτικού.



Σχήμα 1. 26 – Κεφαλή περιστροφικού άξονα σε μηχανή φραιζας, από Fidia.

### 1.10.5 Συμβατικές Μηχανές για Βοηθητικές Λειτουργίες

Σήμερα, οι χειροκίνητες μηχανές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως βοηθητικές μηχανές, για ειδικές λειτουργίες. Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει την γενική μηχανή φραιζας, την πρέσα και την μηχανή του τόρνου, οι οποίες είναι πάντα παρούσες στα εργαστήρια, με μικρές μόνο τροποποιήσεις όσον αφορά στις εφευρέσεις του δεύτερου μισού του 19ου αιώνα. Μία εύκολη και ανέξοδη επιλογή είναι συμπερίληψη κανόνων μέτρησης σε κάθε άξονα, για την ψηφιακή εμφάνιση των θέσεων των αξόνων, όπως στην περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 1.27.



Σχήμα 1. 27–ΦραιζαFU152 από Lagun.

Βασικά, όλοι οι τεχνικοί μετάλλων έχουν διδαχθεί τις βασικές τους επιδεξιότητες και την «τέχνη της κατεργασίας μετάλλων» πάνω σε αυτές τις μηχανές, αφού οι λειτουργίες κατεργασίας μοιάζουν περισσότερο με αυτές τις μηχανές, παρά στις λανσαρισμένες πρόσφατα μηχανές CNC. Στο σχήμα 1.27 φαίνεται μία γενική μηχανή φραιζας, με αυτόματους ρυθμούς τροφοδοσίας στους τρεις άξονες (X, Y, Z) και συνεχόμενες μεταβλητές ταχύτητες για τον κύριο άξονα και τους ρυθμούς τροφοδοσίας. Επιλογές για το μοντέλο αυτό, μία γενική κεφαλή φραιζαρίσματος με άξονα τροφοδοσίας, μία κυκλική τράπεζα ακριβείας και επισυνάψεις για λιμάρισμα, για εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος οδοντωτών κανόνων και για φραιζάρισμα με κύλιση. Στο σχήμα 1.28 φαίνονται επίσης ένας παράλληλος τόρνος και η τροφοδοσία του κιβωτίου μετάδοσης της κίνησης του, καθώς και του πυργίσκου. Αυτό το μοντέλο φτάνει τα 2,200rpm με κινητήρα 5.5kW.



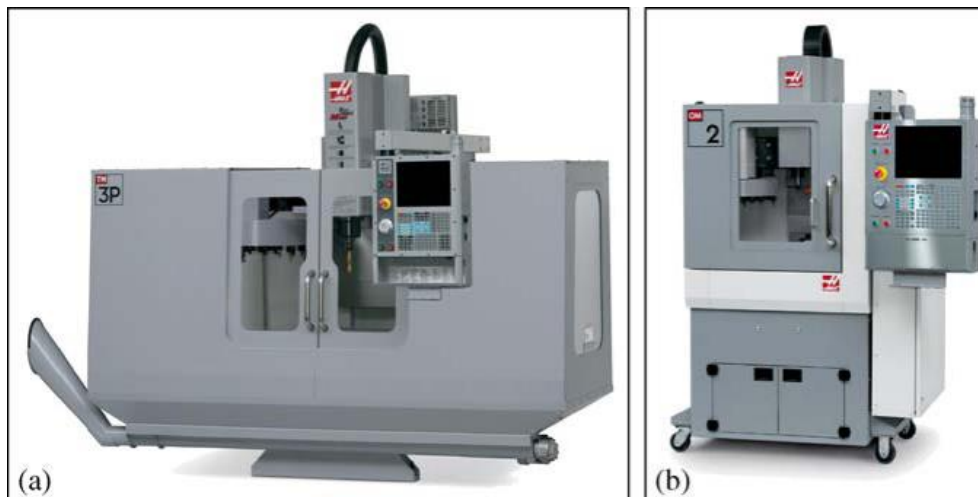
Σχήμα 1. 28–Παράλληλος τόρνος, μοντέλο SP250 από Pinacho. (a) Λεπτομέρεια τροφοδοσίας κιβωτίου. (b) Γενικός πυργίσκος.

### 1.10.6 Φρέζες CNC για Γενική Παραγωγή

Μερικοί κατασκευαστές μηχανών έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη για μία αξιόπιστο, χαμηλού κόστους κέντρο παραγωγής κατεργασίας. Εδώ, ο συμβιβασμός της τεχνολογίας, της τιμής και της αξιοπιστίας πρέπει να ισορροπούν, με εξαρτήματα για πολλαπλές εφαρμογές. Πολλοί μικροί και μεσαίοι υπεργολάβοι, δεν γνωρίζουν τι είδη εξαρτημάτων θα παραχθούν, και έτσι προτιμούν πολύπλευρες μηχανές.

Ένα παράδειγμα είναι η σειρά HassToolroomMill; το μοντέλο TM-3P φαίνεται στο σχήμα 1.29. Ο αξιόπιστος άξονας κίνησης του TM-3P, με 5.6kW, περιστρέφεται έως 6,000rpm και χρησιμοποιεί εργαλεία 40 κλίσεων. Η κλίμακα τροφοδοσίας ορμής και κοπής είναι 10m/min. Ένα εργαλείο αλλαγής 10 θυλάκων είναι πρότυπο. Η βαριά οριζόντια επίπεδη βάση (bed) και η στήλη από χυτοσίδηρο στεγανοποιούν τις δονήσεις και παρέχουν ακαμψία.

Από την άλλη πλευρά, σε μερικές περιοχές του κόσμου, το μέγεθος της μηχανής και το αποτύπωμα είναι σημαντικά λόγω του ακριβού βιομηχανικού εδάφους. Για το λόγο αυτό, οι συμπαγείς μηχανές παράγονται από πολλούς κατασκευαστές. συνήθως, αυτές οι υπέρ-συμπαγείς μηχανές είναι τόσο μικρές ώστε να χωρούν μέσα από μία πόρτα, μπορούν να μετακινηθούν εύκολα, παρέχονται πολλές φορές με ένα κουτί εργαλείων με τροχούς, ώστε να μπορούν να κυλήσουν από την μία θέση στην άλλη, και ακόμη να χωρέσει μέσα στα περισσότερα ασανσέρ εμπορευμάτων.



Σχήμα 1. 29 – (a) Haas TM-3P. (b) HassOM-φραιζα γραφείου.

### 1.10.7 Τόρνος Βαρέως Τύπου

Οι τόρνοι για μακριά και μεγάλα εξαρτήματα, όπως ράβδοι πλαστικοποίησης ή στροφαλοφόροι για την ώθηση των πλοίων, είναι οριζόντιοι με επίπεδες οριζόντιες βάσεις (beds), μερικά μοντέλα με ακόμη και 25m απόσταση μεταξύ των κέντρων και της μέγιστης ταλάντευσης 2 μέτρα πέρα από την οριζόντια βάση. Τα επεξεργαζόμενα κομμάτια που ζυγίζουν πάνω από 45 τόνους μπορούν επίσης να κατεργαστούν πάνω του. Φυσικά, το μέγεθος και το βάρος των εξαρτημάτων απαιτεί τη χρήση μεγάλων και σταθερών στηριγμάτων.



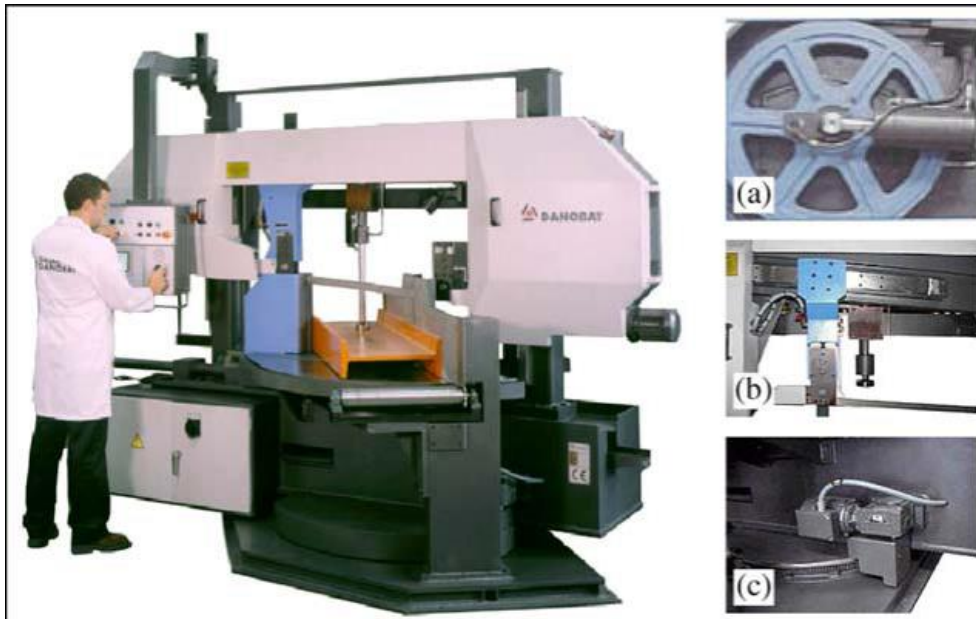
Σχήμα 1. 30 – Τόρνος βαρέως τύπου από Goratu, μοντέλο GHT11

Η βασική κίνηση είναι ένας ισχυρός κινητήρας στο φάσμα των 100 – 150kW. Το φορτίο κινείται μέτριες τροφοδοσίες, συνήθως όχι περισσότερο από 6m/min. Ένας χειριστής μπορεί να κινηθεί πάνω του, όπως φαίνεται στο [σχήμα 1.30](#). Το μέγεθος και το βάρος των στοιχείων απαιτεί την μηχανική κίνηση του εξαρτήματος συγκράτησης της ακίδας του τόρνου και το αυτόματο κλείδωμά του στην επίπεδη επιφάνεια (bed).

### 1.10.8 Μίτρα Πριονοκορδέλας

Το πριόνισμα είναι μία σημαντική λειτουργία κατά την διάρκεια της καθημερινής εργασίας των εταιριών μετάλλου. Επιπλέον, είναι μία απαραίτητη λειτουργία για κατασκευαστές ασφάλινων δομών. Μία τυπική πριονοκορδέλα είναι η διδυμη στήλη με την μίτρα να κόβει μεταξύ (+45° – 60°), εστιάζοντας στην κοπή κάθε τύπου τμήματος, μονού ή δεσμίδων ([Σχήμα 1.31](#)). Η τοποθέτηση της μίτρας της μηχανής εκτελείται χειρωνακτικά ή είναι ελεγχόμενη NC, ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη. Η βασική ισχύς του κινητήρα κυμαίνεται από 5 – 8kW και η ταχύτητα της λεπίδας στα 15 – 100m/min. Η συσκευή τάνυσης της

λεπίδας του πριονιού είναι υδραυλική, χειροκίνητη ή αυτόματη. Μία αντλία ψύξης παρέχει μία συνεχή ροή ψυκτικού υγρού πέρα από την λεπίδα όταν κόβονται τα μέταλλα.



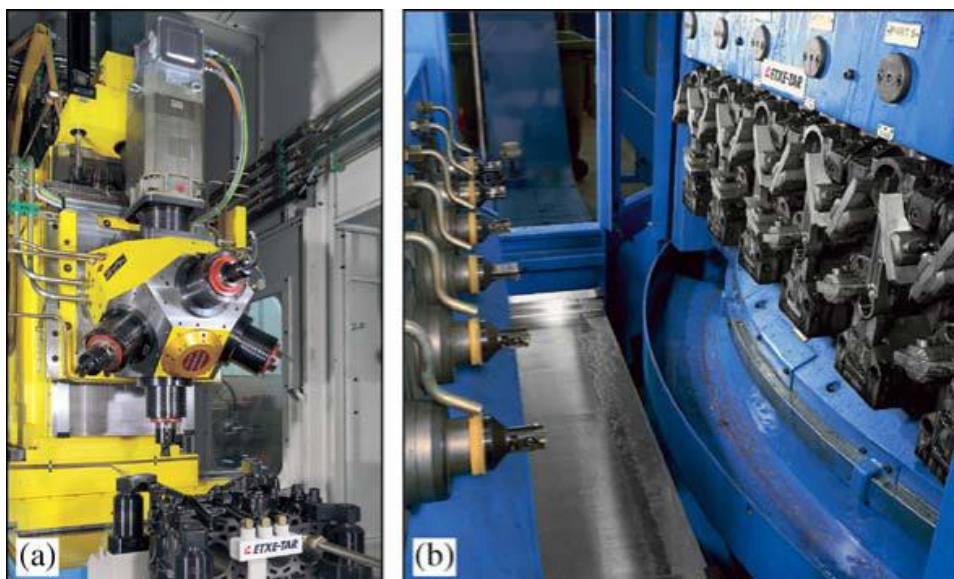
Σχήμα 1. 31 – Πριονοκορδέλα CPI από Danobat. (a) Λεπτομέρεια της λεπίδας της συσκευής τάνυσης. (b) Οδηγός της πριονοκορδέλας. (c) Χειροκίνητη ή NC ελεγχόμενη τοποθέτηση της μίτρας.

#### 1.10.9 Μηχανές Μεταφοράς

Οι μηχανές μεταφοράς σχεδιάζονται συνήθως σύμφωνα με την όψη των σχεδίων του εξαρτήματος που είναι να παραχθεί. Οι εταιρίες που ειδικεύονται στις μηχανές μεταφοράς, εργάζονται μόνο κατά παραγγελία των πελατών. Η βασική απαίτηση είναι η υψηλή παραγωγικότητα, έτσι εδώ προτείνεται η σκληρή αυτοκίνηση. Ξεκινώντας από αυτό, το κατασκευαστικό τμήμα των κατασκευαστών προσπαθεί να σχεδιάσει μία λύση υιοθετώντας πολλές μονάδες κατεργασίας και βοηθητικές μηχανές τροφοδοσίας πάνω σε μία κοινή επίπεδη βάση (bed).

Η συναρμολογησιμότητα της μηχανής καθιστά δυνατή τη λήψη διαφορετικών λύσεων χωρίς πολλές αλλαγές στο σχέδιο και στην παραγωγή. Σχετικά με το πλαίσιο της μηχανής, μία δακτυλιοειδής επίπεδη επιφάνεια βάσης (bed) είναι μία κλασική λύση για τα μοντέλα περιστροφικής τράπεζας, που είναι φτιαγμένα από χυτοσίδηρο ή συγκολλημένο χάλυβα.

Τα εργαλεία πυργίσκων τύπου τυμπάνου ή κορόνας, όπως φαίνονται στο σχήμα 1.32, μπορούν να τοποθετηθούν για να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες κατεργασίας όπως επιπεδοποίηση και διάτρηση. Όλα τα εργαλεία οδηγούνται από έναν κοινό κινητήρα, χρησιμοποιώντας μετάδοση με γρανάζια. Αυτές οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές μηχανές με μικρές αλλαγές. Από την άλλη πλευρά, η χρήση παράλληλων αξόνων όταν εκτελείται η ίδια λειτουργία, οδηγεί σε υψηλή παραγωγικότητα.

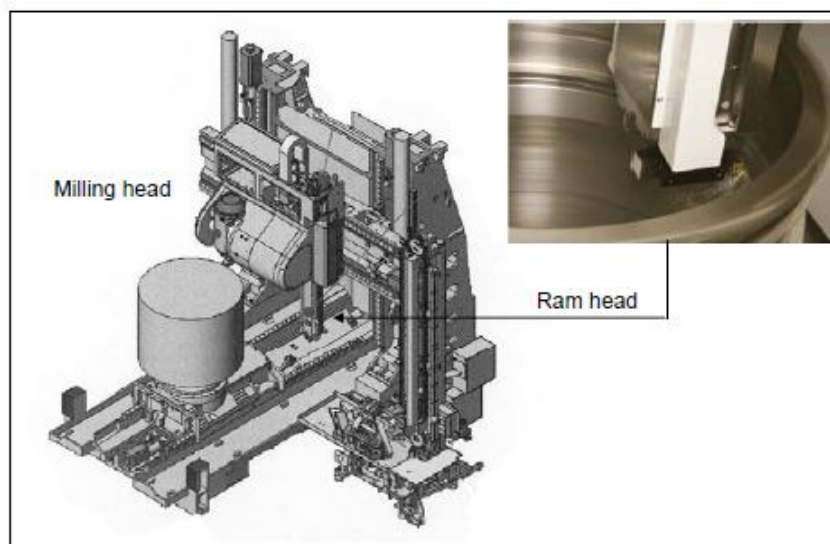


Σχήμα 1. 32 – Μηχανές μεταφοράς από την Etke-tar. (a) Μονάδα κατεργασίας για κυλινδρικά μπλοκ. (b) Παράλληλοι άξονες.

#### 1.10.10 Κέντρο Φραιζαρίσματος και Διεύρυνσης Οπών

Η τελευταία μηχανή αυτού του κεφαλαίου, που φαίνεται στο σχήμα 1.33, είναι ένα κέντροφραιζαρίσματος, με ένα επιπρόσθετο έμβολο για την αύξηση της εμβέλειας εφαρμογής της μηχανής, για εκείνες τις ζώνες εξαρτημάτων με περίπλοκη πρόσβαση στις βαθιές εσωτερικές ζώνες.

Το έμβολο άξονα των 7.5kW, με μία διαδρομή των 900mm, είναι τοποθετημένο στην πλευρά στέγασης του άξονα φραιζαρίσματος, το οποίο βοηθά στο φραιζάρισμα χρησιμοποιώντας μία γωνιακή κεφαλή. Αυτός ο άξονας έχει επίσης μία αποθήκη εργαλείων των 40 θέσεων. Αυτό το έμβολο του άξονα είναι επιπρόσθετο στον πρότυπο άξονα Β με τα 10,000rpm και με κινητήρα 37kW η περιστρεφόμενη τράπεζα με 500rpm και ισχύ 37kW.



Σχήμα 1. 33 – Κέντρο φραιζαρίσματος πέντε αξόνων με επιπρόσθετο έμβολο άξονα, Mazak μοντέλο IntegrexRamtecV/8.

## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Νέες Έννοιες Δομικών Στοιχείων

### Περίληψη Κεφαλαίου:

Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση νέων εννοιών και τάσεων που σχετίζονται με τη δομή των εργαλειομηχανών. Στην πραγματικότητα, η δομή της μηχανής έχει μία αποφασιστική επιρροή στις τρεις κύριες παραμέτρους που προσδιορίζουν τις ικανότητες μίας μηχανής, οι οποίες είναι: η ακρίβεια της κίνησης, η παραγωγικότητα της μηχανής και η ποιότητα της κατεργασίας. Εν προκειμένω, αυτή η μελέτη πάνω στα δομικά στοιχεία θα προσθέσει μία νέα βασική παράμετρο, την οικολογική αποδοτικότητα, επειδή η δομή της μηχανής έχει επίσης αποφασιστική επιρροή σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της μηχανής και ειδικά στα υλικά και τις πηγές κατανάλωσης ενέργειας: ένα θέμα αύξησης του ενδιαφέροντος μεταξύ των κατασκευαστών εργαλειομηχανών.

### 2.1 Εισαγωγή και Ορισμοί

Όπως φάνηκε στο πρώτο Κεφάλαιο, η δομή μίας εργαλειομηχανής έχει δύο κύριες λειτουργίες, να κρατάει τα στοιχεία και τα περιφερειακά που σχετίζονται με την μηχανή και να αντισταθούν στις δυνάμεις οι οποίες παράγονται από την διαδικασία και τις κινήσεις της μηχανής.

Στην άποψη αυτή, η βασική πρόκληση των κατασκευαστών εργαλειομηχανών είναι να συλλάβουν δομές εργαλειομηχανών που είναι ικανές να αντέχουν με τις ελάχιστες δυνατές αποκλίσεις, τις επιδράσεις των προβλεπόμενων δυνάμεων και των εστιών θέρμανσης, και συγχρόνως να έχουν την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση, όσον αφορά τα υλικά και τις πηγές ενέργειας.

Καθώς αυτοί οι δύο στόχοι είναι αντιτιθέμενες, η διαδικασία του σχεδιασμού μίας εργαλειομηχανής αποτελεί μία ανταλλαγή μεταξύ αυτών των δύο στόχων, έτσι ώστε τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των εργαλειομηχανών θα προσδιορίσουν αυτή την ισορροπημένη θέση μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων.

Εν προκειμένω, τα τελικά χαρακτηριστικά μίας εργαλειομηχανής προσδιορίζονται υπό τη μορφή των παρακάτω παραμέτρων:

**Παραγωγικότητα:** Η παραγωγικότητα μίας μηχανής μετριέται υπό τη μορφή του ποσοστού απομάκρυνσης μετάλλου (MRR), το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις κινηματικές και δυναμικές ικανότητες του και ειδικά στην στατική του ακαμψία, η οποία στην πραγματικότητα είναι ο αρχικός λόγος για να προσδιοριστούν οι διαστάσεις και τα σχήματα των δομικών στοιχείων. Για αυτόν το σκοπό, η υψηλότερη ακαμψία περιλαμβάνει μεγαλύτερες μάζες, οι οποίες σε συνδυασμό με γρηγορότερες κινήσεις που οδηγούν στην επίτευξη υψηλότερων παραγωγικοτήτων, οδηγεί και σε κινητήρες υψηλότερης ισχύος που αναπαράγουν υψηλότερες εσωτερικές δυνάμεις. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί πιο άκαμπτες δομές, οι οποίες πάλι απαιτούν μία μεγαλύτερη ποσότητα υλικού, έτσι ώστε οι μηχανές να γίνουν παραγωγικές και συγχρόνως να καταναλώνουν ενέργεια και πηγές.

**Ακρίβεια:** Η ακρίβεια μίας μηχανής προσδιορίζεται σύμφωνα με τις αποκλίσεις των εργαλείων, με σεβασμό προς ένα επιθυμητό προφίλ ενώ κινείται και τοποθετείται (δείτε Κεφάλαιο 6). Αυτές οι αποκλίσεις σχετίζονται έντονα με τις θερμικές επιδράσεις και τις μηχανικές εκτροπές που αντέχουν τα στοιχεία της μηχανής, όταν εσωτερικές δυνάμεις και διαδικασίες ενεργούν πάνω τους. Συνεπώς, η απαραίτητη βάση ώστε να επιτευχθούν μηχανές ακριβείας, βρίσκεται στην σύλληψη των θερμικά σταθερών και άκαμπτων δομών.

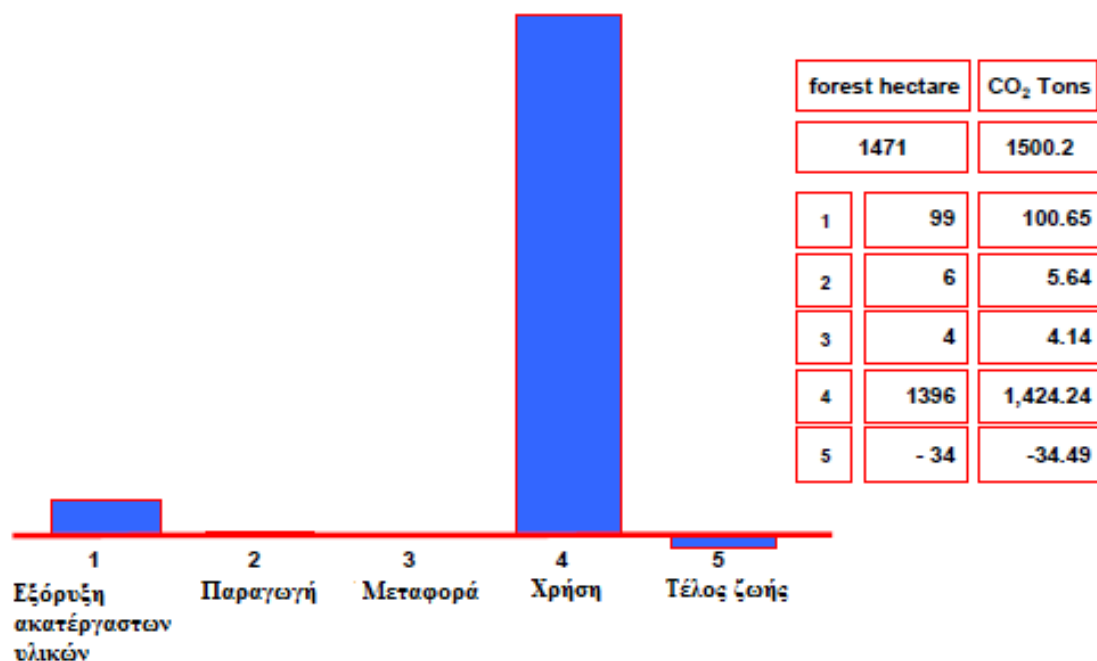
**Οικολογική αποδοτικότητα:** Η οικολογική αποδοτικότητα μίας μηχανής μετρείται υπό τη μορφή πηγών ενέργειας και υλικών που χρησιμοποιούνται, και των αποβλήτων και της μόλυνσης που δημιουργείται κατά την επεξεργασία. Καθώς η αειφορία αποτελεί ένα θέμα αυξανόμενης ανησυχίας στον κατασκευαστικό τομέα, αυτό το βιβλίο θα προσθέσει έναν νέο στόχο για τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών: να μειώσουν την περιβαλλοντική επίδραση που σχετίζεται με μία εργαλειομηχανή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της.

Τα δομικά στοιχεία των μηχανών έχουν μία διπλή επιρροή στην γενική οικολογική αποδοτικότητα μίας μηχανής: από τη μία, η μεγαλύτερη ποσότητα πηγών των υλικών σε μία μηχανή, σχετίζεται με τα δομικά της στοιχεία. Από την άλλη, η ενέργεια που καταναλώνει μία μηχανή κατά τη διάρκεια της φάσης χρήσης της, σχετίζεται έντονα με την κίνηση των κινητών δομικών στοιχείων και στις κινήσεις τοποθέτησης, και στις κινήσεις κατεργασίας.

Επιπλέον, σύμφωνα με μία μελέτη του κατασκευαστή εργαλειομηχανών NicolasCorrea, η περίοδος χρήσης μίας μηχανής αναπαριστά περισσότερο από το 90% της συνολικής επίδρασης που σχετίζεται με τις μηχανές τους. Το σχήμα 2.1 δείχνει γραφικά και αριθμητικά (υπό τη μορφή ανάλυσης του κύκλου ζωής, ή LCA), την συνολική επιρροή που σχετίζεται με το μέσο μεσαίο/μεγάλο μέγεθος μηχανής του NicolasCorrea καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της.

Αποδεχόμενοι συνεπώς το μεγαλύτερο τμήμα της περιβαλλοντικής επίδρασης της εργαλειομηχανής σχετίζεται με τις κινήσεις των κινούμενων στοιχείων της, η μείωση κάθε γραμμάριου υλικού σε αυτά τα κινητά δομικά στοιχεία, θα έχουν καθοριστικό ρόλο στην τελική οικολογική επίδραση της εργαλειομηχανής.

Το συμπέρασμα είναι πως η δομή μίας μηχανής παίζει έναν ρόλο κλειδί στις τελικές λειτουργίες της παραγωγικότητας, της ακρίβειας και της οικολογικής αποδοτικότητας αυτής της μηχανής. Οι επόμενες ενότητες θα εξηγήσουν διαφορετικές στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συλληφθούν και να παραχθούν οι δομές των μηχανών που επιτυγχάνουν κατάλληλες τιμές παραγωγικότητας και ακρίβειας υπό τη μορφή καλής θερμικής και δονητικής συμπεριφοράς, που συνδυάζεται με χαμηλές ποσότητες κινούμενων μαζών.



Σχήμα 2. 1 – LCA μηχανής από τον NicolasCorrea

## 2.2 Βελτιωμένες Δομές Μηχανών

Οι εργαλειομηχανές παρέχουν μία σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και του εξαρτήματος που πρόκειται να κατεργαστεί. Όσον αφορά αυτές τις κινήσεις, οι μηχανές φραιζαρίσματος έχουν τρεις Καρτεσιανές κινήσεις, με τουλάχιστον δύο από τους άξονες να τοποθετούνται σε σειρά. Σε μερικές περιπτώσεις, οι τρεις κινήσεις εφαρμόζονται στο εργαλείο; σε άλλες περιπτώσεις οι κινήσεις διαιρούνται στο εργαλείο και στο εξάρτημα, και μόνο σε μερικές περιπτώσεις οι τρεις κινήσεις εφαρμόζονται στο εξάρτημα, επειδή είναι αρκετά ασυνήθιστο να κινηθεί κάθετα η τράπεζα πάνω στην οποία έγκειται το εξάρτημα. Επιπλέον, είναι αυξητικά κοινό για τους κατασκευαστές μηχανών να προσθέτουν δύο επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στην μηχανή, είτε στην κουκουβάγια του τόνου, είτε στην τράπεζα, ή και στα δύο. Γίνονται συνεπώς μηχανές με πέντε βαθμούς ελευθερίας, π.χ. μηχανές φραιζαρίσματος πέντε αξόνων.

Η δομή μίας μηχανής καλύπτει τα στοιχεία που επιτρέπουν την επίτευξη των βαθμών ελευθερίας. Αυτά τα στοιχεία είναι κυρίως δύο τύποι:

**Το πλαίσιο και βάση (bed).** Αποτελούν το στατικό μέρος της μηχανής. Το πλαίσιο συνιστά το βασικό σώμα της δομής, στο οποίο το «bed» είναι η σταθερή βάση της μηχανής. Το πλαίσιο συνήθως συντίθεται από πολλά βιδωμένα ή συγκολλημένα στοιχεία.

**Τα δομικά στοιχεία.** Είναι τα κινητά εξαρτήματα της δομής της μηχανής, και διασυνδέονται σε διαμορφώσεις διαφορετικού πλαισίου. Οι διεπιφάνειες μεταξύ των στοιχείων με σχετική κίνηση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο άκαμπτη και υψηλής απόσβεσης κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης προς την ολισθηρή.

Για μία ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφορετικών δομών μηχανής, είναι χρήσιμο να διαιρεθούν οι προσεγγίσεις του δομικού σχεδίου σε δύο ομάδες: στις διαμορφώσεις ανοιχτού-βρόχου (παραδείγματα στο Κεφάλαιο 1, Εικόνες 1.25 και 1.27) και στις διαμορφώσεις κλειστού-βρόχου (Κεφάλαιο 1, Εικόνες 1.9b και 1.22). Η βασική εννοιολογική διαφορά μεταξύ τους είναι πως στην περίπτωση ανοιχτού βρόχου, η επεξεργασία και οι εσωτερικές δυνάμεις οδηγούνται στο έδαφος μέσω ενός μόνο δομικού δρόμου. Στην έννοια κλειστού βρόχου, οι δυνάμεις οδηγούνται στο έδαφος με πολλούς τρόπους.

Για τις διαδρομές της ίδιας μηχανής, το βασικό πλεονέκτημα της έννοιας ανοιχτού βρόχου, με σεβασμό προς εκείνη του κλειστού βρόχου, είναι η εύκολη πρόσβαση στην ζώνη εργασίας, στο χαμηλότερο κόστος. Αλλιώς, η έννοια κλειστού βρόχου, παρουσιάζει μία υψηλότερη ακαμψία στο εργαλείο και συμμετρική συμπεριφορά με σεβασμό στα θερμικά και μηχανικά φορτία.

Τέλος, τα βασικά δομικά στοιχεία σε μία έννοια ανοιχτού βρόχου είναι η βάση (Bed), η τράπεζα, η στήλη και το έμβολο, που συνδέονται με οδηγούς ολίσθησης. Στην έννοια κλειστού βρόχου, τα κύρια δομικά στοιχεία είναι η τράπεζα, η γέφυρα και οι οδηγοί. Καθένα από τα συσχετιζόμενα στοιχεία, σε καθεμία από τις έννοιες, μπορεί να είναι είτε κινητό ή σταθερό, π.χ. η στήλη θα είναι κινητή σε μερικές μηχανές και στατική σε άλλες, και το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία. Πράγματι, οι διαφορετικές σχετικές κινήσεις μεταξύ αυτών των δομικών υλικών θα προσδιορίσουν τις διαφορετικές αρχιτεκτονικές και διαμορφώσεις των μηχανών.

### 2.2.1 Σύγκριση Μεταξύ Διαφορετικών Διαμορφώσεων Μηχανών

Εκτός από τα γενικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις δομές ανοιχτού και κλειστού βρόχου που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχουν μερικοί κανόνες που δηλώνουν ποια είναι η καλύτερη λύση να επιλέξουν για μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική και να προσδιορίσουν τις

σχετικές κινήσεις μεταξύ των στοιχείων. Υπάρχουν μερικοί γενικοί κανόνες που περιγράφονται εδώ, που μπορούν να βοηθήσουν τον σχεδιαστή να επιλέξει την κατάλληλη διαμόρφωση μηχανής:

Οι συμμετρικές διαμορφώσεις οδηγούν σε κλίσεις χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως και στην μείωση της κάμψης.

Η προεξοχή στοιχείων τύπου cantilever πρέπει να είναι όσο πιο κοντή γίνεται. Πράγματι, τα στοιχεία cantilever είναι τα πιο κρίσιμα στοιχεία από μηχανική άποψη, αφού παράγουν σφάλματα τύπου Abbe (δείτε Ενότητα 6.2.3), στην οποία ενισχύεται μία γωνιακή συμμόρφωση σαν γραμμικό σφάλμα από το αποτέλεσμα πολλαπλασιασμού. Πολλές μηχανές συμπεριλαμβάνουν ένα στοιχείο εμβόλου, που αποτελεί πάντα μία πηγή ευκαμψίας (μηχανές στο Κεφάλαιο 1, Εικόνες 1.21 και 1.33). Η προεξοχή αυτού του κινούμενου στοιχείου εξαρτάται από το σημείο κατεργασίας, έτσι είναι ένα μεταβλητό στοιχείο ακαμψίας.

Το μήκος του μονοπατιού από το εργαλείο στο κομμάτι επεξεργασίας μέσω της δομής πρέπει να είναι ελάχιστο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των θερμικών και ελαστικών δομικών βρόχων. Όσο πιο λίγο είναι το υλικό που διαχωρίζει τα εξαρτήματα των δομικών στοιχείων της μηχανής, που κρατούν το εργαλείο και το εξάρτημα, τόσο πιο γρήγορα θα φτάσει η μηχανή μία σταθερή ισορροπία.

Με αυτούς τους βασικούς κανόνες, και λαμβάνοντας υπόψη πως δεν υπάρχει μία μοναδική βέλτιστη αρχιτεκτονική, η εργασία σχεδιασμού θα εστιάσει στο να κάνει τα στοιχεία της επιλεγμένης διαμόρφωσης όσο άκαμπτα και ελαφριά γίνεται, όπως και σε άλλες εκτιμήσεις όπως είναι το κόστος, η ευκολία συναρμολόγησης, η προσβασιμότητα της ζώνης εργασίας, το αποτύπωμα και τον συνολικό χώρο που καταλαμβάνεται από την μηχανή.

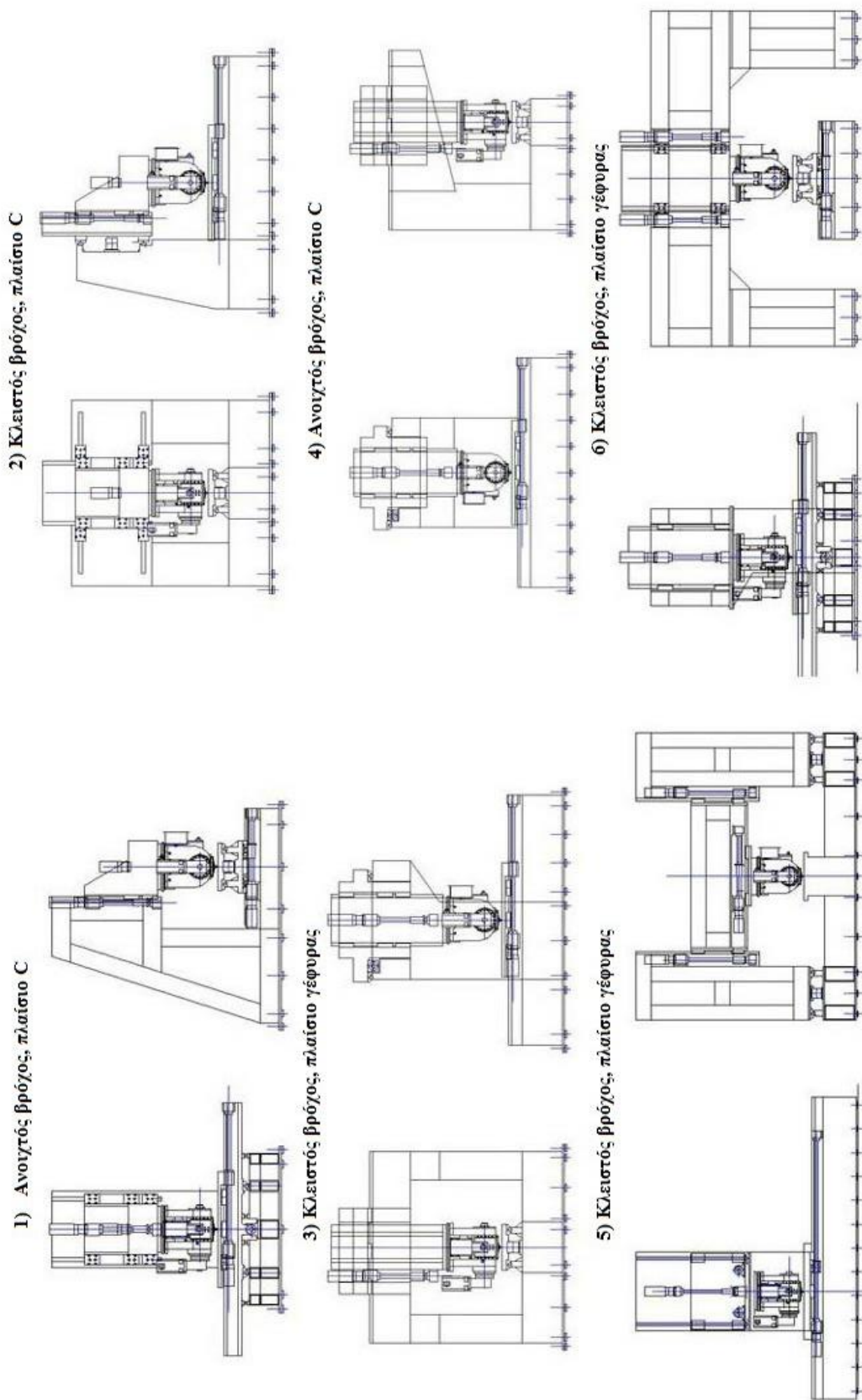
Το σχήμα 2.2 δείχνει τις διαφορετικές αρχιτεκτονικές που λαμβάνει υπόψη του ένας κατασκευαστής μηχανών, όταν σχεδιάζει μία υβριδική, βαρέως τύπου μηχανή φραιζαρίσματος και μία μηχανή τριβής συγκόλλησης ανάδευσης (FSW). Η εταιρία μελέτησε έξι αρχιτεκτονικές, προσδιορίζοντας επτά δείκτες, για να επιτρέψει ένα άρτιο ζύγισμα των ελαττωμάτων και των πλεονεκτημάτων κάθε αρχιτεκτονικής. Οι επτά δείκτες που θεωρήθηκαν ήταν οι ακόλουθοι: i) η ακαμψία του άκρου του εργαλείου, ii) το κόστος, iii) η προσβασιμότητα, iv) η ευκαμψία, v) η ομογενοποιημένη και συμμετρική συμπεριφορά, vi) ο κατειλημμένος χώρος και vii) η ασφάλεια του τελικού χρήστη. Επιπλέον, λόγω των εξαιρετικά υψηλών δυνάμεων που σχετίζονται με τις διαδικασίες FSW, οι οποίες είναι περισσότερες από το διπλάσιο των δυνάμεων των διαδικασιών φραιζαρίσματος βαρέως τύπου, ο κατασκευαστής της μηχανής κατέταξε ως «πιο σημαντικό» το χαρακτηριστικό της ακαμψίας, και μετά από αυτό, τα χαρακτηριστικά του κόστους και του κινδύνου (ρίσκου), και κατέταξε ως «λιγότερο σημαντικά» την ευελιξία της μηχανής και τον χώρο που καταλαμβάνει η μηχανή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των έξι θεωρούμενων αρχιτεκτονικών ήταν:

- *Δομή C*, με μία σταθερή στήλη, και σταυρωτές διαφάνειες πάνω στις οποίες κινείται η τράπεζα στους Χ και Υ, και το κάθετο έμβολο στον Ζ.
- *Δομή σταθερής γέφυρας*, με μία κινούμενη τράπεζα στον Χ και σταυρωτές διαφάνειες στους άξονες Υ και Ζ του εργαλείου.
- *Δομή σταθερής γέφυρας*, με μία κινούμενη τράπεζα στον Χ, μία κινούμενη διαφάνεια στον Υ και ένα κάθετο ενσωματωμένο έμβολο στον Ζ.
- *Δομή C με μία σταθερή στήλη*, μία κινητή τράπεζα στον Χ, και μία κινητή ενσωματωμένη διαφάνεια στον Υ και κάθετο έμβολο στον Ζ.
- *Δομή κινούμενης γέφυρας*, με μία σταθερή τράπεζα, κινούμενη γέφυρα στον Χ, ενσωματωμένη κινητή διαφάνεια στον Υ και κάθετη κινητή τραβέρσα στον Ζ.
- *Δομή σταθερής γέφυρας*, με κινητή τράπεζα στον Χ, κινητή ενσωματωμένη διαφάνεια στον Υ και κάθετο έμβολο στον Ζ.

Το βασικό συμπέρασμα αυτής της συγκριτικής μελέτης ήταν πως το νούμερο 5 παρήγαγε την πιο άκαμπτη αρχιτεκτονική. Η πιο οικονομική λύση ήταν του νούμερο 1, το οποίο παρείχε επίσης την λύση της πιο προσπελάσιμης επιφάνειας εργασίας. επιπλέον, η πιο ομογενοποιημένη συμπεριφορά φάνηκε να είναι στις λύσεις 5 και 6, που και οι δύο παρείχαν επίσης την πιο ασφαλή λύση. Τέλος, δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές όσον αφορά στον χώρο που καταλαμβάνει κάθε λύση.

Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κατάταξης από το 1 έως το 4 (όπου 1 σημαίνει «φτωχή απόδοση» και το 4 «εξαιρετική απόδοση») τα βασικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης:



Σχήμα 2. 2 – Διαφορετικές αρχιτεκτονικές μηχανών για μία υβριδική μηχανή φραιζαρίσματος και FSW

**Πίνακας 2.1** – Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αρχιτεκτονικών μηχανής.

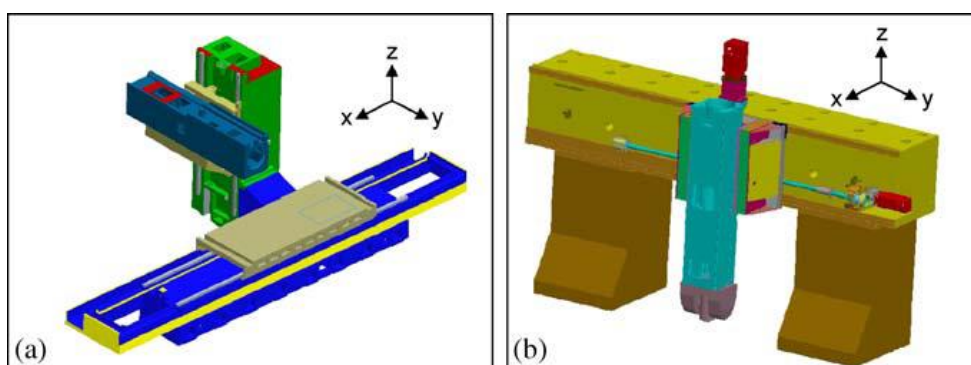
	Αρχιτεκτονική μηχανής					
	1	2	3	4	5	6
Ακαμψία	1.0	2.0	2.5	2.0	4.0	1.0
Κόστος	4.0	2.0	1.5	3.0	2.0	2.5
Προσβασιμότητα	4.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.5
Ευελξία	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	3.0
Ομοιογενής συμπεριφορά	3.0	1.0	2.0	1.0	4.0	4.0
Κατειλημμένος χώρος	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Κίνδυνος	3.0	1.0	2.0	1.0	4.0	4.0

Στην περίπτωση επιλογής ικανοποιητικής αρχιτεκτονικής της μηχανής, για μία επεξεργασία φραιζαρίσματος βαρέως τύπου και FSW, και λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή σημασία της ακαμψίας για αυτές τις επεξεργασίες, η επιλεγμένη αρχιτεκτονική ήταν η 5<sup>η</sup>.

## 2.2.2 Δομικά Στοιχεία στις Δομές Μηχανών

Το σχήμα 2.3 δείχνει δύο μηχανές κατασκευασμένες από τον NicolasCorrea. Το σχέδιο στο σχήμα 2.3 α απεικονίζει μία μηχανή τύπου C: μία ασύμμετρη, ανοιχτού βρόχου μηχανή, με μία σταθερή στήλη, μία κινητή τράπεζα στον X, μία κινητή εξωτερική διαφάνεια στον Z και ένα κινητό έμβολο στον Y. Το σχέδιο στα δεξιά απεικονίζει έναν τύπο γέφυρας, συμμετρικό, μία μηχανή κλειστού βρόχου, με μία σταθερή γέφυρα, μία κινητή τράπεζα στον X, μία κινητή εξωτερική διαφάνεια στον Y, και ένα κάθετο έμβολο στον Z.

Παρ' όλες τις αξιοσημείωτες διαφορές στις διαστάσεις και στον κατειλημμένο χώρο, οι τιμές ακαμψίας τους στους τρεις άξονες είναι με κάποιον τρόπο παρόμοιες. Συνεπώς, η πληροφορία ενδιαφέροντος συνίσταται στην γνώση των πιο συμβατών στοιχείων της μηχανής, επειδή καθώς τα δομικά στοιχεία είναι περισσότερο σε σειρά, η συνολική συμβατότητα της μηχανής θα είναι μεγαλύτερη από το περισσότερο συμβατό στοιχείο. Επιπλέον, ενισχύοντας την μηχανή, επιτυγχάνεται η μέγιστη επίδραση, όταν το πιο συμβατό στοιχείο έχει ενεργήσει πάνω της.



Σχήμα 2. 3 – Δύο μηχανές του NicolasCorrea: (a) Τύπου C. (b) Τύπου γέφυρας.

**Πίνακας 2.2** – Συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών αρχιτεκτονικών μηχανής.

Μηχανή τύπου C				Μηχανή τύπου γέφυρας			
Στοιχείο	% Στατική συμβατότητα			Στοιχείο	% Στατική συμβατότητα		
	X	Y	Z		X	Y	Z
Έμβολο	49	27	43	Έμβολο	53	42	26
Διαφάνεια	16	12	24	Διαφάνεια	10	30	18
Στήλη	24	31	19	Γέφυρα	35	26	46
Άλλα	11	30	14	Άλλα	2	2	10

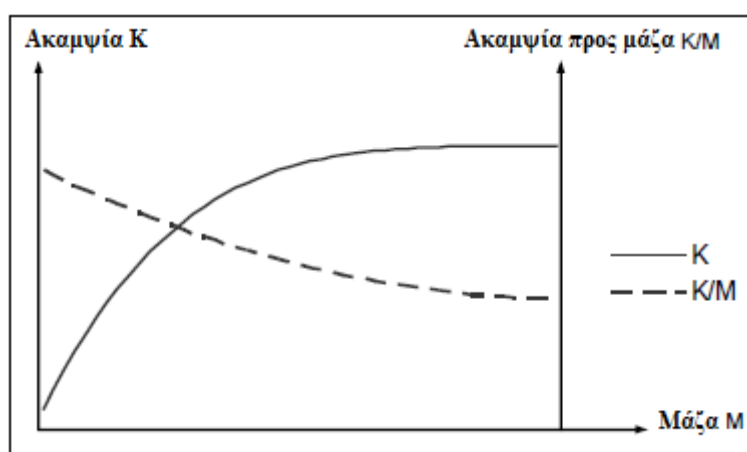
Ο Πίνακας 2.2 δείχνει την κατανομή της συμμόρφωσης μεταξύ των διαφορετικών δομικών στοιχείων της μηχανής.

Τα δεδομένα στον πίνακα αυτό επιβεβαιώνουν πως όσον αφορά στην στατική συμμόρφωση των μηχανών, το έμβολο είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο σε σχεδόν όλες τις κατευθύνσεις και αρχιτεκτονικές. Υπάρχει επίσης μία αξιοσημείωτη επίδραση από την στήλη, με σεβασμό προς τις κατευθύνσεις κάμψης των μηχανών τύπου C. Συνεπώς, η σχεδίαση βελτιωμένων εμβόλων και στηλών για την περίπτωση των μηχανών τύπου C, είναι ένα θέμα ειδικής συνάφειας.

Οι επόμενες ενότητες θα αναλύσουν τους βασικούς κανόνες για τον σχεδιασμό άκαμπτων και ελαφρών εμβόλων και στηλών.

### 2.2.3 Εύρωστα Έμβολα και Στήλες

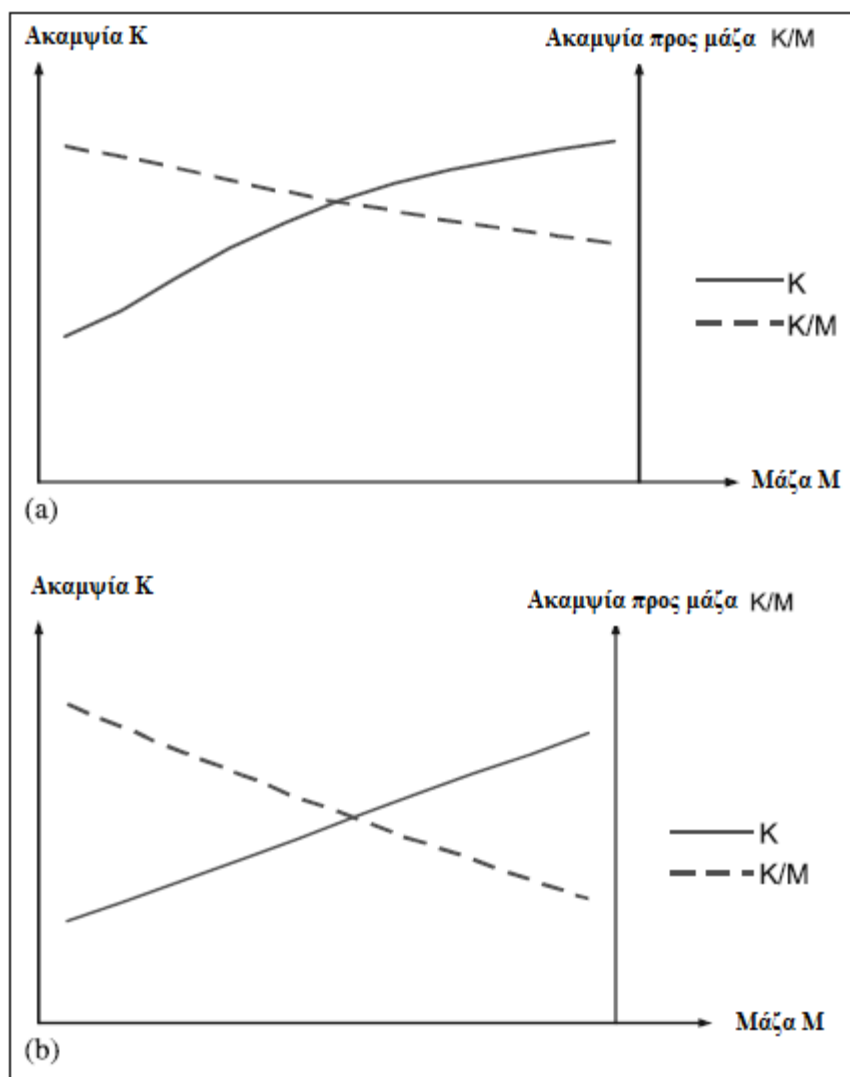
Τα έμβολα και οι στήλες έχουν στις περισσότερες περιπτώσεις ένα τετράγωνο τμήμα, για να επιτυγχάνουν συμμετρική και ισορροπημένη συμπεριφορά, όσον αφορά στην αντίσταση κάμψης και συστροφής. Καθώς το μήκος αυτών των στοιχείων προσδιορίζεται από τις διαδρομές της μηχανής, υπάρχουν δύο σημαντικές όψεις στον σχεδιασμό εμβόλων και στηλών: 1) να προσδιοριστεί το κατάλληλο πάχος για τα εξωτερικά τους τείχη, και 2) να τοποθετηθούν κατάλληλα οι εσωτερικές πλευρές, ως ένα μέσο για να επιτευχθεί μία κατάλληλη αναλογία ακαμψίας προς μάζα.



Σχήμα 2. 4 – Επίδραση του πάχους των τειχών (και της μάζας) στην ακαμψία του εμβόλου.

Όσον αφορά την πυκνότητα των τειχών, διατηρώντας ως μία σταθερά τις εξωτερικές διαστάσεις της δέσμης, αυξάνοντας την πυκνότητα των εξωτερικών τειχών, συνεπάγεται μία αύξηση της ακαμψίας που είναι χαμηλότερη από την αύξηση της μάζας, έτσι ώστε υπερβολικά παχιά εξωτερικά τείχη, δεν αποτελούν μία κατάλληλη λύση από την οπτική της οικολογικής αποδοτικότητας, όπως δείχνει και το σχήμα 2.4. Η πυκνότητα και η μάζα σχετίζονται άμεσα.

Όσον αφορά τις πλευρές, μπορούν να είναι είτε διαμήκεις ή εγκάρσιες. Οι διαμήκεις πλευρές δεν αποτελούν μία κατάλληλη λύση για τα έμβολα και τις στήλες από μηχανικής απόψεως, επειδή για την ίδια ποσότητα μάζας, μία κατάλληλη αύξηση της πυκνότητας των εξωτερικών τειχών επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερης ακαμψίας και για φορτία κάμψης και συστροφής. Συνεπώς, οι διαμήκεις πλευρές δεν αποτελούν κατάλληλη λύση σύμφωνα με την αναλογία ακαμψίας προς μάζα.



Σχήμα 2. 5 – (α) Επίδραση της πυκνότητας των εγκάρσιων πλευρών στην ακαμψία ενός εμβόλου. (β) Επίδραση του αριθμού των εγκάρσιων πλευρών στην ακαμψία ενός εμβόλου.

Ανόμοια με τις διαμήκεις πλευρές, οι εγκάρσιες βελτιώνουν κατάλληλα την μηχανική συμπεριφορά των εμβόλων και των στηλών, σχετικά με την αντίσταση τους στην κάμψη και την συστροφή. Έτσι, ένα σημαντικό θέμα όταν σχεδιάζονται στήλες και έμβολα είναι να επιλεγεί η κατάλληλη πυκνότητα αυτών των εγκάρσιων τειχών, όπως και η απόσταση μεταξύ αυτών των τειχών. Σαν αναφορά, για ένα έμβολο μηχανής μέσου όρου με ένα τετράγωνο τμήμα, μία κατάλληλη πυκνότητα για τις εγκάρσιες πλευρές είναι 10mm. Υπάρχει ακόμη ένας κατάλληλος χώρος μεταξύ των εγκάρσιων πλευρών, ο οποίος είναι της τάξης των 230-240mm.

Παρόμοια με την περίπτωση των διαμηκών πλευρών, είτε ένα πλεόνασμα στην ποσότητα των εγκάρσιων πλευρών ή μία υπερβολική πυκνότητα τους, θα αυξήσει την συνολική ακαμψία του εμβόλου ή της στήλης σε ένα χαμηλότερο βήμα από την εμπλεκόμενη μάζα, όπως φαίνεται στα γραφήματα του σχήματος 2.5.

## 2.3 Δομική Βελτιστοποίηση στις Μηχανές

Μία εργαλειομηχανή είναι ένας χωρικός παραποιοητής που πρόκειται να υποστηρίξει υψηλά φορτία λόγω είτε των δυνάμεων κοπής ή των εσωτερικών φορτίων. Η βελτιστοποίηση των συστατικών δομών των μηχανών, αποτελεί μία σημαντική εργασία για τους σχεδιαστές.

### 2.3.1 Μηχανικές Απαιτήσεις για τις Μηχανές Οικολογικής Αποδοτικότητας

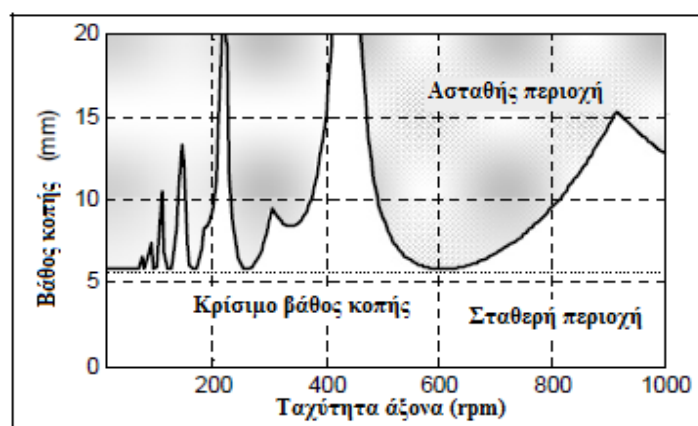
Όταν σχεδιάζεται ένα δομικό στοιχείο της μηχανής, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα της μάζας των κινητών δομών της μηχανής, ενώ οι στατικές και οι δυναμικές μηχανικές ιδιότητες, διατηρούν τις επιθυμητές τιμές κατωφλίου.

Όπως εξηγήθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, η μείωση της κινούμενης μάζας έχει μία εξαιρετική επίδραση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας μηχανής. Έτσι, αξίζει να περάσουμε από μία στρατηγική που βασίζεται στο ότι «όσο πιο άκαμπτη είναι μία μηχανή, τόσο το καλύτερο», σε μία στρατηγική που βασίζεται στο ότι «όσο πιο ελαφριά είναι η μηχανή, τόσο το καλύτερο». Αφού οι πιο ελαφριές μηχανές σημαίνουν λιγότερο άκαμπτες μηχανές, η τελευταία στρατηγική απαιτεί τον ορισμό των ελάχιστων «τιμών κατωφλίου» για την δυναμική και την στατική ακαμψία, έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μία βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της οικολογικής αποδοτικότητας, της παραγωγικότητας και της ακρίβειας.

Με στόχο την συνεισφορά στον ορισμό αυτών των τιμών κατωφλίου για την ακαμψία, ο Πίνακας 2.3 δείχνει τις δυνάμεις της μέσης διαδικασίας, να σχετίζονται με τις λειτουργίες φραιζαρίσματος, κόβοντας ατσάλι AISI 1045, το οποίο έχει μετρηθεί πειραματικά σε διαφορετικές μηχανές και εργαστήρια. Ο Πίνακας 2.3 συλλέγει επίσης τις απαιτήσεις ακριβείας που παρείχαν οι τελικοί χρήστες στην αναφορά της έρευνας.

**Πίνακας 2. 3** – Μέση ισχύς και αποδεκτές παραμορφώσεις για διαφορετικές λειτουργίες φραιζαρίσματος.

Επεξεργασία	Μέση ισχύς στην κατεύθυνση τροφοδοσίας	Αποδεκτή παραμόρφωση
Ξεχόνδρισμα	Συμβατικά εργαλεία 100-125mm διαμ. 1,500 N 3,000 N	Μέσος όρος 100 μm
ημί-φινίρισμα	Συμβατικά εργαλεία 1,000 N	Μέσος όρος 50 μm
Φινίρισμα	Συμβατικά εργαλεία 200 N	Μέσος όρος 10 μm



Σχήμα 2. 6 – Παράδειγμα διαγράμματος σταθερότητας λοβού.

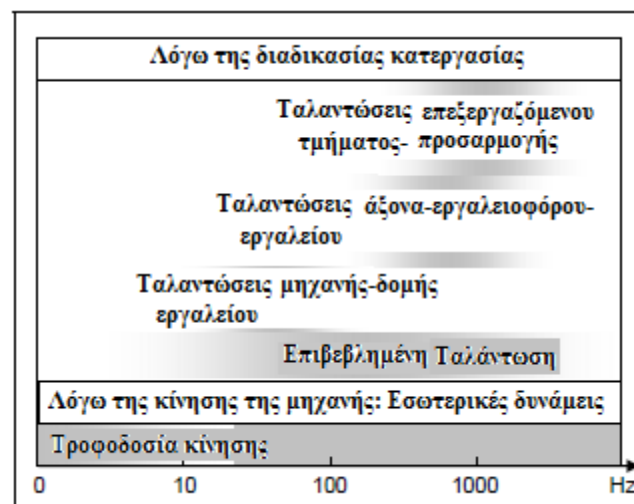
Συνδυάζοντας τις πειραματικές δυνάμεις και τις μέσες απαιτήσεις που προέρχονται από τους τελικούς χρήστες, δηλώθηκε πως μία στατική ακαμψία των 20N/μm στην άκρη του

εργαλείου, μπορεί να θεωρηθεί ως μία τρέχουσα τυπική τιμή κατωφλίου για μηχανές φραιζαρίσματος γενικής χρήσης.

Επιπρόσθετα με τις απαιτήσεις για στατική ακαμψία, η δυναμική ακαμψία είναι επίσης ένα θέμα ειδικής θεώρησης. Πράγματι, αρχικός σκοπός είναι να προσδιοριστούν οι διαστάσεις και το σχήμα των δομικών στοιχείων των εργαλειομηχανών. Για ένα ακριβή προσδιορισμό των τιμών κατωφλίου για δυναμική ακαμψία, η καλύτερη διαθέσιμη χρησιμότητα, είναι η σταθερότητα των διαγραμμάτων λοβού.

Το διάγραμμα των λοβών σταθερότητας, είναι ένα σχέδιο που διαχωρίζει τις σταθερές με τις μη σταθερές λειτουργίες κατεργασίας, για διαφορετικές ταχύτητες του άξονα. Οι σταθερές κοπές συμβαίνουν στην περιοχή κάτω από τα όρια σταθερότητας, ενώ οι ασταθής κοπές (chatter) συμβαίνουν στην περιοχή πάνω από τα όρια σταθερότητας. Ένα παράδειγμα σταθερών και ασταθών περιοχών φαίνεται στο σχήμα 2.6. Στο Κεφάλαιο 3, εξηγούνται οι τρέχουσες μέθοδοι παροχής αυτών των διαγραμμάτων. Οι λοβοί σταθερότητας είναι λειτουργίες δυναμικής ακαμψίας στο σημείο κέντρου του εργαλείου (TCP), στην γεωμετρία του εργαλείου, την ακτινική εμβάπτιση του εργαλείου μέσα στο υλικό, όπως και του υλικού που πρόκειται να κατεργαστεί.

Οι κατασκευαστές μηχανών και οι χρήστες, διακρίνουν δύο τύπους κραδασμών, τους λεγόμενους «δομικούς κραδασμούς» ή «κραδασμούς μηχανής», οι οποίοι είναι κραδασμοί χαμηλών συχνοτήτων, και τους λεγόμενους «κραδασμούς εργαλείου», οι οποίοι εμφανίζονται σε υψηλότερες συχνότητες. Στην πρώτη περίπτωση, αναγνωρίσιμη για την χαμηλή συχνότητα ήχου, ο κραδασμός σχετίζεται με τους δομικούς τύπους της μηχανής, και φαίνεται στο σχήμα 2.7. Στην τελευταία περίπτωση, αναγνωρίσιμη για ήχο υψηλής συχνότητας, ο κραδασμός σχετίζεται με τους τύπους του εργαλείου ή του άξονα. Ο τύπος του κραδασμού εξαρτάται από τις συχνότητες κοπής που διεγείρουν τους δομικούς τύπους, και οι υψηλές συχνότητες κοπής διεγείρουν τους τύπους άξονα-εργαλειοθήκης-εργαλείου.



Σχήμα 2.7 – Θεώρηση των κύριων πηγών ταλάντωσης σε μία φραιζα.

Επομένως, ο στόχος μίας βελτιστοποιημένης μηχανής, είναι να εξασφαλιστεί ένα αποδεκτό κρίσιμο βάθος κοπής σε κάθε κατεύθυνση κοπής, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη κινητή μάζα. Συμπερασματικά, η «ελάχιστη στατική ακαμψία» που αναφέρθηκε στην αρχή αυτής της ενότητας και το «ελάχιστο κρίσιμο βάθος κοπής» που αναφέρθηκε λίγο πιο πάνω, αποτελούν τις δύο τιμές κατωφλίου που θεωρούνται στον σχεδιασμό της μηχανής. Αυτό εξασφαλίζει πως μία οικολογικά αποδοτική και ελαφριά μηχανή είναι συγχρόνως αρκετά παραγωγική και ακριβής.

Η μηχανική μοντελοποίηση της μηχανής είναι ένα κλειδί υπολογισμού της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς μίας μηχανής. Τα μοντέλα που βασίζονται στην μέθοδο πεπερασμένου στοιχείου (FEM) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα, και θα εξηγηθούν στην επόμενη ενότητα.

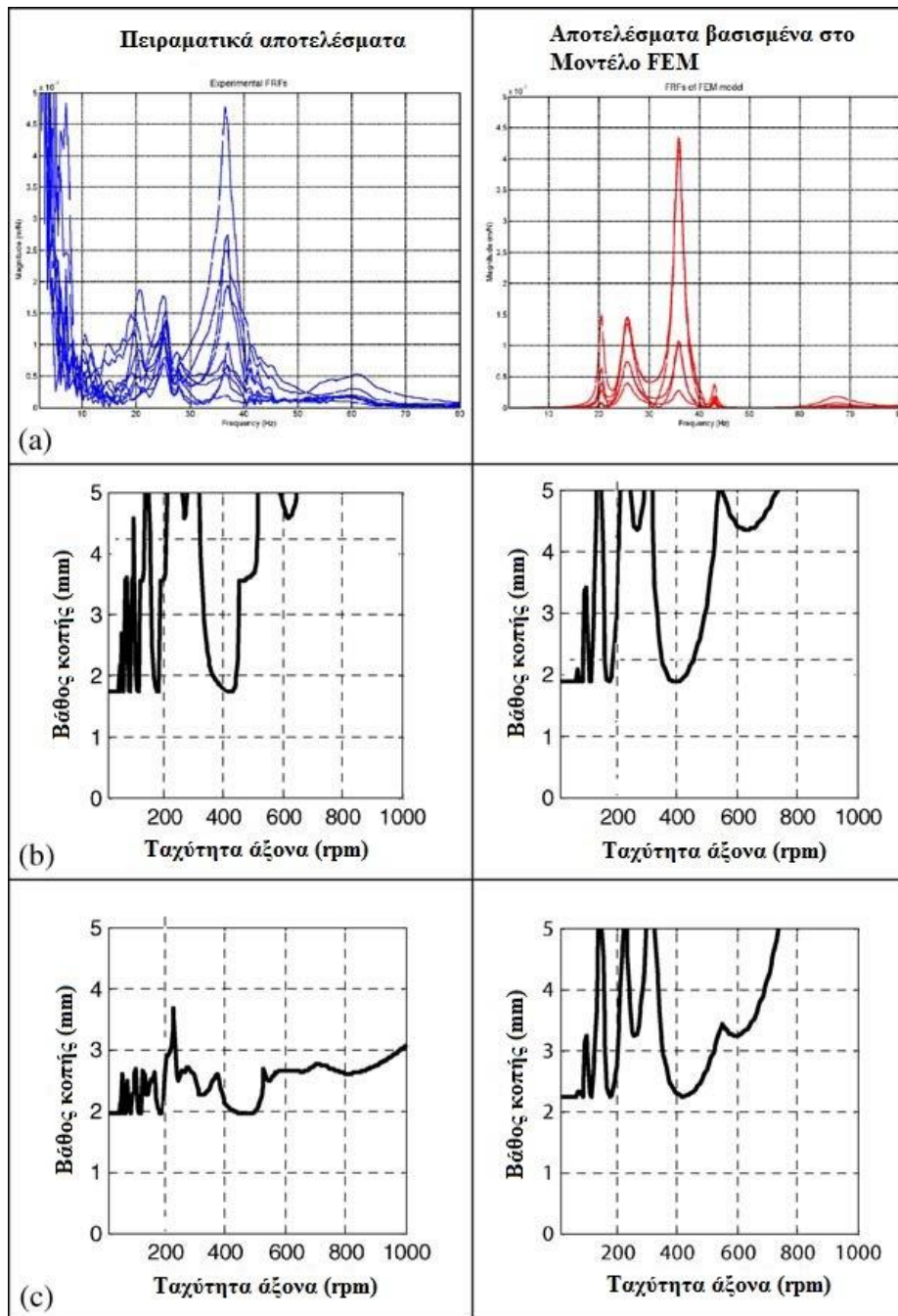
### 2.3.2 Μοντελοποίηση FEM

Η μοντελοποίηση FEM στοχεύει σε μία προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της μηχανικής δομής, συναρμολογώντας ευδιάκριτα και απλά στοιχεία μέσω κόμβων. Οι μηχανικές αναλύσεις που διεξάγονται σε μία εργαλειομηχανή υπό τη μορφή ανάλυσης FEM, καλύπτει τρία στάδια:

- Την ανάλυση στατικών παραμορφώσεων και εντάσεων σε μία δομή που ενέχεται στατικές δυνάμεις.
- Την ανάλυση των φυσικών συχνοτήτων και των τύπων της δομής της μηχανής.
- Την ανάλυση της δυναμικής σταθερότητας της διαδικασίας κοπής, υπό τη μορφή διαγραμμάτων λοβού αναλυτικής σταθερότητας. Το FEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί εδώ ως ένα εργαλείο υπολογισμών για την αποτίμηση της λειτουργίας απόκρισης της συχνότητας (FRF), αντί να χρησιμοποιηθεί η πειραματική ιδιομορφική ανάλυση.

Με την FEM, η πιο περίπλοκη άποψη είναι πως σχετίζονται με τις επαφές μεταξύ των δομικών στοιχείων κατά μήκος των βαθμών ελευθερίας, στις οποίες η ακαμψία, η αντίδραση και η τριβή έχουν μία καθοριστική επίδραση στην απόσβεση της μηχανής. Περισσότερη από το 90% της απόσβεσης σε μία εργαλειομηχανή, έρχεται από τους βιδωμένους συνδέσμους και από τις επαφές στις διαδρομές οδήγησης. Εν προκειμένω, η πειραματική ιδιομορφική ανάλυση επιτρέπει τη μέτρηση των φυσικών συχνοτήτων και τύπων μίας ήδη δομημένης μηχανής, και πάνω από όλα, επιτρέπει την μέτρηση των συσχετιζόμενων συντελεστών απόσβεσης, οι οποίοι αποτελούν την παράμετρο που είναι πιο δύσκολο να εκτιμηθεί. Οι πειραματικές δυναμικές παράμετροι, επιτρέπουν την βαθμονόμηση των μοντέλων FEM που είχαν αναπτυχθεί στην φάση σχεδιασμού.

Τα αναβαθμισμένα μοντέλα FEM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν τους λοβούς αναλυτικής σταθερότητας της μηχανής. Το [σχήμα 2.8a](#) δείχνει τις πραγματικές (αριστερά) και μοντελοποιημένες FEM (δεξιά) των FRF μίας φραιζας στο TCP. Οι Εικόνες 2.8b και c δείχνουν τους λοβούς σταθερότητας που σχετίζονται με προηγούμενες FRF, για επιπεδοποίηση 45° και 225°, όσον αφορά τους άξονες μηχανής. Τα πειραματικά δεδομένα που φαίνονται στο αριστερό μέρος του γραφήματος, έχουν επιτευχθεί για ένα συγκεκριμένο εργαλείο και ένα συγκεκριμένο υλικό κατεργασίας. Η δεξιά μεριά δείχνει τα ίδια διαγράμματα σταθερότητας λοβού, με την μόνη διαφορά να έγκειται στο ότι στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα έχουν ληφθεί από μία μηχανή μοντελοποιημένου FEM, στην οποία η απόσβεση που σχετίζεται με κάθε τύπο, έχει αποκτηθεί μία πειραματική ιδιομορφική ανάλυση σε μία ήδη δομημένη μηχανή.



Σχήμα 2. 8—(a) Πειραματικά και FEMFRF. (b) Αντίστοιχοι λοβοί σταθερότητας στην κατεύθυνση τροφοδοσίας 0°. (c) Αντίστοιχοι λοβοί σταθερότητας στην κατεύθυνση τροφοδοσίας των 270°.

Όπως φαίνεται, υπάρχει μία καλή προσέγγιση στην περίπτωση των 0°, και ένα σφάλμα 30% στην περίπτωση των 270°. Αλλιώς, κατά το διάγραμμα μοντελοποιημένου FRF και της σταθερότητας λοβών, δείχνουν ένα αποδεκτό επίπεδο σύμπτωσης με πειραματική FRF και λοβούς σταθερότητας. Το πλεονέκτημα που σχετίζεται με τα μοντελοποιημένα διαγράμματα, είναι ότι τα μοντέλα μηχανής ενεργοποιούν μία εκτίμηση της επίδρασης των μηχανικών και αρχιτεκτονικών αλλαγών, πάνω στην σταθερότητα της διαδικασίας κοπής. Συνεπώς, είναι δυνατός ο έλεγχος πολλών σχεδιαστικών προσεγγίσεων για να ελαφρύνει μία συγκεκριμένη μηχανή, και συγχρόνως να αξιολογηθεί πως οι στοχευόμενες τιμές παραγωγικότητας επίσης επιτυγχάνονται.

### 2.3.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση

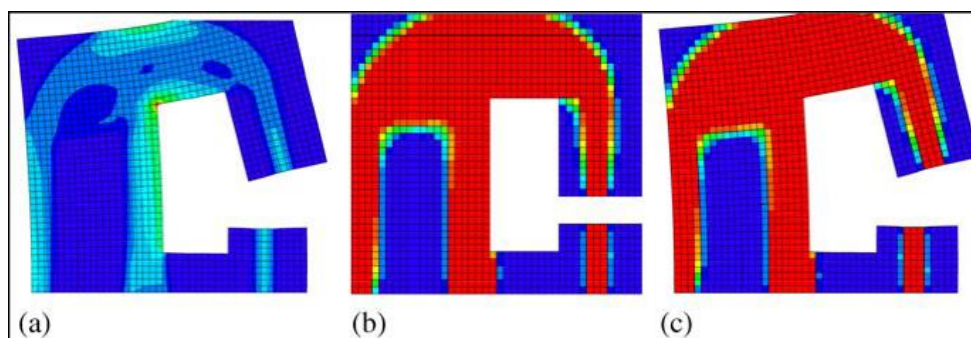
Όπως φάνηκε και στις προηγούμενες ενότητες, η στατική ακαμψία και το κρίσιμο βάθος κοπής μέσα στα διαγράμματα λοβού, προσφέρουν ποσοτικές και αντικειμενικές παραμέτρους, που επιτρέπουν μία σύγκριση των αποδόσεων μεταξύ διαφορετικών εννοιών μηχανής και πάνω από όλα, επιτρέπουν τον καθορισμό ελάχιστων κατωφλίων να πραγματοποιηθούν από τις εργαλειομηχανές οικολογικής αποδοτικότητας. Στην πραγματικότητα, η μείωση των μαζών που την ίδια στιγμή επιτρέπουν την υπέρβαση των τιμών κατωφλίου που προσδιορίστηκαν για εκείνες τις παραμέτρους, θα επιτρέψουν μία βελτίωση για αυτή την εργαλειομηχανή, από την άποψη της οικολογικής αποδοτικότητας.

Εστιάζοντας στην μείωση των κινούμενων μαζών, η τοπολογική βελτιστοποίηση των δομικών στοιχείων αποτελεί κρίσιμο θέμα, επειδή αυτή η βελτιστοποιημένη αναλογία μάζας προς ακαμψία θα είναι το κλειδί για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικές στρατηγικές, για την μείωση των συνολικών μαζών.

Με σκοπό την υποστήριξη αυτού του στόχου, υπάρχουν εμπορικά προγράμματα με αλγόριθμους βελτιστοποίησης που ξεκινούν με ένα δεδομένο δομικό στοιχείο απομάκρυνσης υλικού, πάνω σε αυτό το στοιχείο, μέχρι να μην είναι δυνατή η παραπέρα απομάκρυνση, χωρίς να μειώνονται οι στατικές και δυναμικές ιδιότητες, επιτυγχάνοντας συνεπώς ένα τοπολογικά βελτιστοποιημένο στοιχείο. Αυτό που αποτελεί έναν περισσότερο σημαντικό στόχο των προγραμμάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι η εξασφάλιση πως η τοπολογικά και δυναμικά βελτιστοποιημένη δομή μπορεί να κατασκευαστεί με οικονομικό τρόπο.

Σαν παράδειγμα, το σχήμα 2.9 δείχνει το βελτιστοποιημένο αποτέλεσμα για μία μηχανή πλαισίου C. Αυτή η τυπική δομή, με μία σταθερή υποστήριξη στο ένα της άκρο, και δυνάμεις στο άλλο, έχει χρησιμοποιηθεί για να αναλύσει την απόδοση των εργαλείων βελτιστοποίησης. Αυτό το παράδειγμα δείχνει πως η τοπολογικά βελτιστοποιημένη δομή (Σχήμα 2.9c) διατηρεί σχεδόν την ίδια ακαμψία με την πρωτότυπη, αλλά με πολύ λιγότερο υλικό.

Όσον αφορά στην παραγωγικότητα και την οικονομική σκοπιμότητα αυτών των βελτιστοποιημένων δομών, οι δομές «truss-like», οι οποίες αποτελούν τα πιο συχνά αποτελέσματα αυτών των αυτοματοποιημένων τοπολογικών βελτιστοποιήσεων, παρουσιάζουν μερικές δυσκολίες. Σαν παράδειγμα, οι κοιλότητες μέσα στις δομές είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν. Για να διευκολυνθεί αυτός ο περιορισμός, τα αυτοματοποιημένα προγράμματα συμπεριλαμβάνουν αμοντάριστες λειτουργικότητες που κάνουν δυνατή την κατασκευή, αν και η ανάπτυξη αυτών των εξαρτημάτων είναι πιθανών να οδηγήσει σε χειρότερες στατικές και δυναμικές ιδιότητες ή σε μεγαλύτερες μάζες.



Σχήμα 2. 9—Τοπολογική βελτιστοποίηση μίας μηχανής πλαισίου C. (a) Χάρτης κατανομής πιέσεων. (b) Αποτελέσματα της κατανομής μαζών για την επίτευξη της μέγιστης ακαμψίας. (c) Παραμόρφωση της νέας κατανομής.

## 2.4 Δομικά Υλικά

Όταν σχεδιάζονται δομικά στοιχεία για να επιτευχθούν οικολογικά αποτελεσματικές, ακριβείς και παραγωγικές μηχανές, τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν παίζουν έναν ρόλο κλειδί στις τελικές ιδιότητες των στοιχείων και εκείνων των μηχανών στις οποίες συναρμολογούνται. Τα δομικά υλικά έχουν μία καθοριστική επίδραση στις κινούμενες μάζες, τις στιγμές αδράνειας, την στατική και δυναμική ακαμψία και τις ρυθμιστικές και θερμικές ιδιότητες της μηχανής.

Στον τομέα των εργαλειομηχανών, τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το ατσάλι και ο χυτοσίδηρος, που και τα δύο προσφέρουν εξαιρετική αναλογία ακαμψίας προς μάζα, όπως και καλή αναλογία ποιότητας προς τιμή. Μολαταύτα, υπάρχουν υλικά των οποίων οι ιδιότητες μπορούν να χωρέσουν καλύτερα στις συγκεκριμένες ανάγκες μίας συμπαγούς μηχανής, όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα.

### 2.4.1 Σχετιζόμενες Παράμετροι

Αναφέροντας τις ιδιότητες των υλικών, δείχνονται τα πιο σχετικά χαρακτηριστικά, μαζί με την επίδραση στην συμπεριφορά της μηχανής:

Μέτρα ελαστικότητας  $E$ : Υψηλές τιμές του  $E$  έχουν θετική επίδραση στην στατική και δυναμική ακαμψία της μηχανής.

Η αναλογία του Poisson  $\nu$  και το μέτρο διάτμησης  $G$ : Οι υψηλές τιμές και για τα δύο είναι μία θετική επίδραση στην στρωφική ακαμψία της μηχανής.

Πυκνότητα  $\rho$ : Οι χαμηλές τιμές πυκνότητας μεταξύ των κινητών δομών έχουν μία θετική επίδραση στις δυναμικές ιδιότητες της μηχανής, όπως και στο εύρος ζώνης των βρόχων ελέγχου, και συγχρόνως οι υψηλές τιμές της πυκνότητας έχουν μία θετική επίδραση στα στατικά στοιχεία της δομής, π.χ., στα πλαίσια και στις βάσεις.

Συντελεστής Θερμικής διαστολής  $\alpha$ : Οι υψηλές τιμές του  $\alpha$ , έχουν μία πολύ αρνητική επίδραση στην γεωμετρική ακρίβεια της μηχανής, έτσι ώστε η χαμηλότερη δυνατή τιμή να είναι επιθυμητή για κάθε περίπτωση.

Συγκεκριμένη ικανότητα θερμότητας  $c$ : Η χαμηλή ή υψηλή τιμή του  $c$ , είναι είτε θετική ή αρνητική για το ίδιο. Πράγματι, οι υψηλές τιμές του  $c$  κάνουν τις μηχανές θερμικά σταθερές στις αλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Συγχρόνως, οι υψηλές τιμές του  $c$ , σημαίνουν πως οι μηχανές κάνουν πολλή ώρα να φτάσουν σε μία σταθερή κατάσταση αφού έχουν ενεργοποιηθεί, έτσι ώστε απαιτείται η ανταλλαγή μεταξύ αυτών των αντίθετων αποτελεσμάτων. Όσον αφορά σε αυτό, οι χρήστες των μηχανών προτιμούν τις θερμικά εύρωστες μηχανές όταν αντιμετωπίζουν περιβαλλοντικές αλλαγές, αν και για να επιτύχουν σταθερές συνθήκες θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι επιθυμητή μία υψηλή τιμή του  $c$ .

Θερμική αγωγιμότητα  $k$ : Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, η χαμηλή ή υψηλή τιμή του  $k$ , είναι είτε θετική ή αρνητική για το ίδιο. Πράγματι, οι τιμές του  $k$  κάνουν τις θερμοκρασίες της μηχανής να γίνονται γρήγορα ομοιογενείς σε ολόκληρη την μηχανή, συνεπώς αποφεύγοντας τις μερικές και μη-συμμετρικές επιμηκύνσεις στην μηχανή. Συγχρόνως, οι υψηλές τιμές του  $k$  κάνουν τις μηχανές να θερμαίνονται με την παρουσία μη επιθυμητών πηγών θερμότητας όπως κινητήρων κλπ., έτσι ώστε απαιτείται ανταλλαγή μεταξύ των δύο αυτών αντίθετων αποτελεσμάτων. Οι χρήστες των μηχανών συχνά προτιμούν τις θερμικά εύρωστες μηχανές, αν και οδηγούν σε συγκέντρωση της θερμότητας στην μηχανή, έτσι ώστε στην περίπτωση αυτή, να είναι επιθυμητή μία χαμηλή τιμή του  $k$ . Μία πιθανότητα ανταλλαγής μεταξύ αυτών των δύο αντίθετων αποτελεσμάτων, είναι να

υπάρχουν υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα  $k$  και παράλληλα να απομονώνουν τις πηγές θερμότητας ή να εκκενώνουν τη θερμότητα με συστήματα ψύξης.

Υλική και δομική απόσβεση: Υψηλές τιμές απόσβεσης έχουν θετική επίδραση στις δυναμικές ιδιότητες της μηχανής, όπως και της παραγωγικότητας, επειδή οι υψηλές τιμές απόσβεσης υποδηλώνουν πως οι λοβοί σταθερότητας αυξάνονται για μία δεδομένη ταχύτητα κοπής. Αυτές οι ιδιότητες αναλύονται για πολλά υλικά και ταξινομούνται σε δύο ομάδες, στα κοινά δομικά υλικά και στα καινοτόμα υλικά.

## 2.4.2 Συμβατικά Υλικά για Δομικά Στοιχεία

Τα πιο τυπικά υλικά για τα δομικά στοιχεία των εργαλειομηχανών είναι, χωρίς αμφιβολία, το ατσάλι και πάνω από όλα ο χυτοσίδηρος. Το ατσάλι είναι κοινώς χρησιμοποιούμενο δομές συγκόλλησης; ενώ για τον χυτοσίδηρο, οι πιο κοινές λύσεις είναι οι χυτεύσεις στο πυρόχωμα που λαμβάνεται από τον γκρι χυτοσίδηρο και τον σφαιροειδή γραφίτη (όλκιμο) χυτοσίδηρο. Μερικά εξαρτήματα όπως το προστατευτικό κάλυμμα της κουκουβάγια του τόννου, είναι φτιαγμένα από χυτό χάλυβα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των συμβατικών υλικών είναι το χαμηλό τους κόστος, σε σύγκριση με άλλα μέταλλα και η πολύ καλή μηχανική κατεργασία τους. Επιπλέον, το ατσάλι υπερέχει, λόγω της υψηλής τιμής του μέτρου ελαστικότητας και της εξαιρετικής του αναλογίας μάζας προς ακαμψία, και ο χυτοσίδηρος έχει μία περισσότερο από απλά αποδεκτή αναλογία υλικού-απόσβεσης, ειδικά όταν συγκρίνεται με το ατσάλι.

**Πίνακας 2. 4 – Ιδιότητες των υλικών βασισμένων στον Fe-C.**

	Ατσάλι	Γκρι χυτοσίδηρος	Όλκιμος χυτοσίδηρος
Μέτρο ελαστικότητας	$2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$0.8\text{--}1.48 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$1.6\text{--}1.8 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
Πυκνότητα	$7,850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$7,100\text{--}7,400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$7,100\text{--}7,400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Αναλογία απόσβεσης	0.0001	0.001	0.0002–0.0003
Συντ. Θερμικής διαστ.	$11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$11\text{--}12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$11\text{--}12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Τα βασικά μειονεκτήματα είναι ο σχετικά υψηλός συντελεστής θερμικής διαστολής, και στην περίπτωση του ατσάλιου, η πολύ χαμηλή αναλογία υλικού-απόσβεσης. Ο Πίνακας 2.4 δείχνει τις κύριες ιδιότητες αυτών των συμβατικών υλικών που βασίζονται σε κράματα Fe-C.

## 2.4.3 Καινοτόμα Υλικά για Δομικά Στοιχεία

Στον τομέα των εργαλειομηχανών, τα υπόλοιπα υλικά, εκτός από το ατσάλι και τον χυτοσίδηρο δεν είναι συμβατικά για δομικά στοιχεία, με πιθανώς μερικές συγκεκριμένες εξαιρέσεις, όπως το αλουμίνιο, ο γρανίτης και το πολυμερές σκυρόδεμα.

### 2.4.3.1 Πολυμερές Σκυρόδεμα ή Μεταλλική Χύτευση

Το πολυμερές σκυρόδεμα είναι ένας συνδυασμός από ανόργανα πληρωτικά, που βαθμολογούνται σύμφωνα με την κατανομή του μεγέθους τους (αλεύρι, άμμος και διαφορετικά χονδράλευρα). Ο συνδυασμός είναι δεμένος χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ρητίνης. Η χύτευση πολυμερών, είναι κατάλληλη για μηχανές ακριβείας λόγω της εξαιρετικά χαμηλής τους διάχυσης, η οποία κάνει αυτό το υλικό πολύ σταθερό και εύρωστο από θερμικής απόψεως. Επιπλέον, η δομική τους απόσβεση είναι παρόμοια με εκείνη του χυτοσιδήρου, αν και η εταιρία Schneeberger ισχυρίζεται πως η χύτευση των μετάλλων της επιτυγχάνει έως 10x καλύτερες τιμές απόσβεσης των δονήσεων από ότι το ατσάλι ή ο χυτοσίδηρος. Ακόμη, τα στοιχεία του χυτού μετάλλου είναι ανθεκτικά στα λάδια, τα ψυκτικά και άλλα διαβρωτικά υγρά. Αυτό το υλικό συμπεριλαμβάνει διαφορετικούς τύπους ενώσεων

και στο κοντινό μέλλον θα αναπτυχθούν και άλλες, οι οποίες θα αυξήσουν την εφαρμογή τους στις εργαλειομηχανές.

#### 2.4.3.2 Γρανίτης

Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, ο γρανίτης είναι κατάλληλος για μηχανές μεγάλης ακρίβειας, όπως οι φρέζες υψηλής ακριβείας και οι μηχανές μετρήσεων, ως αποτέλεσμα της εξαιρετικής σταθερότητας χρόνου των ιδιοτήτων τους και της καλής απόσβεσης του υλικού τους (Πίνακας 2.5).

**Πίνακας 2. 5** – Ιδιότητες πολυμερούς σκυροδέματος και γρανίτη.

	Πολυμερές σκυρόδεμα	Γρανίτης
Μέτρο ελαστικότητας E	$0.4\text{--}0.5 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$0.47 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
Πυκνότητα	$2,300\text{--}2,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$2,850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Αναλογία απόσβεσης	$D = 0.002\text{--}0.03$	$D = 0.03$
Θερμική διαστολή	$11.5\text{--}14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

#### 2.4.3.3 Σύνθετα Ενισχυμένων Ινών

Τα σύνθετα ενισχυμένων ινών έχουν πολύ υψηλές τιμές ενός συγκεκριμένου ορίσματος ελαστικότητας και συγκεκριμένη ισχύ. Εν τούτοις, η ευρεία χρήση των συνθέτων στις εργαλειομηχανές είναι περίπλοκη λόγω μερικών αξιοσημείωτων περιοριστικών παραγόντων, όπως η υψηλή τους τιμή, οι περίπλοκοι σύνδεσμοι τους, και η πολύπλοκη ανακύκλωσή τους. Πράγματι, η τεχνική κοινότητα δεν είναι οικεία με τις κοινές εμπορικές εργαλειομηχανές με εφαρμοσμένα σύνθετα ινών άνθρακα (CFC), και στην πραγματικότητα έχουν σχεδιαστεί μόνο μερικά πειραματικά πρωτότυπα ερευνών. Οι μηχανικές τους ιδιότητες στην κατεύθυνση των ινών συλλέγονται στον Πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2. 6** – Ιδιότητες CFC φτιαγμένων από Prepreg.

	Μεσαία ορίσματα	Υψηλά ορίσματα	Υπέρ-υψηλά ορίσματα
Μέτρο ελαστικότητας	$1\text{--}1.8 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$1.7\text{--}2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$2\text{--}3.7 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
Πυκνότητα	$1,550\text{--}1,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$1,550\text{--}1,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$1,550\text{--}1,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Αναλογία απόσβεσης	$0.001\text{--}0.05$	$0.001\text{--}0.05$	$0.001\text{--}0.05$
Θερμική διαστολή	$12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

#### 2.4.3.4 Υβριδικά Υλικά και Δομές

Οι δομές που χρησιμοποιούν υβριδικά υλικά συνήθως αναπτύσσονται και σχεδιάζονται για συγκεκριμένα στοιχεία. Επιπλέον, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πρώτα τις ακριβείς λειτουργικότητες του εξαρτήματος που είναι να αναπτυχθεί, και στη συνέχεια να βρούμε κατάλληλα τοπολογικά σχήματα, όπως και έναν μακροσκοπικό συνδυασμό των εμπλεκόμενων υλικών. Μία πρακτική στρατηγική είναι να χρησιμοποιήσουμε υλικά χαμηλού κόστους, όπως ατσάλι και χυτοσίδηρο στο μεγαλύτερο μέρος του υλικού, και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουμε μία ελάχιστη ποσότητα υλικών υψηλού κόστους, ώστε τονιστούν οι ιδιότητες του εξαρτήματος, μέσω της υπολογιστικής ανάλυσης.

Στο πεδίο των δομών εργαλειομηχανών, οι παρακάτω υβριδικές δομές είναι ήδη γνωστές:

**Η δομή του χάλυβα συγκόλλησης με γέμισμα πολυμερούς σκυροδέματος:** Ως αναφορά, ο Ισπανός κατασκευαστής εργαλειομηχανών NicolasCorrea έχει αναπτύξει ένα έμβολο φτιαγμένο από ατσάλι και πολυμερές σκυρόδεμα. Αυτό το έμβολο εμφανίζει υψηλή απόσβεση, που έχει παρατηρηθεί στα διαγράμματα σταθερότητας λοβού. Επιπλέον, η

θερμική διάχυση της μηχανής έχει μειωθεί αξιοσημείωτα, γεγονός το οποίο ήταν ένας από τους στόχους του NicolasCorrea με σεβασμό προς τους πελάτες του. Ακόμη, αν και η αναλογία μάζας προς ακαμψία του πολυμερούς σκυροδέματος είναι χειρότερη από του ατσαλιού, έχουν επιτύχει 20% μείωση της μάζας του εμβόλου μέσω των τοπολογικών κανόνων βελτιστοποίησης.

**Η δομή του χάλυβα συγκόλλησης με αφρώδες γόμωση αλουμινίου:** Η ίδια εταιρία ανέπτυξε επίσης ένα έμβολο φτιαγμένο από ατσάλι και αφρώδες αλουμίνιο, συνδυασμός που εμφάνισε υψηλότερη απόσβεση για ολόκληρη την μηχανή. Μολαταύτα, αυτή η αύξηση της απόσβεσης ήταν ούτως ή άλλως χαμηλότερη από την αύξηση που επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται το πολυμερές σκυρόδεμα.

#### 2.4.4 Κόστος Σχεδιασμού των Υλικών και των Δομών

Μία γενική θεώρηση του κόστους αγοράς των υλικών και των ημι-τελειωμένων δομών, όπως είναι οι συγκολλημένες κατασκευές, φαίνεται στον Πίνακα 2.7. Ο πίνακας συνοψίζει τις τιμές των ελάχιστων και μέγιστων δαπανών που βρέθηκαν στην Ευρωπαϊκή αγορά. Επιπλέον, προστέθηκε μία τιμή που ονομάστηκε «συγκεκριμένο κόστος», η οποία περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το κόστος του υλικού και την αξία του συγκεκριμένου ορίσματος. Αυτό αποτελεί ένα ενδιαφέρον κομμάτι πληροφορίας, σημαντικής για το σχεδιασμό των οικολογικά αποδοτικών μηχανών, αφού το υψηλό κόστος του κύκλου ζωής που σχετίζεται με τον χρόνο παραγωγής της μηχανής, προτείνει ανεπιφύλακτα τη χρήση ελαφριών υλικών.

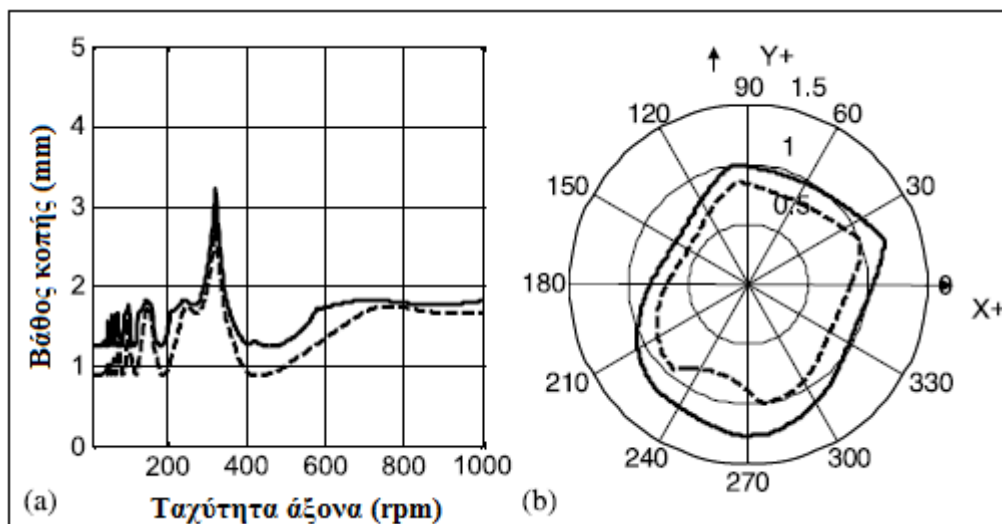
**Πίνακας 2.7 – Κόστος υλικών και δομών κατάλληλων για το σχεδιασμό εργαλειομηχανών.**

Σχεδιασμός υλικών	Κόστος [€/kg]		Συγκ. όρισμα [MPa/kg·m <sup>-3</sup> ]	Συγκεκριμένο κόστος [€/MPa·m <sup>3</sup> ]	
	Ελάχ.	Μεγ.	Μέση τιμή	Ελάχ.	Μεγ.
Δομές συγκολλημένου χάλυβα	3.5	7.0	26.5	0.13	0.27
Γκρι χυτοσίδηρος	2.0	4.0	16.0	0.10	0.37
Σφαιροειδής γραφίτης χυτοσίδηρος	3.0	6.0	23.5	0.12	0.28
Πολυμερές σκυρόδεμα	2.0	5.0	18.5	0.09	0.33
Γρανίτης	3.5	6.0	20.5	0.14	0.36
Τεχνικά κεραμικά	10.0	36.0	107.0	0.07	0.47
CFC, μεσαίου ορίσματος ίνα	110.0	150.0	89.5	0.95	2.40
Υβριδικά υλικά & δομές	21.0	130.0	62.5	0.21	5.20

#### 2.4.5 Η Επιρροή των Καινοτόμων Υλικών στην Παραγωγικότητα

Η συμπερίληψη των υλικών με υψηλή εσωτερική απόσβεση είναι πάντα ενδιαφέρον να αυξάνουν την παραγωγικότητα της μηχανής από την θεώρηση του διαγράμματος σταθερότητας λοβού. Από την άλλη πλευρά, η ισορροπία διάχυσης της εσωτερικής ενέργειας είναι χαμηλή με σεβασμό προς την συνολική διάχυση της ενέργειας της μηχανής.

Το σχήμα 2.10 δείχνει τους λοβούς σταθερότητας μίας μηχανής με κατάσταση δομικού λυγίσματος εμβόλου των 37Hz. Το αρχικό έμβολο, φτιαγμένο από συγκολλημένο χάλυβα, αντικαταστάθηκε από στρώσεις χάλυβα-πολυμερούς σκυροδέματος. Μετά από αυτή την αντικατάσταση υλικού, η ακαμψία της μηχανής, όπως και η συνολική μάζα, παρέμειναν σχεδόν ίδια, ενώ η απόσβεση αυξήθηκε λόγω της επίδρασης του πολυμερούς σκυροδέματος. Τα διαγράμματα σταθερότητας λοβού δείχνουν πως για ένα εργαλείο με διάμετρο 125mm, η αύξηση της απόσβεσης που σχετιζόταν με το πολυμερές σκυρόδεμα, επέτρεψε μία αύξηση στο κρίσιμο βάθος κοπής, σε όλο το φάσμα της ταχύτητας και για όλες τις κατευθύνσεις τροφοδοσίας (δείτε Σχήμα 2.10b).



Σχήμα 2. 10 – Επίδραση της απόσβεσης υλικού στους λοβούς σταθερότητας. (α) Τροφοδοσία στην κατεύθυνση Υ. (β) Πολικός σχεδιασμός του κρίσιμου βάθους κοπής σε κάθε κατεύθυνση.

## 2.5 Ενεργές Συσκευές Απόσβεσης

Στις προηγούμενες ενότητες, η μείωση της μάζας των κινητών στοιχείων μίας μηχανής απέδειξε να είναι ένας παράγοντας κλειδί στην επίτευξη υψηλής οικολογικής αποδοτικότητας. Όπου αφορά στην στατική ακαμψία, ο στόχος είναι να απομακρυνθεί η μάζα που διατηρεί μία τιμή κατωφλίου ακαμψίας, και για την δυναμική ακαμψία, ο στόχος είναι να διατηρήσει την παραγωγικότητα, περιορισμένη από τα διαγράμματα σταθερότητας λοβού, στα οποία οι ελάχιστες τιμές των ορίων σταθερότητας εξαρτάται από την δομική ακαμψία και από το ποσοστό απόσβεσης της μηχανής.

Μέσα σε αυτή την οπτική, μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση σχεδιασμού μίας εργαλειομηχανής, είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφριά και χαμηλής ακαμψίας, ενώ συγχρόνως αυξάνεται η απόσβεση της μηχανής στην σχετική αναλογία. Συνεπώς, τα παθητικά συστήματα επιπρόσθετης απόσβεσης όπως οι διαφάνειες τριβής, βισκοελαστικά υλικά και κολλώδη υγρά, είναι ενδιαφέροντα, όπως και η χρήση των ενεργών συσκευών απόσβεσης (ADDs). Ένα τυπικό ADD αποτελείται από έναν αισθητήρα δόνησης, έναν εσωτερικό ενεργοποιητή και έναν ελεγκτή. Τα ADDs βασίζονται στην αρχή πως μία επιτάχυνση μίας αναστελλόμενης μάζας, αποφέρει μία δύναμη αντίδρασης προς την δομή στήριξης. Για να συντονιστεί η επιτάχυνση, ένας ενσωματωμένος αισθητήρας παρακολουθεί την δόνηση της δομής στήριξης; τα αποτελέσματα του αισθητήρα στέλνονται εξωτερικό ελεγκτή ανάδρασης που οδηγεί τον εσωτερικό ηλεκτρομαγνητικό ενεργοποιητή του ADD. Σαν αποτέλεσμα, αυτές οι συσκευές μπορούν να αποσβέσουν τους τύπους δόνησης που παρατηρούν σε μία συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου.

### 2.5.1 Η Εφαρμογή των ADD στις Δομές Μηχανών

Οι ενεργές συσκευές προσθέτουν απόσβεση στην μηχανή ανεξάρτητα από τις δυναμικές τους ιδιότητες; συνεπώς, η σωστή εφαρμογή των ADDs στις δομές μηχανών βασίζεται στον προσδιορισμό του τρόπου τοποθέτησης του αισθητήρα και του ενεργοποιητή. Εν προκειμένω, η καλύτερη επιλογή για την τοποθέτηση ενός ενεργοποιητή και ενός αισθητήρα είναι γνωρίζουμε τα FRF της μηχανής στο κεντρικό σημείο του εργαλείου (TCP).

Από τα FRF, μπορούν να παρατηρηθούν τα μέγιστα πλάτη που είναι να μειωθούν, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις σχετίζονται με την συμβατότητα των πιο εύκαμπτων υλικών όπως είναι τα έμβολα και οι στήλες. Το ιδανικό μέρος για να τοποθετηθούν οι ενεργοποιητές είναι το κεντρικό σημείο του εργαλείου, έτσι ώστε τα ADDs να τοποθετηθούν όσο πιο κοντά

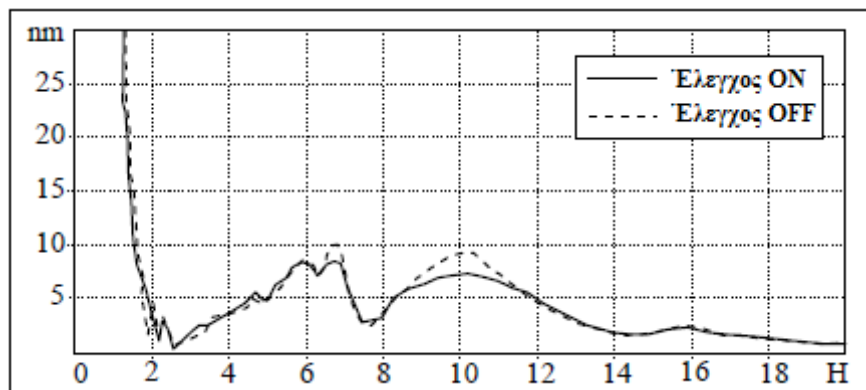
σε αυτό γίνεται. Συνεπώς, στις μηχανές που έχουν ένα κινούμενο έμβολο, ένα καλό σημείο για να διανεμηθούν τα ADDs είναι στο τέλος του εμβόλου, κοντά στην κουκουβάγια του τόννου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.11.

Στο σχήμα 2.11, δύο ADD-45N της Micromega, έχουν τοποθετηθεί και στις δύο πλευρές ενός οριζόντιου εμβόλου για να αποσβέσουν τους δύο βασικούς τύπους λυγίσματος του εμβόλου πάνω από 20%. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η επιπρόσθετη ενεργή απόσβεση επέτρεψε έναν μέσο όρο 2% της απόσβεσης στα έμβολα με τους τύπους λυγίσματος, να γίνουν ένας μέσος όρος 4% απόσβεσης (δείτε Σχήμα 2.12).

Αυτά τα δεδομένα είναι πολύ πολύτιμα όταν ενσωματώνονται σε ένα μοντέλο FEM μίας μηχανής, επειδή αν τα ADDs έχουν ενεργοποιηθεί την απόσβεση στους τύπους πάνω από 20%, τότε η ακαμψία του εμβόλου μπορεί να μειωθεί κατά 20%, διατηρώντας την παραγωγικότητα της μηχανής και επομένως επιτυγχάνοντας μία αξιοσημείωτη μείωση στην συνολική μάζα της μηχανής. Στις παρακάτω ενότητες, αυτή η μοντελοποίηση των μηχανών, που ενσωματώνει παθητικές και ενεργητικές μηχανές απόσβεσης, αναλύεται πλήρως.



Σχήμα 2. 11 – Τα ADDs που είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα έμβολο μίας φραιζας, από Fatronik.



Σχήμα 2. 12 – FRF μίας οριζόντιας μηχανής φραιζαρίσματος με και χωρίς ενεργό έλεγχο.

## 2.6 Η Επιρροή των Νέων Δομικών Εννοιών στην Παραγωγικότητα

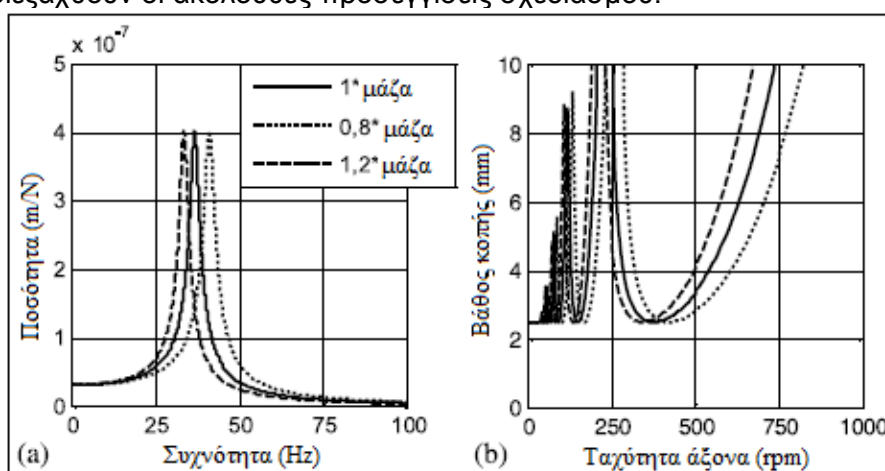
Οι προηγούμενες ενότητες έχουν αναλύσει τον τρόπο που η δυναμική συμπεριφορά της δομής της μηχανής επηρεάζει την δυναμική σταθερότητα των διαδικασιών κοπής, ειδικά στο φάσμα συχνότητας των 0-100Hz, στο οποίο οι τύποι χαμηλής συχνότητας της δομής της μηχανής μπορούν να ανιχνευτούν. Αυτοί οι δομικοί τύποι μηχανών μπορούν να μοντελοποιηθούν είτε μέσω μοντέλων FEM, είτε μέσω συγκεντρωμένων παραμέτρων, επιτρέποντας και στα δύο μοντέλα τον υπολογισμό της συμβατότητας και των FRF στο TCP. Αν και τα μοντέλα FEM είναι περισσότερο ακριβείς, τα μοντέλα συγκεντρωμένης παραμέτρου είναι πιο ευέλικτα, υπό την έννοια ότι μπορούν να παρέχουν ποιοτικές

πληροφορίες που μπορούν να είναι πολύ χρήσιμες για τους σχεδιαστές στην φάση της αρχικής επινόμενης της μηχανής.

Συνεπώς, λαμβάνοντας ως αναφορά το μηχάνημα του οποίου τα FRF απεικονίστηκαν στο σχήμα 2.8, έδειξαν έναν βασικό τύπο στα 37Hz, που η ανάλυση επιβεβαίωσε πως σχετίζονταν με το λύγισμα του οριζώντιου εμβόλου του. Για αυτή τη μηχανή και για αυτόν τον τύπο, χρησιμοποιήθηκε ένα μηχανικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν τροποποιήσεις της μάζας, της ακαμψίας και της απόσβεσης. Από την άλλη πλευρά, για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα των διαγραμμάτων λοβού, λήφθηκε υπόψη ένα εργαλείο κοπής διαμέτρου 125mm, με 9 ακμές.

### 2.6.1 Η Επίδραση Νέων Εννοιών Σχεδιασμού για τα Δομικά Στοιχεία

Λαμβάνοντας ως αναφορά το μηχάνημα που αναφέρθηκε παραπάνω, και εστιάζοντας στον τύπο των 37Hz, ο οποίος έχει μοντελοποιηθεί σαν ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, πρέπει να διεξαχθούν οι ακόλουθες προσεγγίσεις σχεδιασμού:



Σχήμα 2. 13 – Επίδραση ποικίλων μαζών και ίδιας ακαμψίας στα παρακάτω. (a) Άμεση FRF στον X. (b) Λοβοί σταθερότητας.

Αν εφαρμοστεί αυτό το κριτήριο σχεδιασμού, οι περιοχές σταθερότητας μεταξύ των λοβών αυξάνουν και το κρίσιμο βάθος κοπής παραμένει σταθερό, έτσι ώστε η επίδραση αυτής της έννοιας σχεδιασμού είναι σχετικά χαμηλή.

Για να διατηρηθεί η ακαμψία που σχετίζεται με τον τύπο, τροποποιώντας την μάζα. Αυτό κάνει την απόκριση της συχνότητας να κινείται οριζόντια, π.χ., προς τις χαμηλότερες συχνότητες για υψηλότερες μάζες, και προς υψηλότερες συχνότητες για χαμηλότερες μάζες (δείτε την Σχήμα 2.13). Η επίδρασή τους στους λοβούς σταθερότητας είναι πως επίσης κινούνται οριζόντια κατά μήκος του γραφήματος, και στην ίδια κατεύθυνση όπως στο πεδίο της συχνότητας.

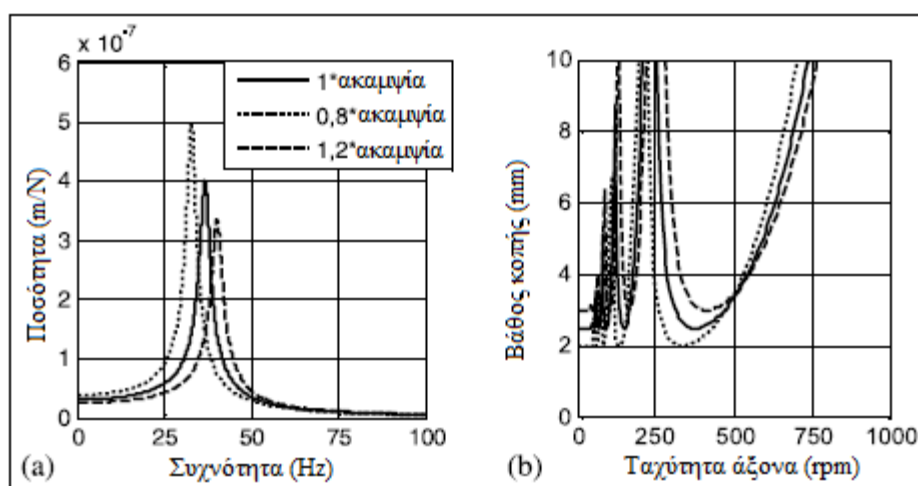
Για να διατηρηθεί η μάζα που σχετίζεται με τον τύπο και να αυξηθεί η ακαμψία που σχετίζεται με τον τύπο. Αυτή η έννοια σχεδιασμού αυξάνει και την φυσική συχνότητα, και την δυναμική ακαμψία του εμβόλου, και κάνει τους λοβούς σταθερότητας να κινούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αυξάνει το κρίσιμο βάθος κοπής (δείτε Σχήμα 2.14).

Όταν εφαρμόζεται αυτό το κριτήριο σχεδιασμού, οι περιοχές σταθερότητας μεταξύ των λοβών αυξάνει και ταυτόχρονα αυξάνει και το κρίσιμο βάθος κοπής, έτσι ώστε αυτή η έννοια σχεδιασμού να επιτρέπει μία αύξηση της παραγωγικότητας της μηχανής. Στην πραγματικότητα, η αύξηση του ποσοστού από άποψη ακαμψίας, μεταφράζεται κατευθείαν σε αύξηση του κρίσιμου βάθους κοπής. Σαν παράδειγμα, αν αυξάνει η ακαμψία κατά 20% με την ίδια μάζα, τότε το κρίσιμο βάθος κοπής αυξάνει επίσης κατά 20%.

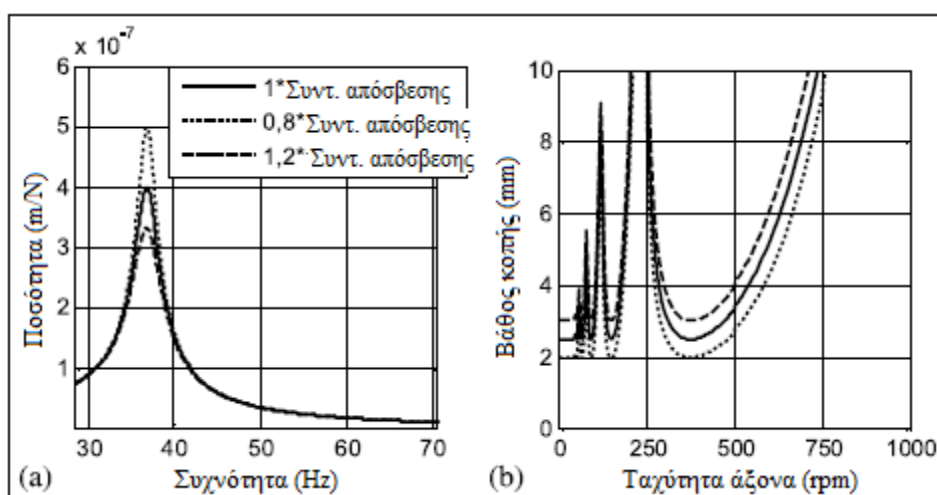
Για να αυξηθεί η απόσβεση που σχετίζεται με τους τύπους. Αυτή η σχεδιαστική έννοια μειώνει την παραμόρφωση στις φυσικές συχνότητες και προκαλεί τους λοβούς σταθερότητας να κινηθούν κάθετα, αυξάνοντας συνεπώς το κρίσιμο βάθος κοπής (δείτε Σχήμα 2.15). Η στατική ακαμψία δεν αλλάζει.

Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, η αύξηση του ποσοστού απόσβεσης μεταφράζεται άμεσα σε αύξηση του ίδιου ποσοστού στο κρίσιμο βάθος κοπής. Επιπλέον, είναι πιθανόν να μειωθεί η ακαμψία της μηχανής από ένα συγκεκριμένο ποσοστό, με την μεταγενέστερα σχετιζόμενη μείωση της μάζας, διατηρώντας την παραγωγικότητα της μηχανής.

Οι τρεις προσεγγίσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 2.8, ο οποίος παρέχει μία επισκόπηση της επίδρασης μεταβολής της μάζας, της ακαμψίας και της απόσβεσης πάνω στην φυσική συχνότητα, στην στατική παραμόρφωση και στην μέγιστη δυναμική ενίσχυση. Δεδομένου του γεγονότος πως η προσέγγιση μεταβολής της απόσβεσης αυξάνει την παραγωγικότητα των μηχανών χωρίς κάποια κύρωση στην μάζα, η μέθοδος της ενεργούς απόσβεσης θα αναλυθεί εδώ εκτενώς.



Σχήμα 2. 14 – Επίδραση μεταβαλλόμενης ακαμψίας και ίδιας μάζας στα παρακάτω. (α) άμεσο FRF στον X. (β) Λοβοί σταθερότητας.



Σχήμα 2. 15 – Επίδραση της μεταβαλλόμενης απόσβεσης στα ακόλουθα. (α) Άμεσο FRF στον X. (β) Λοβοί σταθερότητας.

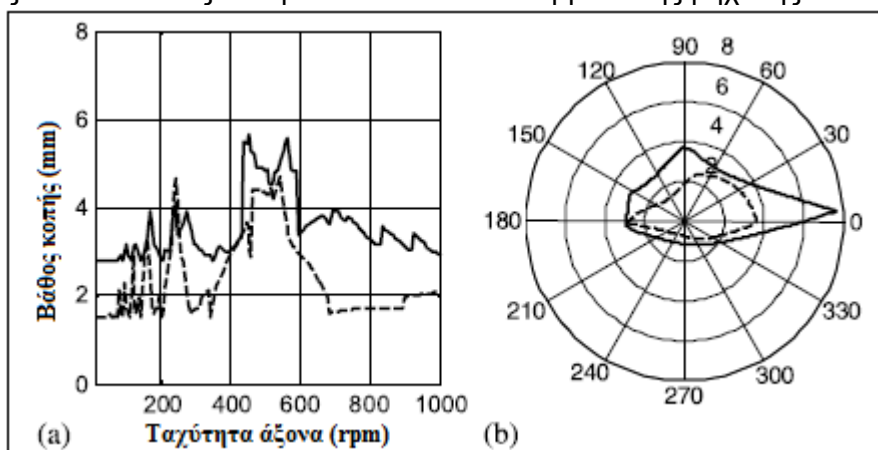
**Πίνακας 2.8** – Επισκόπηση της επίδρασης των τριών σχεδιαστικών προσεγγίσεων σε μηχανή με δυναμική ενός βαθμού ελευθερίας.

Προέγγιση σχεδιασμού	Συχνότητα, $\omega$	Στατική παραμόρφωση, $\delta$	Μεγ. δυναμική ενίσχυση, $D$
Διακύμανση μάζας $m = x \cdot m_0$	$= (1/\sqrt{x}) \cdot \omega_0$	$= \delta_0$	$\approx D_0$
Διακύμανση ακαμψίας $k = x \cdot k_0$	$= (\sqrt{x}) \cdot \omega_0$	$= (1/x) \cdot \delta_0$	$\approx (1/x) \cdot D_0$
Διακύμανση απόσβεσης $\xi = x \cdot \xi_0$	$= \omega_0$	$= \delta_0$	$\approx (1/x) \cdot D_0$
Ορολογία:			Βασική σύνθεση:
$\omega$ : Φυσική συχνότητα	$k$ : Ακαμψία		$\omega = \sqrt{k/m}$
$\delta$ : Στατική παραμόρφωση	$m$ : Μάζα		$D \approx (1/2\xi) \cdot \delta$
$D$ : Μεγ. δυναμική ενίσχυση	$\xi$ : Αναλογία απόσβεσης		
	$x$ : Αναλογία διακύμανσης (ανά μονάδα)		

## 2.6.2 Η Επίδραση των ADDs στην Παραγωγικότητα

Η επιρροή απόσβεσης των υλικών είναι χαμηλή στην συνολική απόσβεση της μηχανής. Συνεπώς, στην περίπτωση που απαιτείται μία υψηλότερη ποσότητα απόσβεσης, για να αυξηθεί επιπλέον η παραγωγικότητα της μηχανής, τα ADDs αποτελούν μία ενδιαφέρουσα επιλογή.

Το σχήμα 2.16 δείχνει την επιρροή του να έχουν τοποθετηθεί τα δύο ADD-45 της Micromega που φαίνονται στο σχήμα 2.11, στην κατεύθυνση X μίας πραγματικής οριζόντιας μηχανής φραιζαρίσματος. Όπως μπορεί να φανεί, η επιπλέον απόσβεση που αυτοί οι δύο ενεργοποιητές πρόσθεσαν στους δομικούς τύπους, επέτρεψε μία κίνηση στο κρίσιμο βάθος κοπής, σε όλες τις κατευθύνσεις κοπής. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να φανεί στο διάγραμμα του σχήματος 2.16a, πως το κρίσιμο βάθος κοπής στην κατεύθυνση X ( $0^\circ$  στο πολικό διάγραμμα), έχει περάσει από τα αρχικά 1.7mm (διακεκομμένη γραμμή), σχεδόν στα 8mm (συνεχόμενη γραμμή). Η εισαγωγή της απόσβεσης μπορεί να επεκταθεί στις υπόλοιπες κατευθύνσεις τοποθετώντας επιπρόσθετα ADDs στο έμβολο της μηχανής.

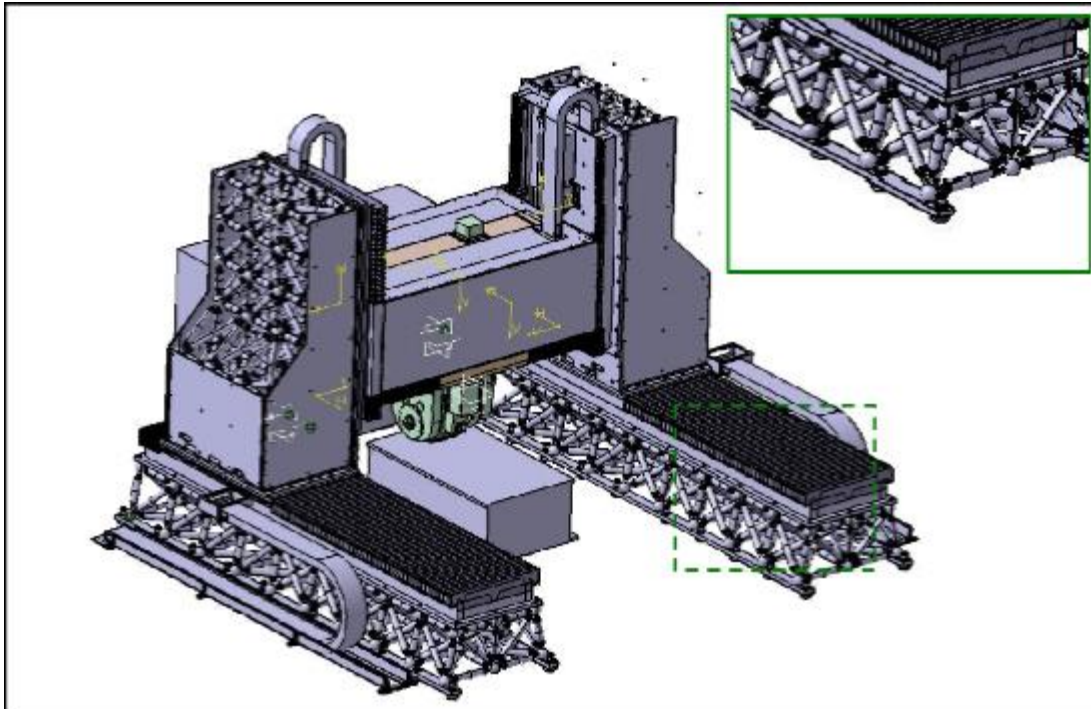


Σχήμα 2. 16 – Επίδραση της ενεργούς απόσβεσης στους λοβούς σταθερότητας. (a) τροφοδοσία στην κατεύθυνση Y+. (b) Πολικό διάγραμμα του κρίσιμου βάθους κοπής προς κάθε κατεύθυνση.

## 2.7 Μελλοντικές Τάσεις στα Δομικά Στοιχεία των Μηχανών

Η κύρια τάση στο πεδίο των δομικών στοιχείων είναι η αποϋλοποίηση των δομικών στοιχείων τους, περνώντας από τις μηχανές που στοχεύουν στην ακαμψία, στις ελαφριές και εύρωστες μηχανές, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί κυρίως ενσωματώνοντας μέσα στα δομικά στοιχεία, ενεργά στοιχεία όπως ενεργά πιεζοηλεκτρικά στρώματα, ενεργές συσκευές απόσβεσης και μαγνητορεολογικά υγρά. Στην πραγματικότητα, αυτοί οι αισθητήρες και ενεργοποιητές θα επιτρέψουν το πέρασμα από τις τρέχουσες έννοιες των μηχανών που βασίστηκαν στην μηχανική ακαμψία, στις καινοτόμες έννοιες μηχανών

που βασίστηκαν στην μηχανοτρονική ευρωστία, παρόμοια με τους άξονες που μετεωρίζονται στα μαγνητικά έδρανα, τα οποία εμφανίζουν μία ακριβής και εύρωστη συμπεριφορά, αν και δεν έχουν κάποια μηχανική υποστήριξη.



Σχήμα 2. 17 – Πρωτότυπο με δομικά εξαρτήματα φτιαγμένα με πλαίσιο σφαίρας-ράβδου.

Τέλος, οι προδιαγραφές των σύγχρονων μηχανών προσδιορίζονται ως μία ανταλλαγή μεταξύ της παραγωγικότητας, της ακρίβειας και της ποιότητας της επιφάνειας. Ανάμεσα στην θεώρηση βιώσιμων εργαλειομηχανών και διαδικασιών, αυτό το κεφάλαιο παρουσίασε ένα νέο τρίγωνο προδιαγραφών βασισμένων στην παραγωγικότητα, την ακρίβεια και πάνω από όλα στην οικολογική ανταπόδοση.

### **3° Κεφάλαιο: Άξονες Εργαλειομηχανών**

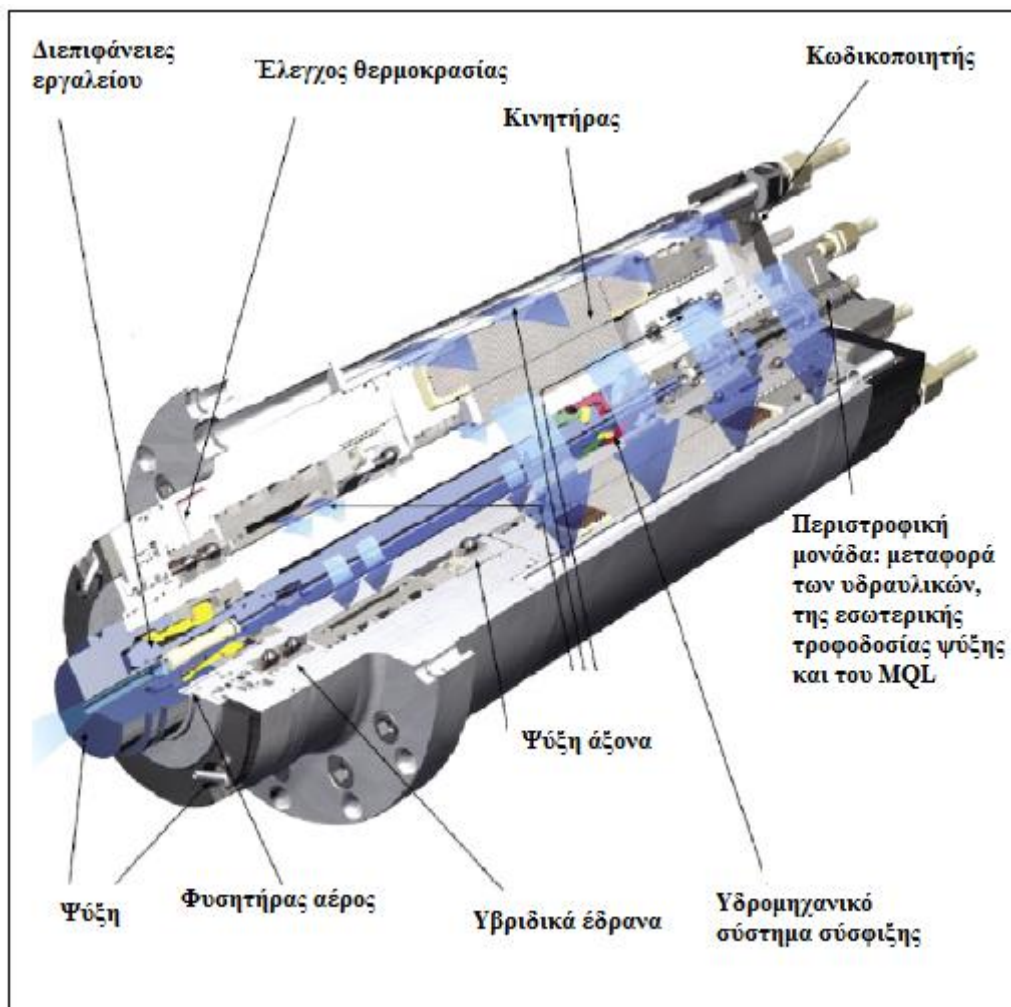
#### **Περίληψη Κεφαλαίου:**

Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται τις τεχνολογίες αξόνων για τις εργαλειομηχανές. Ο άξονας της εργαλειομηχανής παρέχει την σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου κοπής και του επεξεργαζόμενου κομματιού, το οποίο είναι απαραίτητο για να εκτελεστεί μία λειτουργία απομάκρυνσης. Είναι ο φυσικός σύνδεσμος μεταξύ της δομής της εργαλειομηχανής και του επεξεργαζόμενου κομματιού, ενώ στις διαδικασίες όπως η επιτεδοποίηση, η διάτρηση ή η λείανση, συνδέει την δομή και το εργαλείο κοπής. Επομένως, τα χαρακτηριστικά του άξονα, όπως η ισχύς, η ταχύτητα, η ακαμψία, η εγκοπές στήριξης του μετάλλου, οι μέθοδοι οδήγησης ή οι θερμικές ιδιότητες, ανάμεσα σε άλλα, έχουν μία τεράστια επιρροή στην απόδοση της εργαλειομηχανής και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Οι απαιτήσεις κατεργασίας διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τον έναν τομέα στον άλλο όσον αφορά στα υλικά, στις εργαλειομηχανές, στις διαδικασίες και στις παραμέτρους. Σήμερα, η βιομηχανία των αξόνων παρέχει μία μεγάλη ποικιλία διαμορφώσεων και επιλογών ώστε να αναγνωριστούν οι ανάγκες των διαφορετικών βιομηχανιών. Συνεπώς, είναι κρίσιμο οι εταιρίες να αναγνωρίσουν σωστά τις απαιτήσεις κατεργασίας τους, και να πάρουν καλά ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποιον άξονα να αποκτήσουν. Στο κεφάλαιο αυτό, μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά αξόνων που αποτελούν τη βάση μίας καλά ενημερωμένης απόφασης όσον αφορά στους άξονες που παρουσιάζονται και συζητούνται.

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η κατεργασία εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών για να δημιουργηθεί μία μεγάλη ποικιλία από γεωμετρίες και σχήματα, πρακτικά χωρίς περιορισμούς στην πολυπλοκότητα. Τα συνηθισμένα υλικά των προς επεξεργασία κομματιών είναι: κράματα αλουμινίου, χυτοσίδηρος, τιτάνιο, ωστενιτικό ανοξείδωτο ή θωρακισμένος χάλυβας, χαλκός, ανθρακογραφίτης και επίσης πλαστικά, ξύλινα και πλαστικά παράγωγα. Τα μηχανικά στοιχεία μπορεί να είναι είτε απλοί σχηματισμοί με κεκλιμένα, στρόγγυλα ή σύνθετα σχήματα. Συνήθως προσδιορίζονται δύο τύποι επιφανειών: βαθμολογημένης επιφάνειας, (π.χ. για τις λεπίδες), και ανάγλυφες επιφάνειες ή επιφάνειες ελεύθερης μορφής (π.χ. για καλούπια ή πλίνθους). Αυτός ο τεράστιος αριθμός συνδυασμών μπορεί να αγγίξει τις συγκεκριμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις ενός ευρέος φάσματος κατασκευαστικών βιομηχανιών, όπως αυτοκίνησης, αεροδιαστημικές ή βιομηχανίες καλουπιών και πλίνθων.

Ο άξονας της εργαλειομηχανής παίζει σημαντικό ρόλο στις λειτουργίες κατεργασίας επειδή παρέχει την ταχύτητα κοπής του εργαλείου και είναι μέρος της αλυσίδας ισχύος μεταξύ της δομής της εργαλειομηχανής και του εργαλείου ή του επεξεργαζόμενου κομματιού. Το φινιρισμένο προϊόν δημιουργείται απομακρύνοντας το υλικό από ένα κενό κομμάτι επεξεργασίας με ένα εργαλείο κοπής μέσω της σχετικής κίνησης μεταξύ του εργαλείου και του επεξεργαζόμενου κομματιού. Η σχετική κίνηση μπορεί να διαιρεθεί σε μία κίνηση τροφοδοσίας, που παρέχεται από τους οδηγούς της μηχανής, και μία περιστροφική κίνηση παρέχεται από τον άξονα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ταχύτητα κοπής που επιτρέπει στο υλικό να απομακρυνθεί.



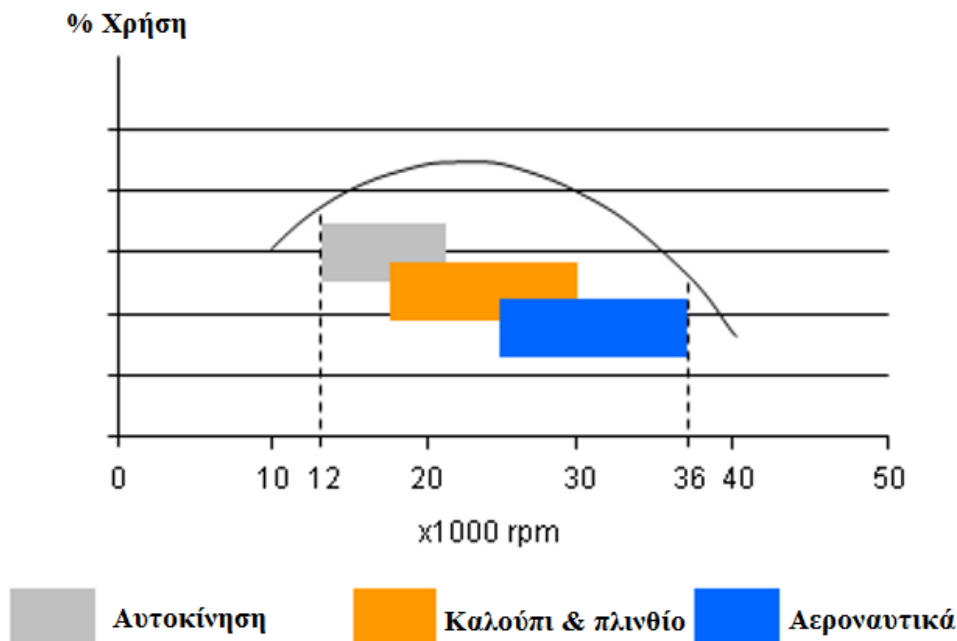
Σχήμα 3. 1 – Κύρια μέρη ενός άξονα, από Edel.

Κάθε τύπος διαδικασίας κατεργασίας (π.χ. διάτρηση, καμπή, επιπεδοποίηση, λείανση, διεύρυνση οπής κλπ) έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά στο ποσοστό τροφοδοσίας και ταχύτητα κοπής. Στις βασικές διαδικασίες περιστροφής, ο άξονας περιστρέφει το επεξεργαζόμενο κομμάτι για να παρέχει την ταχύτητα κοπής, και το εργαλείο κοπής τροφοδοτείται από τους οδηγούς για να απομακρύνει το υλικό. Στην διάτρηση και την επιπεδοποίηση, ο άξονας περιστρέφει ένα εργαλείο κοπής με πολλαπλές κοπτικές ακμές για να παρέχει την ταχύτητα κοπής. Στην διάτρηση η κίνηση τροφοδοσίας κινείται στην κατεύθυνση του άξονα, και στην επιπεδοποίηση, κινείται γενικά σε μία κάθετη κατεύθυνση. Στις διαδικασίες λείανσης, ο άξονας είναι επίσης το στοιχείο που παρέχει την ταχύτητα κοπής στον τροχό λείανσης.

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός άξονα είναι η διεπιφάνεια του εργαλείου, τη ράβδο ρυμούλκησης, την άτρακτο, τα έδρανα, το σύστημα κίνησης, το σύστημα ψύξης και το κιβώτιο. υπάρχουν πολλοί τύποι συστημάτων κίνησης. Υπάρχουν πολλοί τύποι συστημάτων κίνησης, βασικά με ένα κινητήρα σύζευξης, άμεσα ή έμμεσα, στον άξονα ή σε έναν αναβαθμισμένο κινητήρα. Το σχήμα 3.1 δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός άξονα αναβαθμισμένου κινητήρα.

Η βιομηχανία αξόνων παρέχει πολλές επιλογές και διαμορφώσεις που αγγίζουν τις απαιτήσεις του κάθε τομέα. Σαν παράδειγμα, το σχήμα 3.2 δείχνει μία σύγκριση των μέγιστων ταχυτήτων των άμεσων αξόνων κίνησης και των ηλεκτρικών αξόνων που χρησιμοποιούνται τυπικά στην αυτοκίνηση και στις αεροναυτικές βιομηχανίες. Έτσι, η επιλογή του πιο κατάλληλου άξονα είναι μία περίπλοκη εργασία. Στο κεφάλαιο αυτό, τα

χαρακτηριστικά του άξονα, όπως οι κινητήρες, τα έδρανα, η ταχύτητα, η ισχύς, η ακαμψία και η θερμική συμπεριφορά περιγράφονται στα βασικά κριτήρια για μία καλά ενημερωμένη απόφαση όσον αφορά στους κινητήρες.



## 3.2 Τύποι αξόνων

Το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί τον μηχανισμό που παρέχει και μεταδίδει κινήσεις στον άξονα. Αποτελείται από τον κινητήρα και τον συζευκτήρα. Με τον τρόπο αυτό, η ταχύτητα περιστροφής, το κινητήριο ζεύγος και η ισχύς μεταφέρονται τελικά στο εργαλείο κοπής, μέσω του εργαλειοφορέα.

Γενικά, υπάρχουν τέσσερις τύποι άξονα, ανάλογα με τον τύπο κίνησης που χρησιμοποιείται: κίνηση μέσω ιμάντα, κίνηση μέσω οδοντωτού τροχού και ενοποιημένο ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης. Στο κεφάλαιο 1, Σχήμα 1.17 υπάρχει ένα παράδειγμα μετάδοσης κίνησης με ιμάντα, απευθείας μετάδοσης κίνησης και ενοποιημένου συστήματος οδήγησης. Ποικίλα χαρακτηριστικά πρέπει να ληφθούν υπόψη για να αξιολογηθεί η απόδοση των αξόνων, για παράδειγμα:

- Απόδοση μετάδοσης υπό τη μορφή κίνησης, δύναμης, ροπής, ισχύος και ταχύτητας.
- Απώλεια θερμότητας και διαστολή.
- Κραδασμοί σε ποικίλες ταχύτητες.
- Θόρυβος
- Άλλα, όπως συντήρηση και κόστος.

Παρακάτω περιγράφουμε συνοπτικά τα κοινά χαρακτηριστικά κάθε τύπου κίνησης και τις καταλληλότερες εφαρμογές για κάθε έναν.

### 3.2.1 Μετάδοση της Κίνησης στον Άξονα με Ιμάντα

Αυτή η εγκατάσταση άξονα, μεταφέρει την κίνηση ενός εξωτερικού κινητήρα στον κύριο άξονα, μέσω ενός οδοντωτού ή τύπου V ιμάντα. Χρησιμοποιείται ευρέως στην μηχανουργική κατεργασία, λόγω του χαμηλού της κόστους και της καλής απόδοσης, όταν πρόκειται για μεταφορά της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα, στην χρήσιμη ισχύ του άξονα. Η απόδοση

των κινούμενων με ιμάντα αξόνων υπό τη μορφή της μετάδοσης ισχύος στον κινητήρα, είναι περίπου στο 95%. Αυτό το ποσοστό είναι λίγο μικρότερο από τους άξονες με απευθείας μετάδοση της κίνησης (σχεδόν 100%), αλλά καθαρά καλύτερο από εκείνους με μετάδοση της κίνησης μέσω οδοντοτροχού (γρανάζι) (λιγότερο από 90%).

Η κίνηση μέσω ιμάντα μπορεί να φτάσει μέτριες ταχύτητες (15,000rpm) και να αποδώσει καλά ή με υψηλή ροπή και χαμηλότερες ταχύτητες (1,000rpm), ανάλογα με τους ιμάντες και την αναλογία μετάδοσης. Σε αντίθεση, σε χαμηλές ταχύτητες, η κίνηση μέσω οδοντοτροχού μεταδίδει καλύτερα την ροπή και σε υψηλές ταχύτητες η απευθείας μετάδοση της κίνησης είναι καλύτερη επειδή παράγει λιγότερους κραδασμούς και θόρυβο. Ωστόσο, καθώς η κίνηση μέσω ιμάντα είναι πολύ ευέλικτη, χρησιμοποιείται για μία ευρεία ποικιλία εργασιών, το φάσμα απαιτήσεων των οποίων κυμαίνεται μεταξύ υψηλής ροπής/χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής και χαμηλής ροπής/υψηλών ταχυτήτων. Τα κύρια μειονεκτήματα του συστήματος κίνησης μέσω ιμάντα είναι:

- Υφίστανται σημαντική θερμική διαστολή, συγκρινόμενο με τα άλλα συστήματα κίνησης, λόγω της συνεχούς επαφής του ιμάντα.
- Είναι πιο θορυβώδες λόγω των κινήσεων της ζώνης.
- Η τάνυση του ιμάντα δημιουργεί μία ακτινική δύναμη στην άτρακτο, που παίρνει κάποια από την διαθέσιμη ανυψωτική ικανότητα των εδράνων.
- Καθώς ο κινητήρας και ο άξονας διαχωρίζονται, το κιβώτιο και η συντήρηση αυτού του είδους της κίνησης είναι απλή, αν και από την άλλη πλευρά, απαιτείται περισσότερος χώρος

### **3.2.2 Άξονες Μετάδοσης της Κίνησης από Οδοντοτροχούς**

Οι άξονες με μετάδοση της κίνησης από οδοντοτροχό (δείτε την [Σχήμα 3.3](#)), μπορούν να αγγίξουν υψηλή ροπή σε χαμηλές περιστροφές και έχουν χαρακτηριστικά πολλαπλές διακυμάνσεις ταχύτητας.

Οι οδοντοτροχοί, ωστόσο, μπορεί να προκαλέσουν κραδασμούς, οι οποίοι έχουν μία αρνητική επίδραση στην φινιρισμένη επιφάνεια του επεξεργαζόμενου κομματιού. Επιπλέον, όπως αναφέραμε παραπάνω, είναι λιγότερο αποδοτικοί όταν πρόκειται για μετατροπή της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα σε ισχύ κοπής του εργαλείου. Τέτοια ισχύς χάνεται υπό τη μορφή θερμότητας, με όλες τις αρνητικές επιδράσεις που συνεπάγονται, όπως μείωση της ακρίβειας λόγω της θερμικής διαστολής. Για όλους αυτούς τους λόγους, η μεταφορά της κίνησης στους άξονες μέσω οδοντοτροχών, δεν είναι κατάλληλη για διαδικασίες κατεργασίας πολύ υψηλής ταχύτητας, αν και είναι πολύ ικανοποιητική για εργασίες βαρέως τύπου.



Σχήμα 3. 3 – Μετάδοση κίνησης μέσω οδοντοτροχού με κιβώτιο δύο ταχυτήτων HassEC-630: 610 ft-lb της ροπής για βαριά μηχανική κατεργασία, ή 6,000rpm για τομές, από HassAutomation.

### 3.2.3 Άξονες με Απευθείας Μετάδοση της Κίνησης

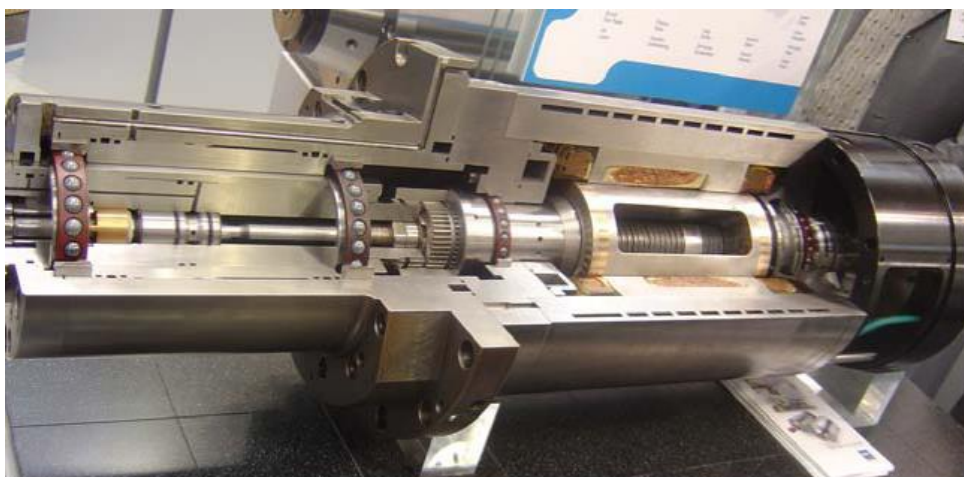
Οι άξονες με απευθείας μετάδοση της κίνησης έχουν σχεδόν 100% απόδοση υπό τη μορφή μετάδοσης της ισχύος από τον κινητήρα στο εργαλείο κοπής. Μπορούν να εργαστούν σε ταχύτητες υψηλής περιστροφής, αλλά σε χαμηλότερες ροπές.

Αφού δεν υπάρχει αλυσίδα μετάδοσης, δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί μηχανικά η ροπή, σε απόκριση με τις μειώσεις στην ταχύτητα του κινητήρα. Αυτό το σύστημα κίνησης συμπεριφέρεται καλά όσον αφορά στους κραδασμούς, που σημαίνει πως οι υψηλές ταχύτητες μπορούν να πραγματοποιηθούν, και να επιτευχθεί ακόμα καλό φινίρισμα της επιφάνειας.

### 3.2.4 Άξονες με Ενοποιημένο (ενσωματωμένο) Σύστημα Κίνησης

Στους άξονες αυτούς, που ονομάζονται επίσης και ηλεκτροάξονες, ο κινητήρας μπορεί να είναι ένας σύγχρονος ή ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας, που ενσωματώνεται μέσα στην δομή του άξονα μεταξύ των μπροστινών και των πίσω εδράνων (δείτε την [Σχήμα 3.4](#)). Με αυτό τον τρόπο, οι κραδασμοί και ο θόρυβος μειώνονται, και η εργασία μπορεί να διεξαχθεί με μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, από 15,000rpm. Αυτός είναι ο λόγος που οι άξονες με ενοποιημένο σύστημα κίνησης είναι πολύ κοινοί στις εργαλειομηχανές υψηλής ταχύτητας. Ο έλεγχος μετάδοσης της θερμότητας μέσα στον άξονα και της υποκείμενης θερμικής διαστολής, είναι ένας παράγοντας κλειδί για την λήψη καλής απόδοσης από αυτό το είδος κίνησης. Με τον κινητήρα μέσα στο κιβώτιο, το βοηθητικό σύστημα απομάκρυνσης της θερμότητας αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα (δείτε Ενότητα 3.5.4).

Η μεγάλη ακρίβεια που απαιτείται για την συναρμολόγηση αυτών των αξόνων και η ανάγκη βοηθητικών συστημάτων για ψύξη και παρακολούθηση, τους κάνει πολύ ακριβούς, παρ'όλη την εξαιρετική μηχανική τους απόδοση.



Σχήμα 3. 4 – Ενοποιημένος άξονας με τον κινητήρα μεταξύ των μπροστά και πίσω εδράνων.

### 3.3 Διαμορφώσεις Αξόνων

Η διάταξη του άξονα στην εργαλειομηχανή, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που είναι στην πραγματικότητα, σχετιζόμενο με την πολυπλευρικότητα και τις τελικές εφαρμογές της εργαλειομηχανής. Εδώ περιγράφουμε τις συνήθεις διαμορφώσεις του άξονα και επίσης μερικές εναλλακτικές επιλογές.

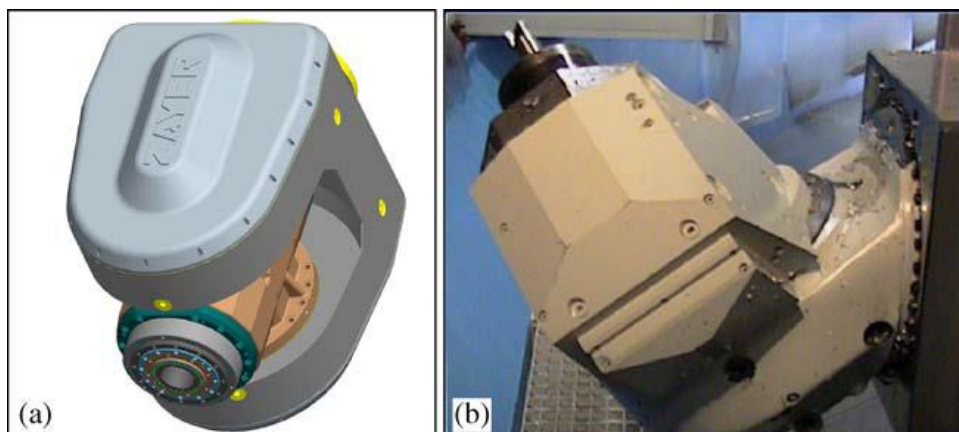
#### 3.3.1 Κοινές Διαμορφώσεις: Κάθετοι και Οριζόντιοι Άξονες

Η διεύθυνση των αξόνων εξαρτάται από τον σκοπό της εργαλειομηχανής αλλά, σαν γενικός κανόνας, οι διαμορφώσεις οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούνται στις μηχανές με μεγάλη ισχύ και παλετοποιημένα κομμάτια επεξεργασίας, για μία μεγαλύτερη ευκαμψία (δείτε Σχήμα 1.23 στο Κεφάλαιο 1). Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της διαμόρφωσης είναι πως το απομακρυσμένο τεμάχιο αποσύρεται από την ζώνη αποκοπής. Αλλιώς, οι κάθετοι άξονες χρησιμοποιούνται γενικά στις μηχανές με λιγότερη ισχύ, η οποίες χρειάζονται περισσότερη προσβασιμότητα, τυπικά για καλούπια και πλινθία μηχανικής κατεργασίας; δείτε την Σχήμα 1.25 στο Κεφάλαιο 1. Και οι δύο διαμορφώσεις μπορούν να κερδίσουν προσβασιμότητα μέσω της χρήσης των γωνιακών κουκουβαγιών τόνου, όπως του τύπου Hure για οριζόντιους άξονες, και του τύπου swivel για τους κάθετους άξονες. Αυτές οι λύσεις είναι ακόμη ευρέως χρησιμοποιούμενες και επιτρέπουν στο εργαλείο να προσανατολιστεί σε σταθερά κλειδωμένα βήματα, για να κόψει κεκλιμένες επιφάνειες, οι οποίες επιτρέπουν τις πέντε έδρες ενός κύβου, π.χ. του επεξεργαζόμενου τμήματος, να υποστούν μηχανική κατεργασία.

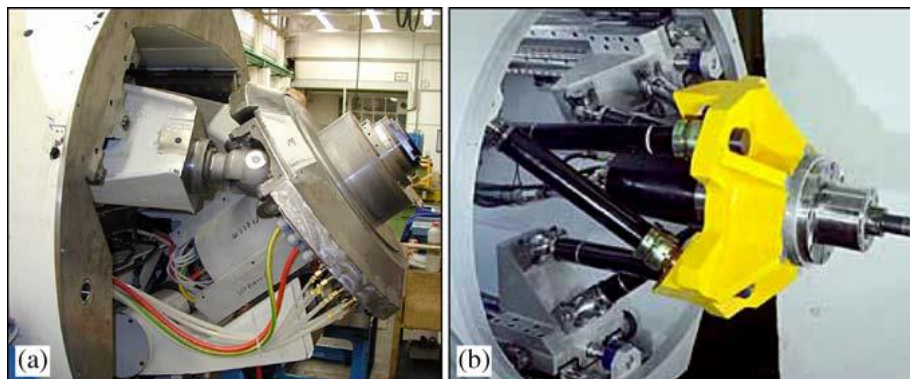
#### 3.3.2 Μηχανές με Περιστροφικές Κουκουβάγιες τόνου

Πολλές μηχανές φραιζαρίσματος ενσωματώνουν περιστροφικούς άξονες στην κουκουβάγια, για να παρέχουν περισσότερες λειτουργικές πιθανότητες, έτσι ώστε ο προσανατολισμός του εργαλείου να μπορεί να αλλάξει συνεχόμενα όπως απαιτείται από την επιφάνεια που πρόκειται να κατεργαστεί; δείτε Σχήμα 1.7 στο Κεφάλαιο 1. Αυτές οι μηχανές, με πέντε ή περισσότερους άξονες, μπορούν να παράγουν πιο σύνθετα σχήματα αν και απαιτούν πιο εξεζητημένα υπολογιστικά συστήματα αριθμητικού ελέγχου (CNC), ώστε να ελέγχουν την κατεύθυνση του εργαλείου σύμφωνα με τις απαιτούμενες πορείες. Το σχήμα 3.5 δείχνει δύο κλασικά παραδείγματα δις-περιστροφικών κουκουβαγιών: με επιπρόσθετη στρέψη και με κεφαλή άρθρωσης. Η επιπρόσθετη στρέψης επιτρέπει υψηλότερη προσβασιμότητα και δυνατότητες τοποθέτησης από τις παραδοσιακές μηχανές τριών αξόνων. Ωστόσο, αυτές οι κεφαλές έχουν έλλειψη υψηλής ακαμψίας, έτσι δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος, λόγω των περιορισμών τους όσον αφορά στην ακρίβεια και την δυναμική. Σε

σύγκριση, η κεφαλή άρθρωσης με τον κλειστό σχεδιασμό της, είναι μία πολύ πιο άκαμπτη λύση και πιο ενδεδειγμένη για μηχανική κατεργασία υψηλής ισχύος.



Σχήμα 3. 5 – Δύο περιστροφικές κουκουβάγιες. (α) Επιπρόσθετης στρέψης από Zayer. (β) Κεφαλής άρθρωσης από Droop+Rein.



Σχήμα 3. 6 – (α) Λεπτομέρεια της κεφαλής και του άξονα SprintZ3 από DSTechnologies. (β) Κεφαλή Hermes από Fatronik.

Τα τελευταία δύο χρόνια, η παραδοσιακή χρήση μετάδοσης της κίνησης με οδοντοτροχό για τους δύο περιστροφικούς άξονες, έχει αντικατασταθεί από τη χρήση του στρεπτικού ηλεκτροκινητήρα, άμεσα εισερχόμενο στις περιστροφικές αρθρώσεις. Εξαλείφοντας τα γρανάζια (τροχούς), αυξάνει η ακαμψία και υπάρχει πιο ακριβής περιστροφή, δείτε Ενότητα 4.5.

Κατά τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλές εναλλακτικές λύσεις που βασίζονται στους μηχανισμούς παράλληλης κινηματικής, όπως η κεφαλή Hermes από Fatronik ή η κεφαλή SprintZ3 από DSTechnologie, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Αυτές οι λύσεις επιτρέπουν τον γρήγορο προσανατολισμό του εργαλείου έως  $\pm 40^\circ$  προς κάθε κατεύθυνση με ελάχιστη κίνηση της κουκουβάγιας.

### 3.3.3 Ένας Βασικός Άξονας με έναν Βοηθητικό άξονα

Σε συνδυασμό με τους άξονες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχουν άλλες διαμορφώσεις που συνδυάζουν έναν κύριο άξονα μαζί με έναν βοηθητικό, που στηρίζεται παράλληλα, κατά μήκος της πλευράς του, με διαφορετικά συστήματα μετάδοσης για να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες του κάθε άξονα σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εργασίας. Για παράδειγμα, υπάρχουν μηχανές που συνδυάζουν τις διαφορετικές ποιότητες της κίνησης με ιμάντα και της απευθείας μετάδοσης της κίνησης με ένα ζεύγος αξόνων τοποθετημένων μαζί – ο ένας είναι ο κύριος άξονας, και ο άλλος ο βοηθητικός – ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό εφαρμογών υψηλής ταχύτητας/υψηλής ισχύος.

Ο κύριος άξονας έχει μετάδοση κίνησης μέσω ιμάντα, αφού όπως έχουμε εξηγήσει, η κίνηση αυτή παρέχει υψηλή ισχύ σε χαμηλή ταχύτητα. Αυτός ο άξονας θα ήταν κατάλληλος για ξεχονδρίσμα και ημι-φινιρίσμα, με εργαλεία που περιλαμβάνουν μύλους ξεχονδρίσματος, αξιοσημείωτης διαμέτρου.

Ένας άξονας απευθείας μετάδοσης της κίνησης, ενεργώντας ως βοηθητικός άξονας, ολοκληρωτικά ενοποιημένος μέσα στην εργαλειομηχανή, μπορεί να ζευχθεί στον κύριο άξονα. Ο άξονας απευθείας μετάδοσης θα εκτελέσει λειτουργίες χαμηλής ισχύος/ υψηλής ταχύτητας. Με τον τρόπο αυτό, ο βοηθητικός άξονας θα είναι ιδανικός για λειτουργίες υψηλής ταχύτητας, παρέχοντας επιφάνεια φινιρίσματος υψηλής ποιότητας και ακρίβεια διαστάσεων, χρησιμοποιώντας εργαλεία και σφαίρα μικρότερης διαμέτρου.

### 3.3.4 Δίδυμοι άξονες και Πολλαπλοί-άξονες

Μερικές εργαλειομηχανές μπορεί να είναι εξοπλισμένες με δύο ή περισσότερους άξονες, επίσης γνωστές ως «δίδυμων αξόνων» ή «πολλαπλών αξόνων»; δείτε την Σχήμα 3.7, και τις Εικόνες 1.15b και 1.32b στο Κεφάλαιο 1. Το κύριο πλεονέκτημα εδώ, είναι ότι δύο ή περισσότερα παρόμοια στοιχεία μπορούν να κατεργαστούν μηχανικά την ίδια στιγμή, στην ίδια μηχανή, αυξάνοντας σημαντικά την παραγωγικότητα. Από την άλλη πλευρά, αυτές οι μηχανές συνήθως χάνουν την ακρίβεια των διαστάσεων σε σύγκριση με τις συμβατικές εργαλειομηχανές. Υπάρχουν πολλοί λόγοι:

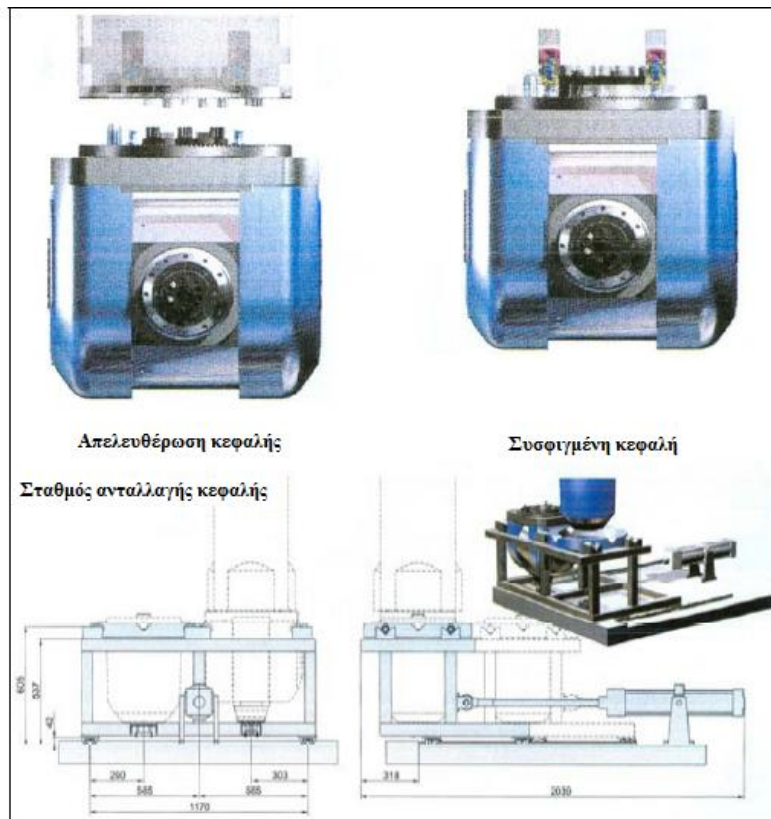
- Οι διαστάσεις μεταξύ των αξόνων δεν είναι ακριβώς οι ίδιες, λόγω του σχεδιασμού και της δόμησης της μηχανής.
- Η διάμετρος, το μήκος και η φθορά των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στους δίδυμους και πολλαπλούς άξονες, είναι επίσης μεταβλητά.
- Η θερμοκρασία και επομένως και οι επιδράσεις της θερμικής διαστολής σε συγκεκριμένα σημεία σε όλη την μηχανή, δεν είναι ίδια.



Σχήμα 3. 7 – Δύο εικόνες του NicolasCorreaNeptuno, ένα παράδειγμα διαμόρφωσης πολλαπλών αξόνων.

### 3.3.5 Αυτόματη Ανταλλαγή Κεφαλής

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, η αυτόματη ανταλλαγή κεφαλής μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή; για παράδειγμα, όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στις απαιτήσεις του συστήματος παραγωγής, υπό τη μορφή ευκαμψίας ή παραγωγικότητας, απαίτησης για τα κατεργασμένα εξαρτήματα, συμφορήσεις στις μονάδες παραγωγής ή παύσεις για τη συντήρηση. Αυτό το σύστημα επιτρέπει οι κεφαλές των εργαλειομηχανών να αλλάζουν αυτόματα, χρησιμοποιώντας υδραυλικά συστήματα εργαλειοθήκης. Το σχήμα 3.8 δείχνει το σύστημα αυτόματης ανταλλαγής κεφαλής της μηχανής CyportCP από Edel.



Σχήμα 3. 8— Το σύστημα αυτόματης ανταλλαγής κεφαλής της μηχανής CyportCP, της Edel.

### 3.4 Βασικά Στοιχεία του Άξονα

Τα βασικά στοιχεία ενός μοντέρνου άξονα περιγράφονται στην ενότητα αυτή: α) οι κινητήρες, οι οποίοι ωθούν τον άξονα, β) τα έδρανα, τα οποία επιτρέπουν τη σχετική κίνηση μεταξύ του κιβωτίου και της μηχανής, γ) το κιβώτιο, δ) η ράβδος έλξης, ε) το σύστημα εργαλείων, ς) οι αισθητήρες, απαραίτητοι στην διαδικασία παρακολούθησης και διάγνωσης των προβλημάτων του άξονα, και ζ) το περίβλημα, που όχι μόνο φιλοξενεί όλα τα στοιχεία, αλλά επίσης συνεισφέρει στην ψύξη του ίδιου του άξονα.

#### 3.4.1 Κινητήρες

Οι κινητήρες παρέχουν την μηχανική κίνηση στο σύστημα άξονα-εργαλείου. Περιστρέφουν τον άξονα για να δημιουργηθεί σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και επεξεργαζόμενου κομματιού και παρέχουν ισχύ και ροπή στο εργαλείο κοπής ώστε να εκτελεστούν λειτουργίες όπως διάτρηση, επιπεδοποίηση και λείανση.

Η κίνηση της εργαλειομηχανής χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς κινητήρες που μπορεί να είναι είτε συνεχούς ρεύματος (DC), κινητήρες με βούρτσες ή χωρίς, ή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), και είτε σύγχρονους ή ασύγχρονους κινητήρες. Τώρα θα περιγράψουμε τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των διαφορετικών κινητήρων και την χρησιμότητά τους στο πεδίο των εργαλειομηχανών.

##### 3.4.1.1 Κινητήρες DC

Οι κινητήρες DC, είτε με βούρτσες ή χωρίς, είναι κοινοί στις εργαλειομηχανές και αν και είναι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ως μονάδες τροφοδοσίας, έχουν επίσης εφαρμογές ως κύριες μονάδες. Οι κινητήρες με βούρτσες, επίσης γνωστοί και ως συμβατικοί κινητήρες DC, ενώ εκείνοι χωρίς, χρησιμοποιούν εξωτερική μετατροπή για να δημιουργήσουν το ρεύμα AC από

το DC. Οι κινητήρες χωρίς βούρτσα, έχουν πολλές εφαρμογές στο πεδίο των εργαλειομηχανών, παρόλο το γεγονός ότι είναι πιο ακριβοί από τους συμβατικούς κινητήρες DC, αφού τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού τους, παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητα. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι ότι η αλλαγή στην πολικότητα του κινητήρα, μπορεί να διεξαχθεί χωρίς βούρτσες. Με τον τρόπο αυτό, εμπλουτίζεται η αποδοτικότητα, μειώνοντας την τριβή. Το σχήμα 3.9 δείχνει δύο υψηλής συχνότητας μονάδες αξόνων, που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές για μικρές μηχανές φραιζαρίσματος CNC και εγχάραξης, τις FS45-50/1 χωρίς βούρτσα DC και την FS33-60/0.15 από SLF.



Σχήμα 3. 9 – Μονάδες αξόνων υψηλής συχνότητας FS45-50/1 χωρίς βούρτσα DC και FS33-60/0.15 από την SLF.

### 3.4.1.2 Κινητήρες AC

Οι κινητήρες AC μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε περιστρεφόμενη ροπή. Ο κινητήρας AC αποτελείται από έναν στάτορα, ο οποίος είναι το σταθερό μέρος που παράγει ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, υπό τη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος, και τον ρότορα, οποίος περιστρέφεται χάρη στην περιστρεφόμενη ροπή, που παράγεται από το μαγνητικό πεδίο. Στις εργαλειομηχανές, χρησιμοποιούνται οι σύγχρονοι και ασύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες AC.

Οι σύγχρονοι κινητήρες AC ξεχωρίζουν έχοντας έναν ρότορα που στρέφεται συγχρονισμένα με το πεδίο ταλάντωσης του ρεύματος που το κινεί. Έχουν μία σταθερή ταχύτητα περιστροφής καθορισμένη από την συχνότητα του πλέγματος στο οποίο συνδέονται και από τον αριθμό των ζευγών των πόλων του ρότορα. Η ταχύτητα περιστροφής N, επίσης γνωστή και ως ταχύτητα συγχρονισμού, υπολογίζεται εύκολα σε rpm χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1:

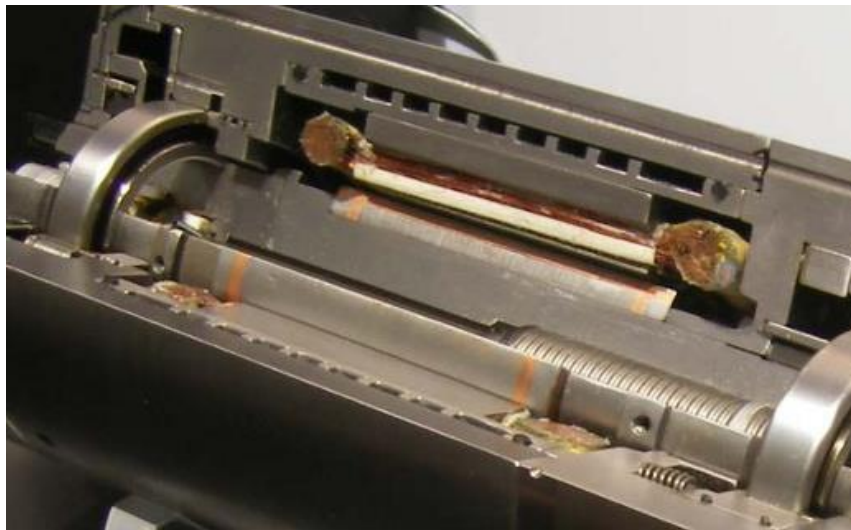
$$N = \frac{f}{p} \cdot 60 \quad (3.1)$$

όπου f είναι η συχνότητα του πλέγματος (π.χ. 50Hz στην Ευρώπη) όπου p είναι ο αριθμός των πόλων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συγχρονισμένων κινητήρων AC, είναι πως η θέση και η ταχύτητά τους μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια, με ελέγχους ανοιχτού βρόχου και πως η ταχύτητα είναι ανεξάρτητη από το φορτίο, έτσι μπορεί να συντηρηθεί με ακρίβεια.

Οι ασύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες AC, επίσης γνωστοί και ως κινητήρες επαγωγής, διαφέρουν από τους σύγχρονους στο ότι οι τελευταίοι έχουν την παροχή του ρεύματος στον ρότορα, ο οποίος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Ο τύπος περιέλιξης του ρότορα, ο

κινητήρας με δακτυλίους ή κινητήρας με περιέλιξη κλωβού, προετοιμάζουν την συμπεριφορά του κινητήρα. Το σχήμα 3.10 δείχνει έναν ασύγχρονο κινητήρα AC.



Σχήμα 3. 10 – Τμήμα ενός κινητήρα AC ενός άξονα εργαλειομηχανής. Οι κοιλότητες ψύξης μπορούν επίσης να παρατηρηθούν γύρω από τον κινητήρα.

Η ταχύτητα της περιστροφής αυτών των κινητήρων, διαχειρίζεται από μετατροπείς συχνότητας, οι οποίοι είναι τα στάδια της ηλεκτρονικής ισχύος που ελέγχουν την τάση και την συχνότητα που παρέχεται στον κινητήρα. Οι τεχνικές «ωστικού ανύσματος» έχουν βελτιώσει την απόδοση αυτών των κινητήρων, χάρη στον βελτιωμένο έλεγχο ταχύτητας και της μειωμένης επιτάχυνσης και των χρόνων επιβράδυνσης.

#### 3.4.1.3 Κινητήρες Ροπής

Οι κινητήρες ροπής είναι απευθείας μετάδοσης της κίνησης, βασισμένοι σε μόνιμα διεγερμένους πολλαπλών πόλων σύγχρονους AC κινητήρες χωρίς βούρτσες. Καθώς οι απώλειες δινορευμάτων αυξάνουν με έναν αριθμό ζευγών πολλών, ο μέγιστος αριθμός των ζευγών αυτών περιορίζεται αν και έχουν ακόμη έναν σχετικά μεγάλο αριθμό μαγνητικών ζευγών πόλων. Συνεπώς, οι κινητήρες ροπής είναι σχεδιασμένοι κυρίως για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας, συνήθως κάτω των 1,000rpm.

Έχουν σχετικά μεγάλες αναλογίες διαμέτρου προς μήκος και μεγάλες εξωτερικές και εσωτερικές διαμέτρους, έτσι μπορεί να ειπωθεί πως είναι μεγάλοι κοίλοι άξονες με πολύ χαμηλή αδράνεια. Όσον αφορά στην απόδοση, συνδυάζουν υψηλά επίπεδα ροπής, υψηλές δυναμικές αποκρίσεις, υψηλή απόδοση λόγω των μόνιμων μαγνητών και υψηλή γωνιακή και δυναμική ακαμψία. Τέλος, τα μεγάλα μηχανικά κενά αέρος (0.5 έως 1.5mm) κάνουν την τοποθέτηση και την ευθυγράμμισή τους εύκολη. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τους κινητήρες ροπής δίνονται στην Ενότητα 4.5.2.

#### **3.4.2 Έδρανα**

Τα έδρανα είναι μηχανικά στοιχεία σχεδιασμένα για να μειώνουν την τριβή μεταξύ ενός άξονα και της στήριξής του. Για το λόγο αυτό, η αποδοτικότητα των εδράνων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απόδοση του άξονα. Συνεπώς, αν και δεν είναι ένα νέο μηχανικό στοιχείο, η τεχνολογία των εδράνων μελετήθηκε και μελετάται περιεκτικά.

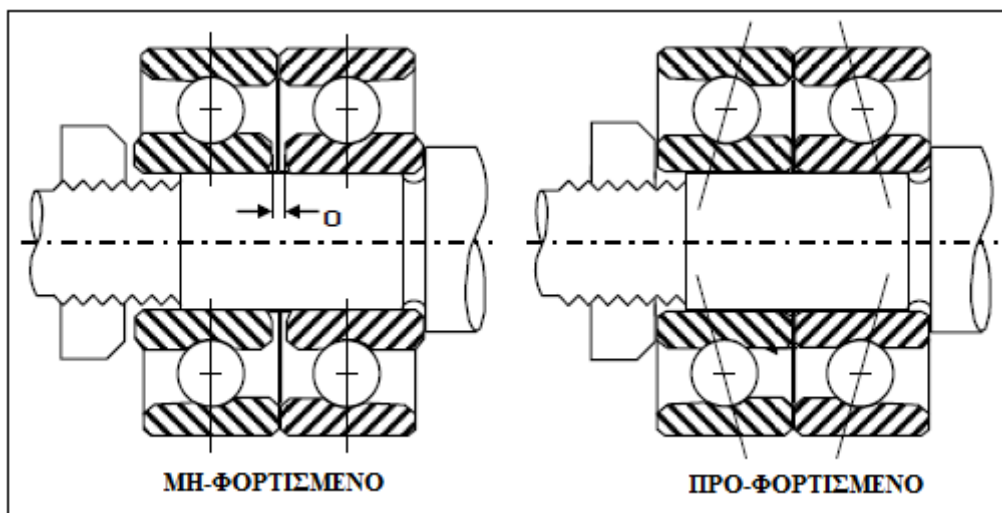
Τα έδρανα που χρησιμοποιούνται σε μία εργαλειομηχανή πρέπει να αγγίζουν κάποιες απαιτήσεις του άξονα όσον αφορά στην ταχύτητα περιστροφής, την χωρητικότητα και την διάρκεια ζωής του φορτίου. Αυτός είναι ο λόγος που τα κυλινδρικά έδρανα (ρουλεμάν) αποτελούν την πιο κοινή λύση. Η χρησιμοποίηση δαδίου, κυλίνδρου, έδρανα με βαθιές

αυλακιές ή σφαιρικά έδρανα γωνιακής επαφής στους άξονες των εργαλειομηχανών, εξαρτάται από την εφαρμογή. Τα σφαιρικά έδρανα γωνιακής επαφής συνδυάζουν ακρίβεια, χωρητικότητα φορτίου και υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Από την άλλη πλευρά, τα έδρανα δάδας παρέχουν υψηλότερη χωρητικότητα φορτίου και ακαμψία, αλλά δεν επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Τα μακρόστενα βαθιών χαρακιών έδρανα είναι παρόμοιου μεγέθους με τις σφαίρες που κυλούν μέσα σε αυτά. Μπορούν να πάρουν βαριά φορτία, αλλά μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα ευθυγράμμισης. Τα κυλινδρικά έδρανα επιτρέπουν μία συγκεκριμένη ποσότητα κινήσεων των αξόνων, όσον αφορά στην υποστήριξη. Είναι κατάλληλα για μεγάλα ακτινικά φορτία.

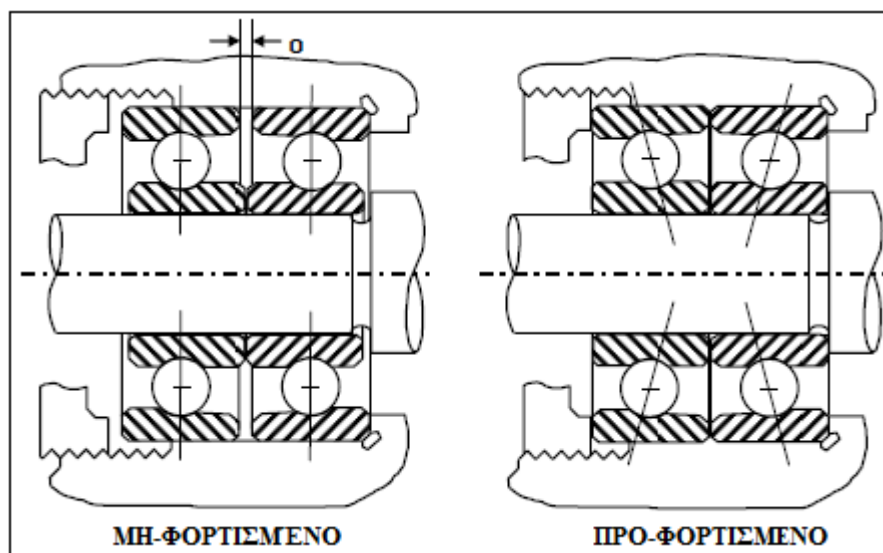
Οι κατασκευαστικές ανοχές για τις διαστάσεις των εδράνων και τα χαρακτηριστικά τους καθορίζονται από την Αμερικανική Επιτροπή Μηχανικών Εδράνων (American Bearing Engineers Committee (ABEC)). Τα μεγάλης ταχύτητας έδρανα των αξόνων συναντούν το ABEC9 για να έχουν περιστροφική ακρίβεια και ελαχιστοποιούν τη διαφυγή.

Η μέγιστη ταχύτητα στην οποία τα έδρανα μπορούν να λειτουργήσουν είναι ο παράγοντας  $d \cdot N$ , επίσης γνωστός ως ικανότητα ταχύτητας (speedability), όπου  $d$  είναι η μέση διάμετρος του εδράνου και  $N$  είναι η ταχύτητα σε rpm. Ένα έδρανο υψηλής ταχύτητας απαιτεί ένα  $d \cdot N$  έως 1,500,000 και τα μόνα έδρανα που μπορούν να φτάσουν τέτοιες τιμές είναι τα σφαιρικά έδρανα γωνιακής επαφής. Αυτά μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από αξονικά και ακτινικά φορτία. Έχουν μία ονομαστική γωνία επαφής, τυπικά  $15^\circ$  έως  $25^\circ$  καθορισμένη από την γραμμή επαφής σφαιρικών αυλακιών, και είναι κάθετη στον άξονα. Στην διάτρηση, ο άξονας έχει υψηλότερο φόρτιση στην αξονική κατεύθυνση, έτσι πρέπει να επιλεγούν οι υψηλότερες γωνίες επαφής. Στην επιπεδοποίηση, το ακτινικό φορτίο είναι υψηλότερο έτσι απαιτούνται χαμηλότερες γωνίες.

Για να λειτουργήσουν σωστά, τα έδρανα πρέπει να φορτωθούν από πριν, εφαρμόζοντας ένα σταθερό αξονικό φορτίο. Αυτό εξαλείφει το αξονικό και ακτινικό παιχνίδι, αυξάνει την ακαμψία του εδράνου, μειώνει τις διαφυγές, αποτρέπει την ολίσθηση των σφαιρών υπό υψηλές επιταχύνσεις και μειώνει την μεταβολή της γωνίας επαφής σε υψηλές ταχύτητες. Ωστόσο, η υπερβολική προφόρτιση οδηγεί σε εκτεταμένη παραγωγή θερμότητας σε καταστάσεις εκτελέσεων και μειώνει την ζωή του εδράνου. Η προφόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί: α) χρησιμοποιώντας ελατήρια, β) μέσω αξονικής προσαρμογής ή γ) χρησιμοποιώντας αμφίδρομα έδρανα. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ελατήριο που φορτίζει το μη περιστρεφόμενο αυλάκι. Είναι η πιο απλή, και παρέχει μία σταθερή προφόρτιση. Για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας ένα υδραυλικό σύστημα ή ένα σύστημα πεπιεσμένου αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την προφόρτιση σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής. Η αξονική προσαρμογή παρέχει μία σταθερή προφόρτιση χρησιμοποιώντας αποστάτες ή περιτυλιγμένες ροδέλες ακριβείας. Αυτή η μέθοδος απαιτεί ακρίβεια για να αποφευχθεί η εκτεταμένη προφόρτιση, λόγω της εγκατάστασης ή της θερμικής ανάπτυξης στις συνθήκες εκτέλεσης. Τα αμφίδρομα έδρανα συνδυάζουν πολλά έδρανα γωνιακής επαφής και η προφόρτιση δίνεται από την διαμόρφωση του πλαισίου στήριξης. Με αυτή την μέθοδο, τα έδρανα μοιράζονται τα φορτία και επιτυγχάνεται μία γενική αύξηση της ακαμψίας. Τα έδρανα μπορούν να στηριχτούν με πολλούς τρόπους, δείτε τις Εικόνες 3.11, 3.12 και 3.13:



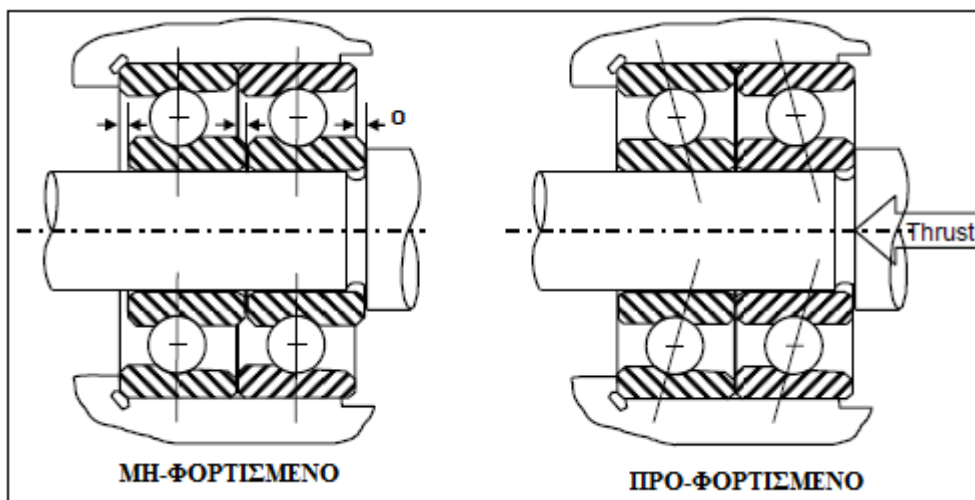
Σχήμα 3. 11 – Στήριξη εδράνου back-to-back, «ο» είναι το συνολικό εκτόπισμα της προφόρτισης.



Σχήμα 3. 12 – Στήριγματα εδράνων Tandem, «ο» είναι το συνολικό εκτόπισμα της προφόρτισης.

Η «Back-to-back» ή **DB** στήριξη αποτελεί την πιο κοινή τεχνική. Τα εσωτερικά ακροφύσια αρχικά απαλλάσσονται και στη συνέχεια συσφίγγονται μεταξύ τους. Αυτό ονομάζεται επίσης στήριξης «ο» λόγω του σχήματος των γραμμών επαφής. Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει μία καλή ευθυγράμμιση μεταξύ του περιβλήματος και του άξονα. Με την σωστή προφόρτιση, η μέθοδος αυτή παρέχει καλή ακρίβεια και υψηλή ακαμψία.

Η «Face-to-face» ή στήριξη **DF**: Τα εξωτερικά ακροφύσια αρχικά απαλλάσσονται και στη συνέχεια συσφίγγονται μεταξύ τους. Ονομάζονται επίσης στήριξη «X» λόγω των γραμμών επαφής. Παρέχει μία υψηλότερη ακτινική και αξονική ακαμψία και καλή προσαρμογή της ευθυγράμμισης. Ωστόσο, η ικανότητα ταχύτητας είναι χαμηλότερη από την στήριξη back-to-back.

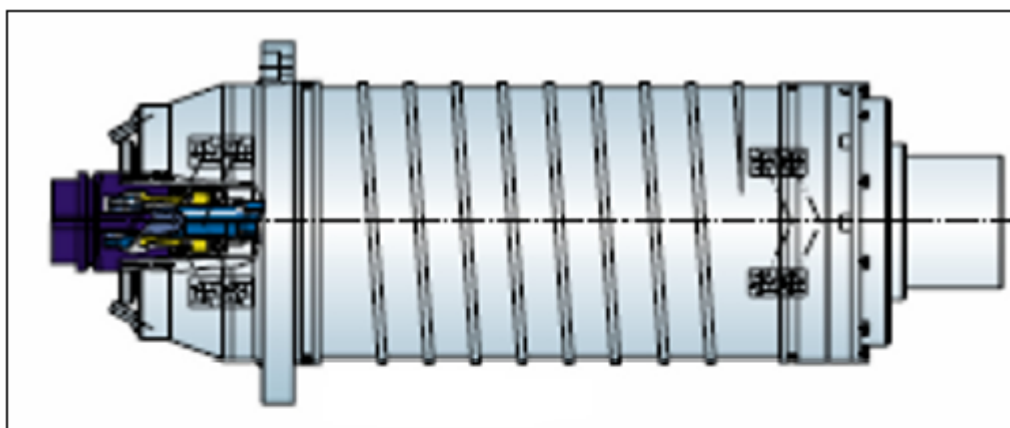


Σχήμα 3. 13 – Στήριξη εδράνων «Face-to-face» και Tandem, «ο» είναι το συνολικό εκτόπισμα της προφόρτισης.

Η «Tandem» ή στήριξη DT: Τα εσωτερικά και εξωτερικά ακροφύσια έχουν κάθετα εκτοπίσματα, έτσι ώστε οι γραμμές επαφής να είναι παράλληλες. Αυτό παρέχει υψηλότερη ικανότητα φορτίου, λόγω του διαμοιρασμού του φορτίου. Τα φορτία αντιστροφής δεν μπορούν να ληφθούν ως στηρίγματα DB ή DF.

Αν ο άξονας προσπαθήσει να λειτουργήσει κάτω από υψηλά φορτία, αντί από ένα σύνολο δύο εδράνων, τρία ή και περισσότερα έδρανα μπορούν να συναρμολογηθούν ακολουθώντας τις αναφερόμενες ρυθμίσεις.

Όσον αφορά στις ρυθμίσεις των εδράνων στον άξονα, το περίβλημα του άξονα φιλοξενεί τα έδρανα. Γενικά, διευθετούνται ως ακολούθως: στην άκρη του άξονα υπάρχουν ένα ή περισσότερα ζευγάρια εδράνων γωνιακής επαφής και κοντά στην πίσω μεριά του άξονα, υπάρχει ένα ακόμη ζευγάρι που μπορεί να είναι έδρανα γωνιακής επαφής, έδρανα με βαθιές αυλακίες ή κυλινδρικά έδρανα. Στην πραγματικότητα, μία συνηθισμένη και απλή διαμόρφωση αποτελείται από την τοποθέτηση ενός ζεύγους tandem στην άκρη του άξονα, και ενός άλλου στο πίσω μέρος, ρυθμίζοντας μία γενική εγκατάσταση DB, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14. Ωστόσο, η επιλογή και η τοποθεσία των εδράνων εξαρτάται από τις απαιτήσεις σχεδιασμού του άξονα και υπάρχει μία τεράστια ποικιλία ρυθμίσεων.



Άξονας κινήτηῃρα	Πρότυπο	Επιλογή 1	Επιλογή 2	Επιλογή 3
Ισχύς	21 kW	12 kW	27 kW	60 kW
Κίνηση	Ασύγχρονος	Ασύγχρονος	Σύγχρονος	Σύγχρονος
Ροπή (S6)	120 Nm (S6)	42 Nm (S6)	178 Nm (S6)	100 Nm (S1)
Μεγ. ταχύτητα	18000 r.p.m.	30000 r.p.m.	10000 r.p.m.	24000 r.p.m.
Ονομ. ταχύτητα	2000 r.p.m.	2840 r.p.m.	2000 r.p.m.	8000 r.p.m.
Διεπ. εργαλείου	HSK A63	HSK E50	HSK A63	HSK A63
Συστ. σύσφιξης	Υδρομηχανικός			
Ισχύς σύσφιξης	19 kN	12 kN	19 kN	19 kN

Σχήμα 3. 14 – Η βιομηχανία αξόνων παρέχει διαφορετικές διαμορφώσεις αξόνων (CourtesyEDEL). Επάνω, η διαμόρφωση των γωνιακών εδράνων στον άξονα: γενική διαμόρφωση DB με διευθέτηση DT στο μπροστινό έδρανο, και DT στο πίσω έδρανο.

### 3.4.2.1 Η Διάρκεια Λειτουργίας των Εδράνων

Η κοινή αιτία αποτυχίας των εδράνων είναι η κόπωση. Η ζωή των εδράνων επηρεάζεται από τα ακτινικά και αξονικά φορτία, από τα επίπεδα κραδασμών, τις ταχύτητες εργασίας, την θερμοκρασία και την λίπανση. Γενικά, ένα έδρανο άξονα φτάνει τις 5,000 με 7,000 ώρες εργασίας καλής χρήσης. Τώρα θα περιγράψουμε συνοπτικά τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο DIN/ISO 76 (αναλογία στατικού φορτίου) και στο DIN/ISO 281 (αναλογία δυναμικού φορτίου, αναλογία ζωής), τα οποία παρέχονται συνήθως από τους κατασκευαστές εδράνων. Η εξίσωση 3.2 μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την αναλογία δυναμικού φορτίου C σε Newton για δύο ή περισσότερα έδρανα. Γενικά, το C είναι ένας παράγοντας που προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή.

$$C = i^{0.7} \times C_s^{bearing} \quad (3.2)$$

Όπου  $C_s^{bearing}$  είναι η αναλογία φορτίου ενός μονού εδράνου σε Newton, και i είναι ο αριθμός των εδράνων στο σύνολο των εδράνων. Το ισοδύναμο δυναμικό φορτίο P υπολογίζεται όπως ακολούθως σε Newtons.

$$P = X \times F_r + Y \times F_a \quad (3.3)$$

Όπου, X και Y είναι ο ακτινικός και ο αξονικός παράγοντας, αντίστοιχα.  $F_r$  και  $F_a$  είναι το ακτινικό και το αξονικό φορτίο, αντίστοιχα, τα οποία δίνονται επίσης σε Newton. Η ονομαστική αναλογία  $L_{10h}$  μπορεί να υπολογιστεί σε ώρες χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση η οποία βασίζεται σε μία πιθανότητα αποτυχίας 10%:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot N} \cdot \left( \frac{C}{P} \right)^3 \quad (3.4)$$

όπου N είναι η ταχύτητα του άξονα σε rpm, C είναι η αναλογία δυναμικού φορτίου και P είναι το ισοδύναμο δυναμικό, που υπολογίστηκαν και τα δύο πριν. Η προσαρμοσμένη αναλογία  $L_{nah}$  σε ώρες υπολογίζεται ως:

$$L_{nah} = a_1 \cdot a_{23} \cdot f_t \cdot L_{10h} \quad (3.5)$$

όπου  $f_t$  είναι ο παράγοντας για την θερμοκρασία λειτουργίας και οι παράγοντες  $a_1$  και  $a_{23}$ , προμηθεύονται από τον προμηθευτή.

### 3.4.2.2 Μεταλλικά και Υβριδικά-Κεραμικά Έδρανα

Τα έδρανα που χρησιμοποιούνταν από τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών ήταν παραδοσιακά μεταλλικά, αλλά τα τελευταία χρόνια, τα υβριδικά-κεραμικά έδρανα έχουν γίνει δημοφιλή λόγω της βελτιωμένης τους απόδοσης και της καταλληλότητας για μηχανικές κατεργασίες υψηλής ταχύτητας; δείτε Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1** – Σύγκριση των ιδιοτήτων των μεταλλικών σφαιρών και των κεραμικών σφαιρών των εδράνων.

Ιδιότητες (μονάδες)	Συμβατικό μεταλλικό έδρανο	Υβριδικό-κεραμικό (Si3N4) έδρανο
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	208.00	315.00
Ακαμψία (VickersRc)	60.00	78.00
Πυκνότητα (g/cm3)	7.80	3.20
Μεγ. θερμοκρασία χρήσης (°C)	120.00	800.00
Συντελεστής διαστολής ( $10^{-6}/K$ )	11.50	3.20
Αναλογία Poisson	0.30	0.26
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	45.00	35.00
Χημικός αδρανής	Όχι	Ναι
Ηλεκτρικά αγωγίμα	Ναι	Όχι
Μαγνητικά	Ναι	Όχι

Τυπικά, χρησιμοποιούνται οι αυλακίες από χάλυβα και οι σφαίρες από Νιτρίδιο Πυριτίου ( $Si_3N_4$ ). Οι κεραμικές μπάλες μπορεί να ζυγίζουν μέχρι 40% λιγότερο από τις μεταλλικές; έτσι χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για να συνεχίσουν να κινούνται και υπάρχει μία μείωση στην φυγόκεντρο φόρτιση και στην ολίσθηση. Επιπλέον, οι κεραμικές σφαίρες έχουν υψηλότερη ακαμψία έτσι, σε υψηλότερες ταχύτητες, υφίστανται λιγότερη παραμόρφωση λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων. Σαν συνέπεια, οι κεραμικές σφαίρες μπορούν να κυλήσουν μέχρι 30% πιο γρήγορα από τις σφαίρες από χάλυβα (ατσάλι), με την ίδια διάρκεια λειτουργίας.

Οι κεραμικές σφαίρες έχουν χαμηλότερη έλξη με τα χαλύβδινα αυλάκια, έτσι υπάρχει πολύ μικρή φθορά πρόσφυσης. Στις ατσάλινες σφαίρες, οι μικροσκοπικές ψυχρές συγκολλήσεις μεταξύ των σφαιρών και της αυλακιάς, σπάνε κατά τη διάρκεια της περιστροφής, δημιουργώντας τραχύτητα στην επιφάνεια, που αυξάνει τις δυνάμεις τριβής και τον κίνδυνο της εκτεταμένης θερμότητας.

Έχουν επίσης ένα χαμηλότερο συντελεστή τριβής, που σημαίνει πως λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό αποτελεί ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, καθώς αυξάνει όχι μόνο τη διάρκεια ζωής των εδράνων, αλλά επίσης και τη διάρκεια ζωής του λιπαντικού.

Πειραματικοί έλεγχοι έχουν καταδείξει πως τα υβριδικά έδρανα λειτουργούν σε χαμηλότερα επίπεδα κραδασμών. Καθώς έχουν υψηλότερη ακαμψία και μικρότερη μάζα, έχουν επίσης υψηλότερες φυσικές συχνότητες και δυναμική ακαμψία.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες σημαίνουν πως με τις κεραμικές σφαίρες βελτιώνεται η ακρίβεια και το έδρανο φτάνει υψηλότερες ταχύτητες και έχει μία πιο μεγάλη διάρκεια ζωής, συχνά διπλάσια από εκείνη των συμβατικών μεταλλικών εδράνων. Ωστόσο, η χρήση τους απαιτεί ειδική προσοχή από τον μηχανικό να αποφύγει τις συγκρούσεις, επειδή το βασικό μειονέκτημα είναι ο υψηλός κίνδυνος εύκολης θραύσης όταν υπάρχει μία σύγκρουση.

### 3.4.2.3 Λίπανση

Η λίπανση των εδράνων παίζει ρόλο κλειδί στον τρόπο που αυτά εκτελούνται και λειτουργούν. Η λίπανση αποτρέπει την άμεση επαφή με τα έδρανα, σχηματίζοντας ένα φιλμ υγρού μεταξύ της σφαίρας, του ακροφυσίου και του κλωβού. Στα έδρανα από χάλυβα, αποφεύγεται η άμεση επαφή μετάλλου με μέταλλο, και έτσι μειώνεται η φθορά και η διάβρωση. Τα συστήματα λίπανσης μπορεί να χρησιμοποιούν είτε γράσο ή λάδι/αέρα, ως λιπαντική ουσία.

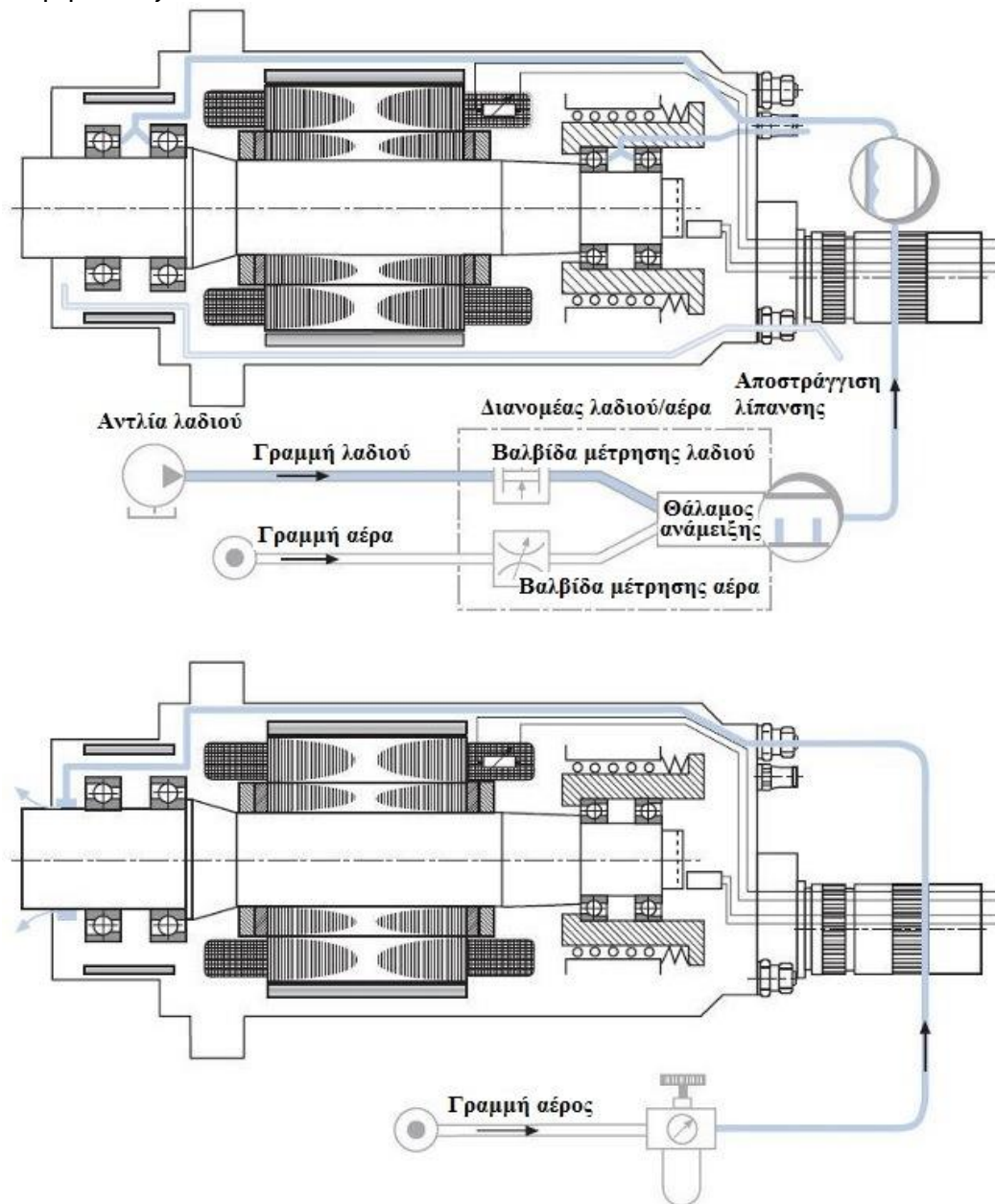
Η λίπανση με γράσο είναι η πιο κοινώς χρησιμοποιούμενη για τις συμβατικές μηχανικές κατεργασίες, και για μερικές περιπτώσεις HSM, όπου οι απαιτούμενες ταχύτητες περιστροφής του άξονα δεν είναι τόσο υψηλές. Αυτού του είδους η λίπανση είναι φθηνή και μόνιμη, έτσι χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση. Ωστόσο, δεν μπορούν να λειτουργήσουν συνεχόμενα σε έναν παράγοντα  $d \cdot N$  πάνω από 850,000, αφού υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν το γράσο και την αύξηση κινδύνου ζημιάς του εδράνου.

Αν απαιτούνται υψηλότερες ταχύτητες στα έδρανα, είναι πιο κατάλληλη η λίπανση λαδιού-αέρα, καθώς λιπαίνει, καθαρίζει και ψύχει τα έδρανα. Ωστόσο, αυτή είναι μία πιο ακριβή μέθοδος επειδή χρειάζεται παρακολούθηση, έλεγχο και συντήρηση, όπως και μία συνεχή τροφοδότηση καθαρού ξηρού αέρα; δείτε την Σχήμα 3.15. Είναι ευαίσθητη στις μεταβολές στη σύνθεση του μίγματος αέρα-λαδιού; μία υπερβολική ποσότητα λαδιού μπορεί να θερμάνει το έδρανο, ενώ ανεπάρκεια λαδιού οδηγεί σε πρόωρη φθορά. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι μίξης του λαδιού με τον αέρα, και μεταφοράς τους στο έδρανο: λάδι-αχλός, λάδι-αέρας, λάδι-γαγάτης, και παλμικό λάδι-αέρας. Η λίπανση λαδιού-αχλός είναι δύσκολο να ελεγχθεί, να μετρηθεί και να μεταφερθεί, αφού η αχλός μπορεί να μειωθεί σε μεγάλες σταγόνες λαδιού, και η ομοιόμορφη κατανομή του λιπαντικού γίνεται δύσκολη. Η μέθοδος λαδιού-αέρα είναι πιο ελεγχόμενη και απαιτεί μία αντλία υψηλής πίεσης και βαλβίδες ανάμιξης. Το πλεονέκτημα είναι πως η μίξη παράγεται κοντά στα έδρανα και παρέχεται μία ακριβής ποσότητα. Η μέθοδος λαδιού-γαγάτη βασίζεται σε μία αντλία υψηλής πίεσης, που παρέχει λίπανση κατευθείαν στα ακροφύσια των εδράνων. Χρησιμοποιείται σε άξονες υψηλής απόδοσης με υψηλά φορτία και ταχύτητες. Ωστόσο, απαιτεί μία σύνθετη αντλία, μία δεξαμενή λαδιού και ένα σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας. Τέλος, η μέθοδος παλμικού λαδιού-αέρα, ψεκάζει λάδι σε πολύ μικρές ποσότητες με συχνότητα ψεκασμού που μπορεί να είναι περιοδική ή να εξαρτάται από τις συνθήκες εργασίας του άξονα.

Η αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου λίπανσης πρέπει να λάβει υπόψη του παράγοντες όπως είναι το μήκος του χρόνου λειτουργίας μεταξύ των λειτουργιών συντήρησης, την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, την θερμότητα που παράγεται και την απώλεια μέσω της τριβής, όπως και συγκεκριμένες περιβαλλοντικές πτυχές όπως ανακύκλωση, διάθεση, κλπ.

Όσο σημαντική είναι η λίπανση, είναι και η σωστή σφράγιση του άξονα για να αποφευχθεί η εισαγωγή των ακαθαρσιών στα έδρανα. Η πιο κοινή μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία μίας υπέρ-πίεσης μέσα στον άξονα, με τέτοιο τρόπο που η ροή να εξέρχεται με τέτοιο τρόπο που τα σωματίδια δεν θα μπορούν να εισβάλουν; δείτε Σχήμα 3.15. Μία άλλη μέθοδος που

συνήθως συνδυάζεται με την υπέρ-πίεση είναι η χρήση της στεγανοποίησης λαβυρίνθου στην άκρη του άξονα.



Σχήμα 3.15 – Η μέθοδος λαδιού-αέρα, πάνω, απαιτεί την προσθήκη ενός συστήματος λίπανσης για να αντλήσει, ελέγξει και να ανακατέψει το μέσο λίπανσης. Σε σύγκριση, η λίπανση με γράσο, κάτω, είναι πιο απλή. Εδώ παρουσιάζεται το κύκλωμα του αέρα που δημιουργεί μία υπέρ-πίεση στην μύτη του άξονα. Τα σχηματικά είναι από GMN.

#### 3.4.2.4 Μαγνητικά Έδρανα

Τα ενεργά μαγνητικά έδρανα (AMB) εργάζονται με εντελώς διαφορετικές αρχές από ότι τα συμβατικά συστήματα κυλινδρικών εδράνων, καθώς υποστηρίζουν φορτία χάρη στην μαγνητική μετεώριση. Τα AMB αποτελούνται από ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιώντας μία σταθερή ροή ηλεκτρικής ισχύος. ακτινικά μαγνητικά έδρανα χρειάζονται τουλάχιστον μπροστά και πίσω και ένα αξονικό μαγνητικό έδρανο. Ένα σύνολο από ενισχυτών ισχύος τροφοδοτούν με ρεύμα τους ηλεκτρομαγνήτες, και ένας ελεγκτής, καθώς και ένα σύνολο από αισθητήρες διάκενου εργάζονται μαζί σε έναν κλειστό βρόχο, παρακολουθώντας και ελέγχοντας τη θέση του ρότορα μέσα στο κενό μετεώρισης. Αφού αποφεύγεται η επαφή, οι επιδράσεις που προέρχονται από την επαφή, όπως η τριβή, οι αυξήσεις της θερμοκρασίας και η φθορά, μειώνονται επίσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα

καθιστούν μία καλή λύση για άξονες υψηλής ταχύτητας. Επιπλέον, οι ηλεκτρομαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργοποιητές και αισθητήρες των συνθηκών εκτέλεσης του άξονα. Αυτός είναι ο λόγος που εξερευνάται η χρήση των υβριδικών αξόνων με κυλινδρικά έδρανα και AMBs, χρησιμοποιώντας το AMB για να απορροφήσει τα δυναμικά φορτία της διαδικασίας και τα κυλινδρικά έδρανα για να τοποθετήσουν και να υποστηρίξουν τον άξονα. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα είναι πως είναι ακριβά και πολύπλοκα.

#### 3.4.2.5 Υδροστατικά Έδρανα

Στους υδροστατικούς άξονες, ψεκάζεται ένα λεπτό στρώμα λαδιού με υψηλή πίεση για να παράγει αυτό που είναι γνωστό ως υδροστατικό ισοζύγιο στο εσωτερικό του εδράνου. Αυτά τα έδρανα έχουν κεραμικά πέλματα, τα οποία περιέχουν το λάδι που ψεκάζεται με υψηλή πίεση για να στηρίξει τον άξονα.

Η μέθοδος αυτή αποφεύγει μερικά μειονεκτήματα των συστημάτων με σφαιρικά έδρανα, όπως την χαμηλή απόσβεση, μία περιορισμένη διάρκεια ζωής, και τα προβλήματα που προέρχονται από την θερμότητα και τους κραδασμούς. Συγκριτικά, τα υδροστατικά έδρανα είναι στην ουσία ελεύθερα φθοράς, λειτουργούν με μικρό θόρυβο, και παρέχουν εξαιρετική ακαμψία και απόσβεση; έτσι, αποδίδουν καλύτερα υπό δυναμικά φορτία. Το λάδι ψεκάζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, έτσι μειώνει την θερμική διαστολή του άξονα. Δεν μπορούν ωστόσο, να φτάσουν το ίδιο  $d^*N$  με τα κυλινδρικά έδρανα. Επιπλέον, στις μέρες μας το κόστος της προμήθειας λαδιού και του συστήματος στεγανοποίησης, τα κάνει πιο προσιτά. Επίσης, σε χαμηλές ταχύτητες, αποδίδουν καλύτερα από τα υδροδυναμικά έδρανα, λόγω της χωρητικότητας υψηλού φορτίου και των συνθηκών τριβής. Έτσι, αυτά τα έδρανα χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές όπως λείανση, επιπεδοποίηση και εργαλειομηχανές περιστροφής.

#### 3.4.2.6 Υδροδυναμικά Έδρανα

Ο λειτουργικός μηχανισμός των υδροδυναμικών εδράνων βασίζεται στην αρχή υγρού-σφήνας. Για εφαρμογές εργαλειομηχανών, ο άξονας υποστηρίζεται από στοιχεία ρυθμιζόμενου πέλδου που μπορεί να είναι εφοδιασμένα με ελατήριο ή μπορεί να κινούνται λόγω της ευκαμψίας του υλικού στο οποίο είναι ενσωματωμένα. Η ταχύτητα εργασίας του άξονα πρέπει να είναι στο φάσμα τριβής του υγρού αφού, σε χαμηλότερες ταχύτητες ή όταν ο άξονας ξεκινάει ή σταματάει, το ποσοστό φθοράς αυξάνει καθώς εκτελείται κάτω από οριακές συνθήκες λίπανσης. Αυτά τα έδρανα χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά στις μηχανές λείανσης, όπου οι ταχύτητες περιστροφής είναι αρκετά υψηλές και παραμένουν σχεδόν σταθερές. Ωστόσο, σήμερα, έχουν γενικά αντικατασταθεί από υδροστατικά έδρανα.

#### 3.4.2.7 Αεροστατικά Έδρανα

Η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με εκείνη των υδροστατικών εδράνων. Τα πλεονεκτήματα αυτών των εδράνων είναι η χαμηλή τριβή, η χαμηλή παραγωγή θερμότητας, η ακριβής εκτέλεση, η μακρά διάρκεια ζωής, και η απλή κατασκευή επειδή δεν υπάρχει ανάγκη στεγανοποιήσεων. Ωστόσο, έχουν μικρή χωρητικότητα φορτίου, χαμηλή απόσβεση και μία τάση να δονούνται. Έτσι, είναι κατάλληλα για εφαρμογές πολύ υψηλής ταχύτητας με χαμηλά φορτία. Στην βιομηχανία εργαλειομηχανών, χρησιμοποιούνται σε μηχανές λείανσης ακριβείας και για εφαρμογές υπερβολικής ακριβείας.

### **3.4.3 Η Εργαλειοθήκη**

Στην επιπεδοποίηση, η εργαλειοθήκη είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του εργαλείου κοπής και του άξονα, και εξασφαλίζει την μετάδοση της περιστροφικής κίνησης του άξονα στο εργαλείο κοπής. Η επιλογή της εργαλειοθήκης προσδιορίζεται από την απόδοση και τις δυνατότητες μίας εργαλειομηχανής. Απαιτεί ένα απλό σύστημα σύσφιξης και χαλαρώματος του

εργαλείου, επιτρέπει αυτόματη αλλαγή εργαλείου μέσα στην εργαλειομηχανή, εξασφαλίζει μία ακριβής ρύθμιση με τον άξονα και πρέπει να εγγυάται μία σωστή εκκεντρότητα και ισορροπία. Μία ελαττωματική εργαλειοθήκη μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στην ακρίβεια των διαστάσεων και στην ποιότητα της επιφάνειας του κομματιού, και μπορεί να μειώσει την διάρκεια ζωής υπηρεσίας του εργαλείου κοπής και του άξονα. Σήμερα, οι κοίλες εργαλειοθήκες γίνονται με τέτοιο τρόπο που το υγρό κοπής μπορεί να ρέει μέσω του άξονα, στην άκρη του εργαλείου.

Μία εργαλειοθήκη για επιτεδοποίηση έχει τρία βασικά μέρη: το δαδί, τη φλάντζα και το καστόνι (θήκη). Το δαδί είναι το κωνικό σημείο που παρουσιάζεται μέσα στον άξονα. Η φλάντζα είναι το εξάρτημα που εξυπηρετεί στο κράτημα της εργαλειοθήκης, όταν βρίσκεται στο σημείο αποθήκευσης για την αλλαγή του εργαλείου της εργαλειομηχανής. Το καστόνι είναι το εξάρτημα της εργαλειοθήκης που πραγματικά κρατάει το εργαλείο κοπής.

#### 3.4.3.1 Κωνοειδές στοιχείο (taper)

Πολλές τεχνολογικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί από την ανάγκη να τυποποιηθεί ο τρόπος που κρατιέται το εργαλείο κοπής στις εργαλειομηχανές. Αυτά τα πρότυπα τυποποίησης είναι τα BT, CAT(επίσης γνωστό και ως V-Flange), ISO (επίσης γνωστό και ως SK) και HSK; δείτε σχήμα 3.16. Μία πρόσφατη εναλλακτική είναι το Big-Plus διπλής επαφής. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε τις τεχνολογίες εργαλειοθήκης R8 και την Morse που χρησιμοποιούνται στις χειροκίνητες μηχανές.

Οι κωνικοί σχηματισμοί, όπως είναι οι BT, CAT και ISO, χρησιμοποιούνται συνήθως στις συμβατικές μηχανές φραιζαρίσματος. Αντίθετα, οι εργαλειοθήκες HSK είναι καταλληλότερες για επιτεδοποίηση υψηλής ταχύτητας. Οι κωνικές εργαλειοθήκες όπως οι BT, CAT και ISO είναι συζευγμένες στον άξονα μέσω «δύο κώνων σε επαφή». Η φυγόκεντρος δύναμη που αυξάνει με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, μαζί με τις θερμικές επιδράσεις, τείνει να πιέζει τον κώνο μέσα στον άξονα, συνεπώς αυξάνοντας την δύναμη συγκράτησης. Η μετατόπιση που υφίσταται ο κώνος μέσα στον άξονα, μπορεί να προκαλέσει ανακρίβεια στην μηχανική κατεργασία.



Σχήμα 3. 16 – Τυπικές εργαλειοθήκες από την Maritool, από αριστερά προς τα δεξιά: BT50, CAT50, ISO30, HSK50A.

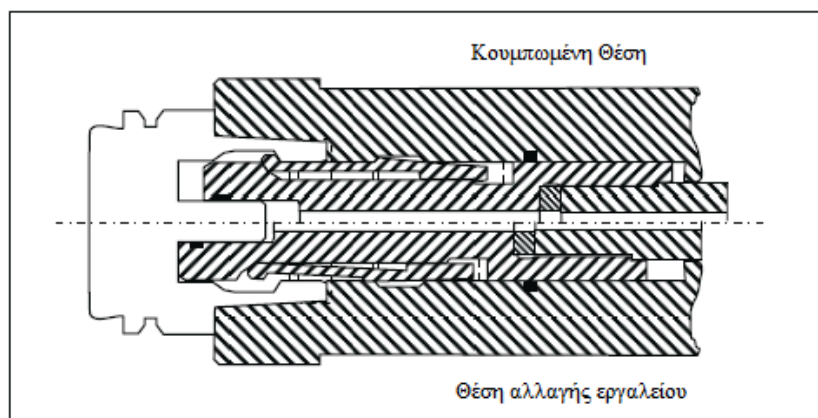
Οι εργαλειοθήκες ISO είναι πιο διαδεδομένες στην Ευρώπη για την παραδοσιακή μηχανική κατεργασία. Συσφίγγονται στην μηχανή, με τη μορφή υδραυλικών ή πνευματικών ενεργοποιητών. Οι διαστάσεις των κώνων ISO είναι τυποποιημένες και ταξινομούνται ως ISO30, ISO40 και ISO50, σύμφωνα με την εξωτερική διάμετρο του κώνου. Στις ΗΠΑ ωστόσο, οι εργαλειοθήκες CAT χρησιμοποιούνται πιο ευρέως στην παραδοσιακή μηχανική κατεργασία.

Η εργαλειοθήκη CAT δημιουργήθηκε από την εταιρία Caterpillar, για να τυποποιηθούν τα συστήματα εργαλειοθηκών στις εργαλειομηχανές τους. Αυτές οι θήκες είναι σχεδιασμένες σύμφωνα με το μέγεθος των κώνων, και ταξινομούνται ως CAT30, CAT40 και CAT50. Η

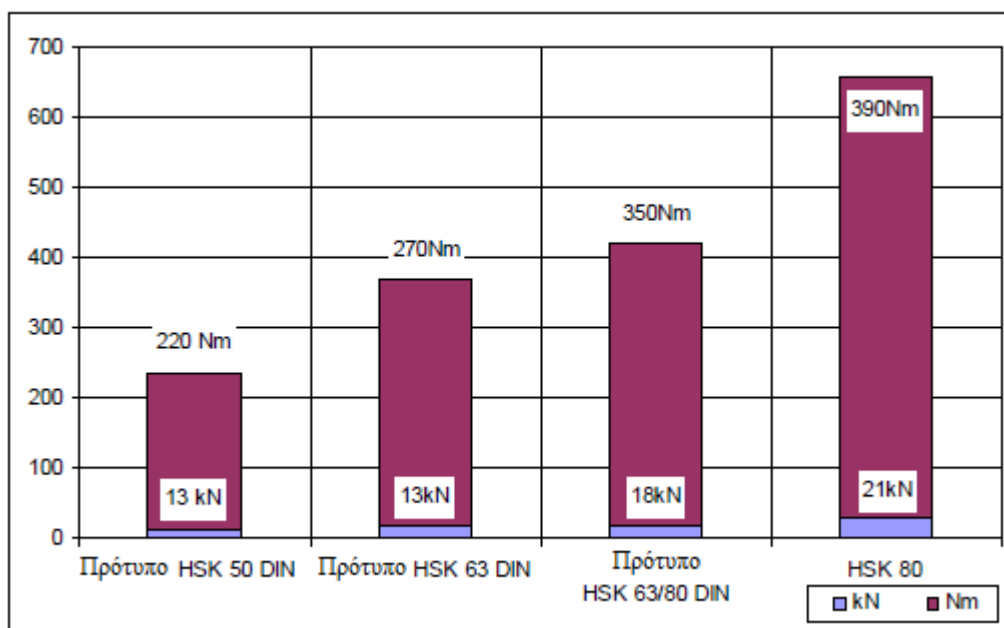
εργαλειοθήκη BT είναι παρόμοια με την CAT, με μικρές διαφορές, όπως το γεγονός ότι είναι συμμετρική, όσον αφορά στον περιστροφικό άξονα της ατράκτου, που βελτιώνει την απόδοση.

Η εργαλειοθήκη HSK, τώρα στο ISO 12164-1:2001, έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες, από την άποψη της HSM, όπου η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από ότι στις συμβατικές μηχανές φραιζαρίσματος. Καθώς αυξάνει η περιστροφική ταχύτητα, η φυγόκεντρος δύναμη αυξάνει την δύναμη συγκράτησης επάνω στο εργαλείο κοπής, όσον αφορά τα πλήκτρα (κλειδιά) κίνησης που είναι τοποθετημένα μέσα στο στέλεχος (κάτω μέρος της γάμπας δαχτυλιδιού) του μηχανισμού. Τα κλειδιά τείνουν να διαστέλλονται στο εσωτερικό τη εργαλειοθήκης, εξαιτίας των φυγόκεντρων δυνάμεων, με τέτοιο τρόπο που η επαφή μέταλλο-με-μέταλλο ενισχύεται και πιέζεται μέσα στον άξονα της ατράκτου. Συνεπώς, η ακαμψία της επαφής αυξάνεται και επιχειρούνται πιο επιθετικές λειτουργίες κοπής; δείτε την Σχήμα 3.17. Η δύναμη συγκράτησης μίας εργαλειοθήκης HSK, μπορεί να είναι διπλάσια από εκείνη μίας συμβατικής εργαλειοθήκης, όπως για παράδειγμα, μία BT. Στην διεπιφάνεια της BT, οι σφιγκτήρες βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά του στελέχους, έτσι τείνουν να χάσουν την επαφή και τη δύναμη συγκράτησης, καθώς η φυγόκεντρος δύναμη αυξάνει. Οι εργαλειοθήκες HSK αποδίδουν έως 5 φορές περισσότερο από τις ISO, όσον αφορά στην ακτινική ακαμψία. Επιπλέον, οι εργαλειομηχανές HSK προσφέρουν καλύτερη επαναληψιμότητα.

Υπάρχουν ποικίλοι προσδιοριστές για τις εργαλειοθήκες HSK. Υπάρχει ένας αριθμός που δηλώνει την εξωτερική διάμετρο της φλάντζας (25, 32, 40, 50, 63, 80, μέχρι 100mm) που ακολουθείται από ένα γράμμα που κυμαίνεται από A έως F. Τα πιο κατάλληλα γράμματα για ταχύτητες κατεργασιών είναι τα A, B, E και F. Το γράμμα A χρησιμοποιείται για εφαρμογές που απαιτούν μέτρια ροπή και υψηλή ταχύτητα περιστροφής με αυτόματη αλλαγή εργαλείου. Το γράμμα B, είναι για υψηλή ροπή, υψηλές ταχύτητες και αυτόματη αλλαγή εργαλείου. Το γράμμα C, είναι για μέτρια ροπή και υψηλή περιστροφική ταχύτητα, αλλά με χειροκίνητη αλλαγή εργαλείου. Το γράμμα D, είναι για υψηλή ροπή, υψηλή ταχύτητα και χειροκίνητη αλλαγή εργαλείου. Τα γράμματα E και F είναι επίσης για εφαρμογές HSM, αλλά με χαμηλή ροπή και πολύ υψηλές ταχύτητες. Τα E και F προσδιορίζουν εργαλειοθήκες HSK που είναι σχεδιασμένες για πολύ υψηλής ταχύτητας λειτουργίες που είτε δεν έχουν πλαίσιο εργασίας, ή για λειτουργίες κοπής που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ισορροπία διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας, έχοντας ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ιχνών κραδασμού. Η διάμετρος της εργαλειοθήκης καθορίζει την ακαμψία. Στο σχήμα 3.18, συγκρίνεται η στιγμή του λυγίσματος πολλών HSK κωνοειδών στοιχείων (tapers) με διαφορετικές παραμέτρους και σφιγμένων με την δύναμη που προτείνεται από τα πρότυπα.



Σχήμα 3. 17 – Θέσεις σύσφιξης και αλλαγής εργαλείου της εργαλειοθήκης HSK.



Σχήμα 3. 18 – Στιγμή λυγίσματος σε πολλά κωνοειδή στοιχεία HSK, με την αντίστοιχη δύναμη σύσφιξης.

Το πρόσφατα ανεπτυγμένο σύστημα Big-plus, συνίσταται σε ταυτόχρονη διπλή επαφή, για να εξασφαλίσει πως η εργαλειοθήκη τοποθετείται με ακρίβεια στον άξονα. Το κωνοειδές στοιχείο και η πρόσοψη της εργαλειομηχανής του άξονα, εφαρμόζουν μεταξύ τους λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης του άξονα, έτσι ώστε το κωνοειδές στοιχείο και η φλάντζα να εφάπτονται ταυτόχρονα. Το σύστημα αυτό επιτρέπει εναλλαξιμότητα με τις πρότυπες εργαλειοθήκες και προσφέρεται από πολλούς κατασκευαστές εργαλειομηχανών.

Μία εναλλακτική είναι το πρότυπο ICTM (Interface Committee for Turning-Mills), το οποίο είναι το πρότυπο που αναπτύχθηκε από 17 εταιρίες στην Ιαπωνία, όπως η επιφάνεια εργασίας των κέντρων τόννευσης (τόννευση και επιπεδοποίηση) που βασίζονται στον περιορισμένο τύπο δύο επιφανειών ISO 12164-1:2001. Είναι με τον τύπο HSK-A.

Τέλος, υπάρχει επίσης ένα ευρύ φάσμα άλλων εργαλειοθηκών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά από εταιρίες όπως οι Sandvik Coromant Capto, Kennametal KM ή Komet ABS. Αυτές οι εργαλειοθήκες χαρακτηρίζονται από μία πολυγωνικού σχήματος σύζευξη, και χρησιμοποιούνται στους τόννους και στις μηχανές φραιζαρίσματος, για μία γρήγορη αλλαγή εργαλείου. Το σχήμα 3.19 δείχνει έναν μηχανισμό σύσφιξης.



Σχήμα 3. 19 – Τμήμα ενός μηχανισμού σύσφιξης «μεγάλης ισχύος», από την Lair, δείχνονται οι εσωτερικές βελόνες που δημιουργούν την ακτινική δύναμη.

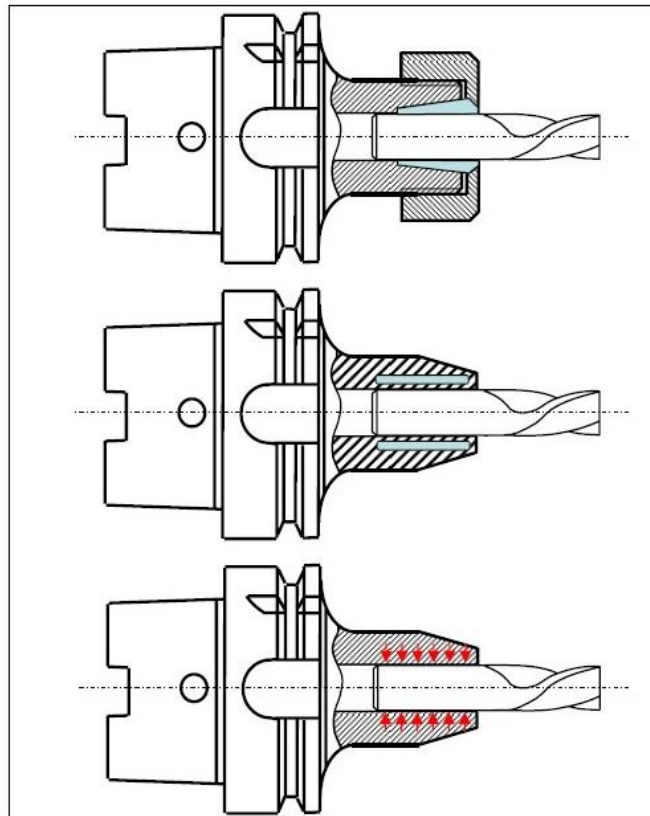
Στον χειρισμό αυτών των εργαλειοθηκών, είναι σημαντικό η προσοχή να εστιάζεται στον καθαρισμό και την συντήρηση των κώνων (ειδικά εκείνων υψηλής ακριβείας, όπως εκείνοι της HSK), αφού τα ρινίσματα και τα λιπαντικά μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοσή τους. Αν οι επιφάνειες επαφής είναι ανεπαρκώς καθαρές, η ποιότητα των επαφών μειώνεται, η οποία θα εμποδίσει την τακτοποίηση του κώνου μέσα στον άξονα. Συμβουλεύεται να πραγματοποιείται φύσημα του καστονίου πριν τη σύσφιξή του.

#### 3.4.3.2 Σφιγκτήρες

Υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι για την ασφάλεια του εργαλείου στην εργαλειοθήκη: μηχανικοί σφιγκτήρες (τσोक), υδραυλικοί σφιγκτήρες και σφιγκτήρες συστολής-διαστολής. Οι απαιτήσεις σύσφιξης του εργαλείου μέσα στην εργαλειοθήκη είναι παρόμοιες με εκείνες της εργαλειοθήκης μέσα στον άξονα: a) η μέγιστη ακαμψία του συνδέσμου; b) η ακριβής ευθυγράμμιση του άξονα του εργαλείου με τον άξονα της ατράκτου και c) η αποφυγή ανισορροπιών.

Η μηχανική σύσφιξη μέσω τσοκ είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος. Ουσιαστικά, το εργαλείο φορτώνεται πάνω στο τσοκ, το οποίο κρατάει το εργαλείο όταν είναι σφιγμένο. Η τμηματοποίηση του τσοκ το βοηθά να παραμορφωθεί σε έναν συγκεκριμένο βαθμό, επιτρέποντας την πίεση να διανεμηθεί ομοιόμορφα στο στέλεχος του εργαλείου. Είναι ένα σύστημα χαμηλού κόστους, ακόμη και για τις HSM, επειδή οι σιαγόνες σύσφιξης είναι ανταλλάξιμοι, ή ρυθμιζόμενοι, ώστε να μπορούν να κρατηθούν εργαλεία διαφορετικών διαμέτρων.

Μία βελτιωμένη εκδοχή των μηχανικών σφιγκτήρων είναι το «τσोक μεγάλης ισχύος», παρέχοντας 10% υψηλότερη ροπή και αξονική ακαμψία. Βασίζεται στις βελόνες που υπάρχουν μέσα σε δύο ελαφρώς γωνιακούς κώνους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20.



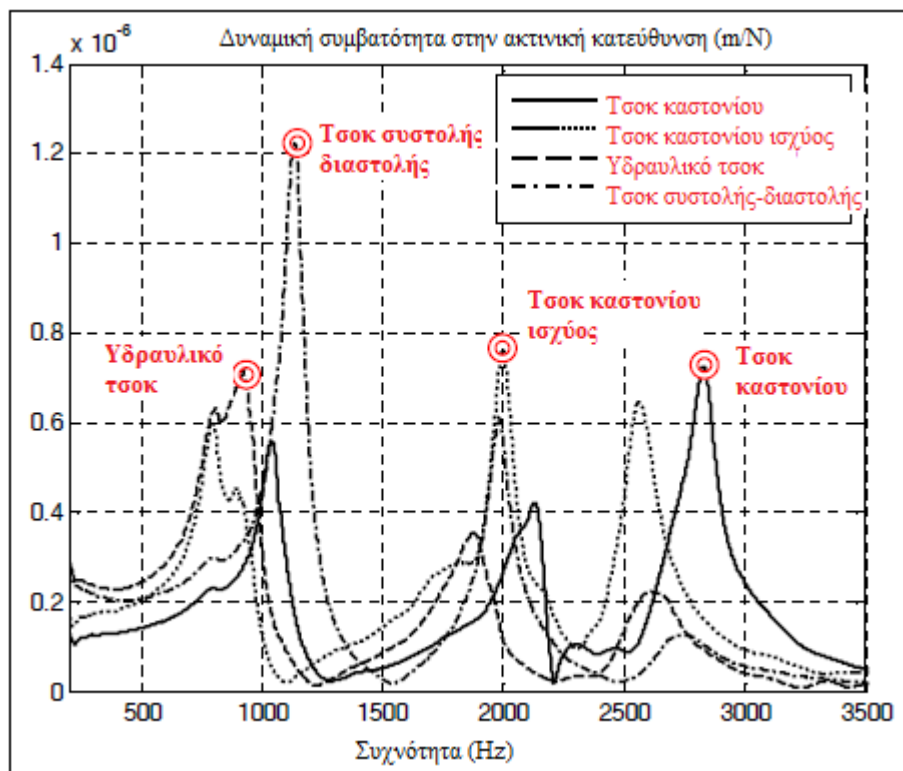
Σχήμα 3. 20 – Σχηματική αναπαράσταση ενός μηχανισμού σύσφιξης, ενός υδραυλικού τσοκ, και ενός στελέχους εργαλείου συστολής-διαστολής.

Το σχήμα 3.20 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα του μηχανισμού σύσφιξης ενός τσοκ καστονίου, ενός υδραυλικού τσοκ και ενός τσοκ συστολής-διαστολής.

Τα υδραυλικά τσοκ χρησιμοποιούν μία μεταλλική μεμβράνη για να περιβάλλει το στέλεχος του εργαλείου. Δίπλα στην μεμβράνη βρίσκεται ένα τέλεια σφραγισμένο υδραυλικό ρεζερβουάρ, το οποίο συνδέεται με έναν κοχλία ενεργοποίησης, ο οποίος μπορεί να αυξήσει την πίεση του υγρού. Η αύξηση στην πίεση του υγρού, μεταδίδεται στην μεμβράνη, η οποία ασφαλίσει το εργαλείο κοπής. Τα υδραυλικά τσοκ είναι ακριβά συστήματα. Επιπλέον, δεν είναι δυνατόν να ασφαλιστούν εργαλεία διαφορετικών διαμέτρων στο ίδιο τσοκ, αν και μερικοί κατασκευαστές προσφέρουν επιπλέον μεμβράνες που μπορούν να εισαχθούν μεταξύ του εργαλείου και του τσοκ, έτσι ώστε το ίδιο τσοκ να μπορεί να δεχτεί διαφορετικές διαμέτρους εργαλείων. Ωστόσο, αυτό έχει το μειονέκτημα μίας αναπόφευκτης ποσότητας ευθυγράμμισης.

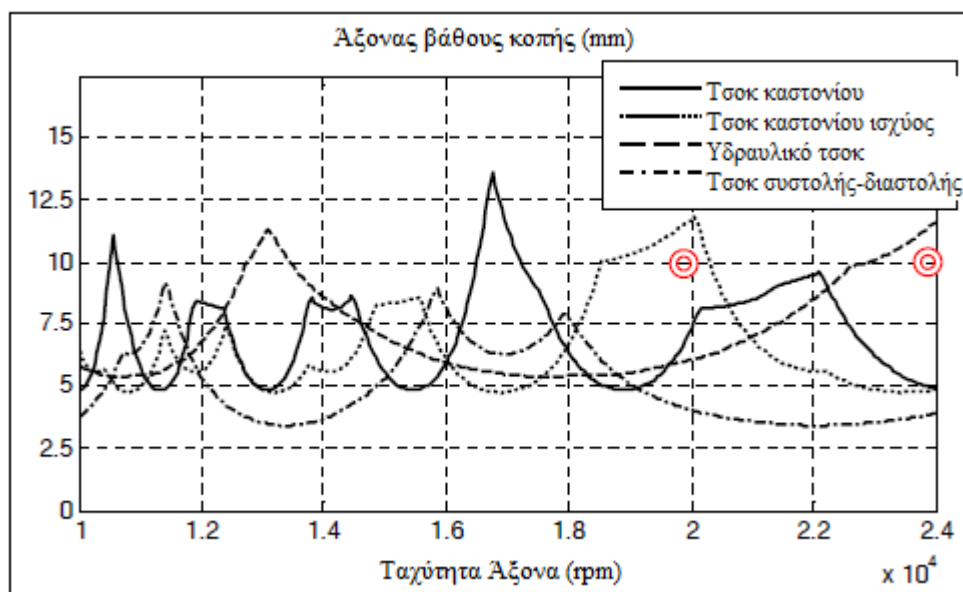
Τα τσοκ συστολής-διαστολής είναι συμπαγή τμήματα με ένα άνοιγμα υψηλής ακριβείας, στο οποίο φορτώνεται το εργαλείο κοπής. Σε θερμοκρασία δωματίου, το άνοιγμα είναι μικρότερο από το εργαλείο. Το τσοκ θερμαίνεται μέσω ενός επαγωγικού θερμαντήρα, και η θερμική διαστολή επιτρέπει στο εργαλείο να εισαχθεί. Στη συνέχεια το τσοκ κρυώνει πάλι (σε μερικά συστήματα παρέχεται σύστημα ψύξης), και το άνοιγμα συρρικνώνεται στο αρχικό του μέγεθος, σφίγγοντας το εργαλείο στην θέση του. Η ακαμψία αυτού του συστήματος συγκράτησης είναι πολύ υψηλή. Ανόμοια με το υδραυλικό τσοκ, το οποίο χρειάζεται μία εσωτερική δομή και άλλα στοιχεία, όπως κοχλίες ενεργοποίησης, το τσοκ συστολής-διαστολής μπορεί να είναι πολύ πιο συμμετρικό και ελεύθερο από ατέλειες που μπορεί να μειώσουν την ισορροπία όταν περιστρέφεται. Αν και τα τσοκ συστολής-διαστολής είναι πιο απλά από τα υδραυλικά τσοκ, είναι επίσης και πιο ακριβά. Επιπλέον, χρειάζεται να αποκτηθεί ένα σύστημα θερμότητας, και σε μερικές περιπτώσεις, ένα σύστημα ψύξης επίσης.

Η επιλογή της εργαλειοθήκης επηρεάζει οπωσδήποτε την δυναμική απόδοση της μηχανικής κατεργασίας και συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του άξονα. Συγκρίνοντας την συνάρτηση απόκρισης της συχνότητας (FRF) που μετρείται στο άκρο του εργαλείου διαμέτρου 16mm και με 72mm προεξοχή σε ένα τσοκ καστονίου ισχύος, σε ένα τσοκ καστονίου, σε ένα υδραυλικό τσοκ και σε ένα τσοκ συστολής-διαστολής για τον ίδιο άξονα, το συμπέρασμα είναι πως το υδραυλικό είναι το πιο άκαμπτο, με το κωνικό, κυλινδρικού καστονίου και συστολής-διαστολής να ακολουθούν; δείτε την Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3. 21 – Δυναμική ευκαμψία που μετρίεται στην άκρη του εργαλείου για τέσσερις διαφορετικές εργαλειοθήκες με το ίδιο εργαλείο στον ίδιο άξονα.

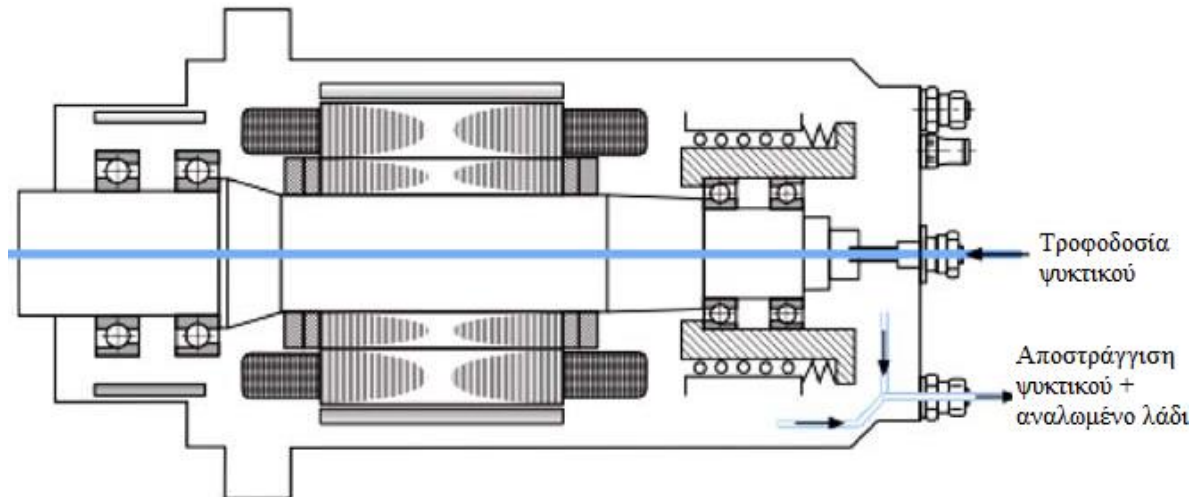
Οι λοβοί σταθερότητας που υπολογίστηκαν για την κατεργασία αλουμινίου, αποκαλύπτουν πως το υδραυλικό τσοκ θεωρητικά φτάνει τις πιο παραγωγικές συνθήκες με έναν άξονα με μέγιστη ταχύτητα 24,000rpm; δείτε [Σχήμα 3.22](#). Ωστόσο, αν ο χρήστης έχει έναν άξονα που μπορεί να φτάσει μόνο στα 20,000rpm, η ισχύς του τσοκ καστονίου είναι η πιο παραγωγική. Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ισορροπία. Οι έλεγχοι που εκτελέστηκαν με αυτές τις εργαλειοθήκες αποκάλυψαν πως η υδραυλική εργαλειοθήκη δεν μπορούσε να εκτελεστεί πάνω από τα 20,000rpm λόγω των προβλημάτων ισορροπίας, έτσι το τσοκ ισχύος επιλέχθηκε ως το πιο παραγωγικό για αυτό το εργαλείο.



Σχήμα 3. 22 – Λοβοί σταθερότητας πλήρους ακτινικής απορρόφησης για τέσσερις διαφορετικές εργαλειοθήκες με το ίδιο εργαλείο στον ίδιο άξονα. Οι κύκλοι δηλώνουν τις καλύτερες συνθήκες κοπής για το υδραυλικό τσοκ και το τσοκ καστονίου ισχύος.

### 3.4.4 Η Ράβδος Έλξης

Ο μηχανισμός της ράβδου έλξης πρέπει να συγκρατεί την εργαλειοθήκη μέσα στον άξονα κατά τη διάρκεια των λειτουργιών μηχανικής κατεργασίας, χωρίς προβλήματα ισορροπίας. Αυτό το σύστημα εργάζεται βασικά με ένα μηχανικό τσοκ και έναν μηχανισμό ελατηρίου. Η δύναμη συγκράτησης που ασκεί η ράβδος έλξης σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, πρέπει να είναι αρκετή ώστε να εξασφαλίσει την ακαμψία της σύζευξης. Από την άλλη πλευρά, η απωθητική δύναμη που χρησιμοποιείται για να εξωθήσει το εργαλείο, πρέπει να μην οδηγήσει σε κάποιο φορτίο πάνω στα έδρανα. Τέλος, τα συστήματα «ψύξης μέσω του άξονα» μπορούν να μεταφέρουν το υγρό κοπής μέσω του άξονα στο εργαλείο; δείτε την Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3. 23 – Ψυκτικό μέσω του άξονα με σφράγιση κενού, από την GMN.

### 3.4.5 Ο Μηχανοκίνητος Άξονας

Ο μηχανοκίνητος άξονας της ατράκτου είναι υπεύθυνος για την μετάδοση της ισχύος που παράγεται μέσα στον κινητήρα προς το εργαλείο, και φιλοξενεί την ράβδο έλξης και το σύστημα εργαλείων, όπως και τον κωδικοποιητή. Τα βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την συμπεριφορά του άξονα είναι το μήκος και η διάμετρος. Τυπικά, η διαδικασία της μηχανικής κατεργασίας διεγείρει τους τρόπους κάμψης του άξονα; επιπλέον, για να αποφευχθούν τα προβλήματα δυναμικού, η πρώτη φυσική συχνότητα του άξονα, η οποία εξαρτάται έντονα από το μήκος και την διάμετρο, πρέπει να είναι πάνω από τη μέγιστη ταχύτητα του 50% της πρώτης φυσικής συχνότητας. Έτσι, όσο πιο κοντός είναι ο άξονας και όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος, σημαίνει μεγάλα έδρανα που περιορίζουν την μέγιστη ταχύτητα εργασίας.

Τελικά, είναι σημαντικό να έχουμε στο μυαλό την θερμική διαστολή του άξονα. Κατά τη διάρκεια της μηχανικής κατεργασίας, η θερμοκρασίας αυξάνεται στο εσωτερικό του άξονα, προκαλώντας θερμική διαστολή. Λόγω του μήκους του (όσο πιο μεγαλύτερος είναι ο άξονας, τόσο πιο μεγάλη είναι η διαστολή) ο άξονας μπορεί να κατέχει μεγάλο μερίδιο της ευθύνης για κάθε ανακρίβεια της μηχανής και του προϊόντος, σαν αποτέλεσμα τις υπερβολικής θερμότητας.

### 3.4.6. Οι Αισθητήρες

Η τεχνολογία των αισθητήρων έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία δέκα χρόνια (δείτε τον Πίνακα 5.1 στο Κεφάλαιο 5). Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται τώρα για να καταγράψουν περισσότερα από απλά τις θέσεις των εργαλείων στο σύστημα σύσφιξης ή την ταχύτητα του άξονα. Σήμερα, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν και να ελέγξουν

την συμπεριφορά του άξονα και να διαγνώσουν πιθανές ανωμαλίες κατά τη διάρκεια λειτουργίας που μπορεί να επηρεάσει την ακεραιότητα του άξονα (ατράκτου).

Για παράδειγμα, οι κωδικοποιητές υψηλής ανάλυσης παρέχουν ανατροφοδότηση για να ελέγχουν την πραγματική ταχύτητα του άξονα, όπως και την γωνιακή θέση, ώστε να χρησιμοποιηθεί η ικανότητα της πλήρους ισχύος του άξονα. Η ανάλυση του κωδικοποιητή καθορίζει την ακρίβεια υπολογισμού της θέσης και της ταχύτητας, ώστε όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση του κωδικοποιητή, τόσο πιο ακριβής είναι η πληροφορία που λαμβάνεται για να εκτελέσει τον έλεγχο της ταχύτητας. Ακριβής περιστροφή επιτυγχάνεται σε λειτουργίες που απαιτούν υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, χωρίς διακύμανση της ταχύτητας. Οι άξονες μπορούν να τοποθετηθούν μεταξύ 0.001 βαθμούς, ώστε μία προσανατολισμένη άτρακτος σταματάει για να αλλάξει εργασία ή να διεξάγει λειτουργίες του άξονα-C, καθώς είναι πιθανή η κοπή των σπειρών. Επίσης, επιτρέπονται η γρήγορη επιτάχυνση και οι χρόνοι επιβράδυνσης. Μία εις βάθος θεώρηση της χρήσης των κωδικοποιητών στις εργαλειομηχανές παρέχεται στην Ενότητα 6.2.3.

Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται συνήθως κοντά στα έδρανα για να ελέγξουν την κατάσταση ισορροπίας, και να μετρήσουν τις ανισορροπίες και τους συντονισμούς που μπορεί να καταστρέψουν τον άξονα. Τα μοτίβα κραδασμών καταχωρούνται και οπτικοποιούνται για την βελτίωση της διαδικασίας και την εκτίμηση ζωής του άξονα. Τα θερμοζεύγη και τα θερμίστορς χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν τις θερμοκρασίες του κινητήρα, των μπροστά και πίσω εδράνων, του κιβωτίου, κλπ. Οι αισθητήρες μετατόπισης των αισθητήρων μετρούν τις μετατοπίσεις του άξονα της ατράκτου. Οι αισθητήρες για την μέτρηση των δυνάμεων κοπής και ροπής, τοποθετούνται για την παρακολούθηση της διαδικασίας.

Η παρακολούθηση και η διάγνωση της κατάστασης της ατράκτου και της λειτουργίας, βοηθά στην αύξηση της διάρκειας ζωής. Η τάση φαίνεται να δείχνει ένα μέλλον στο οποίο οι εργαλειομηχανές θα μπορούν να διαγνώσουν την κατάσταση του άξονα κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής διαδικασίας, να διορθώσουν προβλήματα ισορροπίας, και να πάρουν αποφάσεις που θα μειώσουν τις ατέλειες και τα λάθη, για να εξασφαλίσουν την ποιότητα του επεξεργαζόμενου κομματιού και την καλή σειρά εργασίας της μηχανής. Για παράδειγμα, υπάρχουν διαθέσιμες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν την πληροφορία των αισθητήρων θερμοκρασίας, για να αντισταθμίσουν την θερμική διαστολή του άξονα. Τα AMB δεν χρησιμοποιούνται μόνο ως έδρανα, αλλά επίσης μπορούν να δουλέψουν ως αισθητήρες για να μετρήσουν τους κραδασμούς και τις δυνάμεις κοπής, και ως ενεργοποιητές για σκοπούς ενεργής απόσβεσης.

### 3.4.7 Το κιβώτιο (περίβλημα)

Το κιβώτιο υποστηρίζει και φιλοξενεί τα έδρανα, τον άξονα, και στην περίπτωση των ηλεκτροαξόνων, και τον κινητήρα επίσης. Έχει να εφοδιάσει τα παρακάτω στοιχεία:

**Ένα κύκλωμα για την ψύξη του κινητήρα:** Στους ηλεκτροάξονες, η ζέστη που παράγεται από τον κινητήρα, όπως εξηγείται στην Ενότητα 3.5.4, επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια του άξονα, έτσι ένα κύκλωμα ψύξης γύρω του γίνεται απαραίτητο.

**Κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα:** Συνήθως, ο πεπιεσμένος αέρας εισάγεται μέσα στον άξονα, έτσι ώστε να τον σφραγίσει από τη ρύπανση.

**Κύκλωμα λίπανσης για τα έδρανα:** Χρησιμοποιείται όταν τα έδρανα λιπαίνονται χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα λαδιού-αέρα.

**Κύκλωμα υγρών κοπής:** Μερικές άτρακτοι παρέχουν υγρά κοπής, όχι μόνο διά μέσω του άξονα της ατράκτου, αλλά επίσης διά μέσω του κιβωτίου, το οποίο έχει πολλά ακροφύσια στη μύτη της άκρης του εργαλείου.

### 3.5 Ιδιότητες και Απόδοση της Ατράκτου

Για ένα κατασκευαστή εργαλειομηχανών και για τους τελικούς χρήστες, οι άτρακτοι των εργαλειομηχανών επιλέγονται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους. Εδώ, θα εξηγήσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά των αξόνων και τον τρόπο που τα μηχανικά και θερμικά φορτία επηρεάζουν την απόδοσή τους.

#### 3.5.1 Ισχύς και Ροπή Ατράκτου Εναντία Καμπυλών Ταχύτητας Ατράκτου

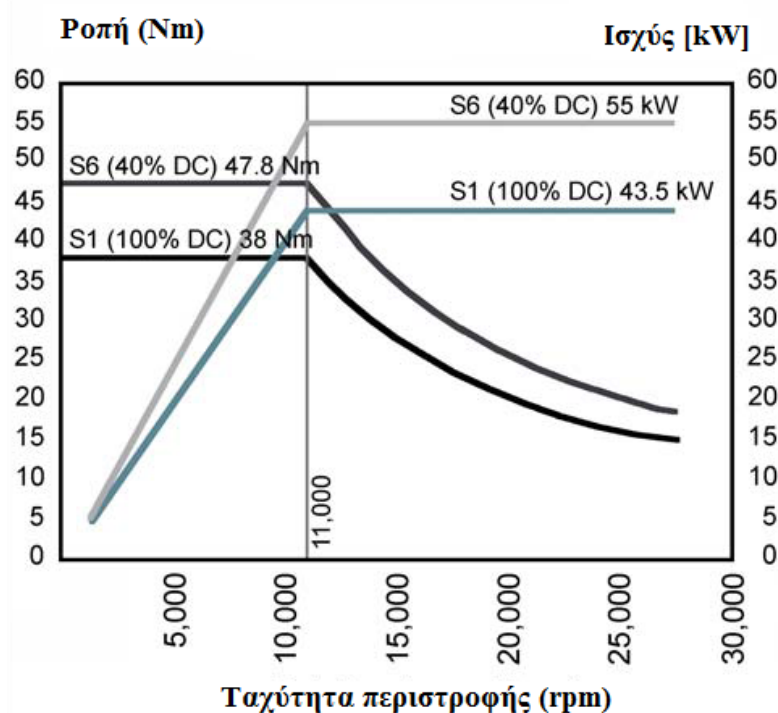
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά των ατράκτων, όσον αφορά στην ισχύ και στη ροπή, ως προς την ταχύτητα της ατράκτου. Συνήθως, η σχέση αυτή εκφράζεται χρησιμοποιώντας τις καμπύλες για τις ατράκτους των εργαλειομηχανών. Αυτή η πληροφορία παρέχεται από τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών, στους καταλόγους τους, καθώς καθορίζουν την επίδοση και την αποδοτικότητα της ατράκτου.

Συνήθως μπορούν να βρεθούν δύο καμπύλες ισχύος-ροπής της ατράκτου: η σταθερή καμπύλη ροπής και η καμπύλη «τύπου-γόνατο». Στις ατράκτους σταθερής ροπής, η ιπποδύναμη αυξάνει γραμμικά κατά μήκος ολόκληρου του φάσματος ταχύτητας. Ωστόσο, παρά εκείνων που παρέχουν ροπή σε υψηλές ταχύτητες, η μέγιστη διαθέσιμη ροπή είναι χαμηλότερη από εκείνες που παρέχονται από τις ατράκτους τύπου-γόνατο. Σε αυτές τις ατράκτους, η ροπή παραμένει σταθερή μέχρι ένα σημείο, το γόνατο, όπου αρχίζει να μειώνεται. Εν τω μεταξύ, η ισχύς αυξάνει γραμμικά μέχρι το γόνατο και μετά παραμένει σταθερή. Αυτές οι άτρακτοι, προσαρμόζονται καλά στη χρήση μεγάλης και μικρής διαμέτρου εργαλείων. Μικρής διαμέτρου εργαλεία, απαιτούν ατράκτους υψηλής ταχύτητας, ώστε να προσφέρουν αποδεκτά ποσοστά τροφοδοσίας, δεδομένου ότι, λόγω του σχήματος και του μεγέθους τους, η τροφοδοσία είναι απαραίτητα μικρή. Αυτά τα εργαλεία δεν χρειάζονται υψηλή ροπή για να λειτουργήσουν και σε κάθε περίπτωση, συγκρινόμενα με εργαλεία μεγαλύτερης διαμέτρου, δεν θα ήταν εύκολο να υποστηρίξουν υψηλή ροπή εξαιτίας του μεγέθους τους. Από την άλλη μεριά, τα εργαλεία μεγάλης διαμέτρου απαιτούν υψηλότερη ροπή, αλλά δεν χρειάζονται τόσο μεγάλες ταχύτητες ατράκτου, όπως τα εργαλεία μικρής διαμέτρου. Το σχήμα 3.24 δείχνει τις καμπύλες ισχύος (kW) και ροπής (Nm) με σεβασμό προς την ταχύτητα περιστροφής (rpm) για την άτρακτο υψηλής ταχύτητας DeckelMaHo“105 linear” μηχανή φραιζαρίσματος.

Παράγοντες όπως οι χρόνοι λειτουργίας και το φορτίο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ώστε να η ισχύς που η μηχανή μπορεί να τροφοδοτήσει. Η τάξη υπηρεσίας (S1 έως S9) καθορίζεται από το σύνολο των συνθηκών λειτουργίας, συμπεριλαμβάνοντας τις περιόδους ιδανικής εκτέλεσης και ξεκούρασης, στις οποίες υπόκειται η μηχανή. Οι τύποι της υπηρεσίας καθορίζονται από τα πρότυπα IEC34-1 και VDE0530. Οι πιο κοινοί είναι οι S1 και S6:

**S1, Συνεχής υπηρεσία:** συνεχής λειτουργία της μηχανής, π.χ. λειτουργία σε σταθερό φορτίο για αρκετό χρόνο ώστε να φτάσει σε θερμική ισορροπία.

**S6, Συνεχής υπηρεσία με διαλείπων φορτίο:** αλληλουχία παρόμοιων κύκλων λειτουργίας, αποτελούμενων από μία περίοδο με ένα σταθερό φορτίο και μία περίοδο ιδανικής εκτέλεσης. Δεν υπάρχουν περιόδοι ξεκούρασης. Δηλώνεται από την σχετική διάρκεια της περιόδου φόρτισης, ως ποσοστό ολόκληρου του κύκλου λειτουργίας; για παράδειγμα, S6 30% είναι 45 λεπτά. Ο κύκλος λειτουργίας είναι διάρκειας 10 λεπτών, αν δεν δίνεται καμία τιμή (συνεπώς, το S6 30% δηλώνει μία περίοδο φόρτισης 3 λεπτών, και περίοδο καθόλου φόρτισης των 7 λεπτών).



Σχήμα 3. 24 – Καμπύλες ισχύος και ροπής ενός DeckelMaho “105 Vlinear”.

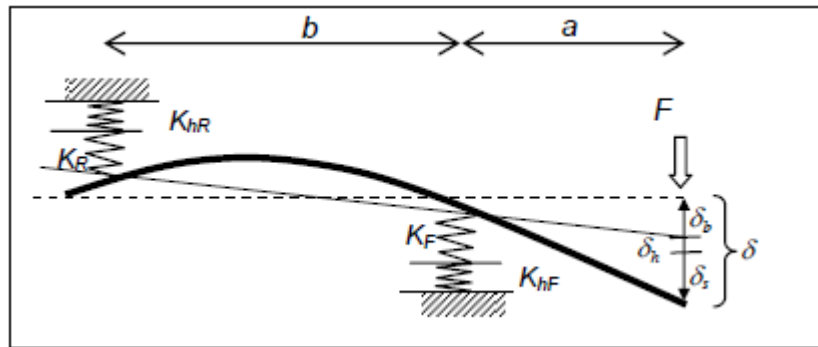
Όταν αξιολογείτε τις απαιτήσεις ισχύος και ροπής, είναι σημαντικό να λάβετε υπόψη α) το φάσμα των ταχυτήτων για τις οποίες προορίζεται μία εργαλειομηχανή, β) τα εργαλεία κοπής που είναι να χρησιμοποιηθούν, γ) οι απαιτήσεις σχήματος και η ακρίβειας και δ) το υλικό των κομματιών που είναι να κατασκευαστούν.

### 3.5.2 Η Ακαμψία

Η στατική συμπεριφορά της ατράκτου σχετίζεται με την απόκλιση της άκρης του εργαλείου κάτω από την δράση των δυνάμεων κοπής. Στην πραγματικότητα, η άτρακτος είναι μία υπερστατική δέσμη που στηρίζεται πάνω στα μπροστά έδρανα (συνήθως δύο γωνιακά σφαιρικά έδρανα σε διάταξη DF), και στο πίσω έδρανο (συνήθως ένα γωνιακό σφαιρικό έδρανο ή ένα κυλινδρικό έδρανο). Τα έδρανα εισάγονται στο κιβώτιο (περίβλημα), ώστε η ακαμψία της ατράκτου να σχετίζεται με το κιβώτιο, το οποίο θα προστεθεί σε εκείνο της ίδιας της κουκουβάγιας.

Η συνολική απόκλιση είναι το άθροισμα τριών επιδράσεων, α) εκείνων που πηγάζουν από την απόκλιση της δέσμης, β) εκείνες που πηγάζουν από την ευελιξία των εδράνων, και τέλος γ) εκείνες που πηγάζουν από την ευελιξία της προσαρμογής του εδράνου μέσα στο κιβώτιο. Υποθέτοντας την απλοποίηση του σταθερού τμήματος για την άτρακτο και ένα κοντό εργαλείο, η μετατόπιση της άκρης του εργαλείου λόγω της ευκαμψίας της ατράκτου είναι (δείτε επίσης την [Σχήμα 3.25](#)):

$$\delta_s = \frac{Fba^2}{3IE} \left( 1 + \frac{a}{b} \right) \quad (3.6)$$



Σχήμα 3. 25 – Τα τρία στοιχεία ευκαμψίας, μετατοπίσεις στην άκρη του εργαλείου.

Από την άλλη πλευρά, η μετατόπιση λόγω της ευκαμψίας των εδράνων είναι:

$$\delta_b = \frac{F}{b^2} \left( \frac{(a+b)^2}{k_F} + \frac{a^2}{k_R} \right) \quad (3.7)$$

Όπου  $k_F$  είναι η ακτινική ακαμψία του μπροστινού εδράνου και  $k_R$  είναι η ακτινική ακαμψία του πίσω εδράνου, τα οποία καθορίζονται επίσης από την προφόρτιση των εδράνων. Στην θεώρηση αυτή της εξίσωσης, η ακαμψία του μπροστά εδράνου είναι πιο σημαντική από εκείνη το πίσω. Επιπλέον, η δύναμη αντίδρασης σε αυτή την στήριξη είναι υψηλότερη από ότι στο πίσω έδρανο. Επομένως, επιλέγοντας αυτό το έδρανο και την προφόρτιση, είναι το σημείο κλειδί στο σχέδιο όλων των τύπων των ατράκτων.

Τέλος, η ακαμψία του κιβωτίου είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ένα απλό μοντέλο, αντίθετα με ένα FEM μπορεί να επιτευχθεί μία καλή τιμή. Η μετατόπιση στην άκρη του εργαλείου  $\delta_{st}$  λόγω του συστήματος της ατράκτου επιτυγχάνεται ευκαμψία, προσθέτοντας την προηγούμενα υπολογισμένη εξίσωση:

$$\delta_{st} = \delta_s + \delta_b + \delta_h \quad (3.8)$$

Όλα είναι αντιστρόφως ανάλογα με την ενεργό δύναμη  $F$ , επομένως η τελική ακαμψία  $k_{st}$  του συστήματος ατράκτου που μετρείται στο άκρο του εργαλείου είναι:

$$\frac{1}{k_{st}} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_h} = \frac{\delta_s}{F} + \frac{\delta_b}{F} + \frac{\delta_h}{F} \quad (3.9)$$

Άλλα στοιχεία που προσθέτουν ευκαμψία είναι:

Στην επιπεδοποίηση, η εργαλειοθήκη και το εργαλείο, και οι διεπιφάνειες της εργαλειοθήκης που τοποθετούνται μέσα στην άτρακτο και το εργαλείο που τοποθετείται μέσα στην εργαλειοθήκη. Ένα χρήσιμο μοντέλο για την μελέτη της μετατόπισης του εργαλείου, είναι εκείνο στο οποίο το εργαλείο θεωρείται ως μία κυλινδρική δέσμη στήριξης. Η απόκλιση της άκρης του εργαλείου μετά συμμορφώνεται με την εξίσωση:

$$\delta_n = \frac{64 F}{3\pi E} \frac{L_H^3}{D^4} \quad (3.10)$$

Συνεπώς, μπορεί να φανεί στην εξίσωση 3.10, ότι η απόκλιση του εργαλείου στο στατικό μοντέλο είναι μία συνάρτηση των επόμενων παραμέτρων,  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας για το υλικό του εργαλείου,  $L_H^3/D^4$  είναι ο παράγοντας λεπτότητας του εργαλείου.  $D$ , είναι η ισοδύναμη διάμετρος του εργαλείου, (το εργαλείο δεν είναι μία κυλινδρική δέσμη), και  $L_H$ , είναι το μήκος της προεξοχής.  $F$ , είναι η δύναμη κοπής κάθετα στον άξονα του εργαλείου.

Στην περιστροφή ή στην κυλινδρική λείανση, η ευκαμψία του κομματιού προς επεξεργασία. Πραγματικά, το επεξεργαζόμενο κομμάτι που συσφίγγεται μέσα στο τσοκ είναι μία επέκταση

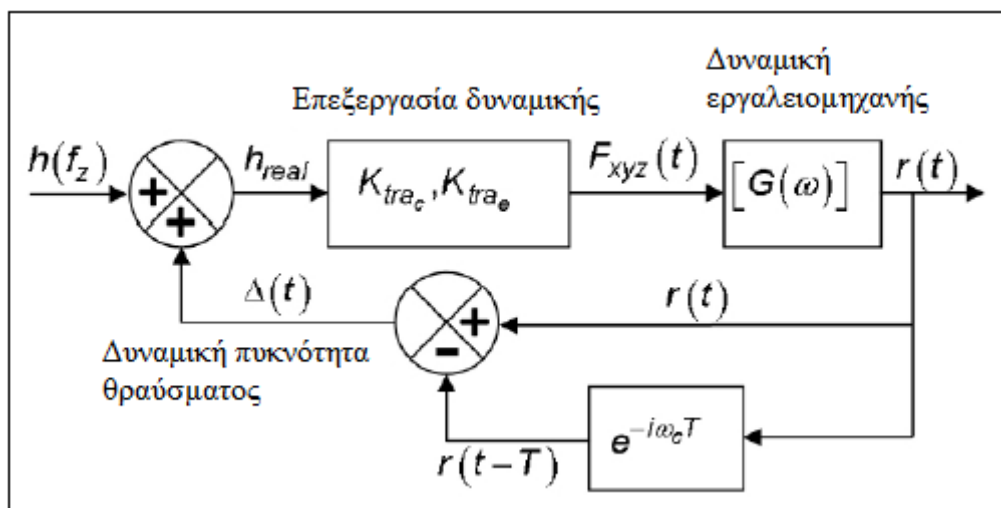
της ατράκτου με μία εύκαμπτη εσωτερική σύνδεση. Αν το κομμάτι είναι κοντό με μεγάλη διάμετρο, το τσοκ συνήθως το συσφίγγει ικανοποιητικά και το εξάρτημα συγκράτησης της ακίδας του τόννου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την ακαμψία. Αν το κομμάτι είναι μακρύ ή πολύ λεπτό, προτείνεται η χρήση των «σταθερών υπολοίπων», όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 1, στο σχήμα 1.30 στην περίπτωση των τόννων βαρέως τύπου.

### 3.5.3 Δυναμική Συμπεριφορά και Κραδασμοί

Οι κραδασμοί εμφανίζονται στην επιπεδοποίηση λόγω της έλλειψης δυναμικής ακαμψίας μερικών στοιχείων του συστήματος εργαλειομηχανή-εργαλείο-επεξεργαζόμενο κομμάτι. Αυτοί μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές ομάδες: επιβεβλημένες και αυτό-προκαλούμενοι κραδασμοί. Ο πρώτος τύπος κραδασμών, υποθέτοντας πως το εργαλείο και το υποσύστημα της ατράκτου είναι καλά ισορροπημένα και στηριγμένα σε μία μηχανή φραιζαρίσματος, πάνω σε ένα απομονωμένο θεμέλιο, είναι λόγω του μεταβλητού πάχους των θραυσμάτων και της διακοπτόμενης φύσης της διαδικασίας. Αυτό σημαίνει πως είναι πάντοτε παρόντες. Επομένως, για να αποφευχθεί η ζημιά στο εργαλείο και/ή στην άτρακτο, το επίπεδο κραδασμών πρέπει να διατηρείται κάτω από μία τιμή κατωφλίου. Μία άλλη πηγή επιβεβλημένου κραδασμού είναι η χρήση ανεπαρκών ή μη ισορροπημένων εργαλείων. Όπως αναφέρθηκε πριν, οι άτρακτοι υψηλής συχνότητας έχουν την μέγιστη τους ταχύτητα περιορισμένη κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα, όμως η χρήση ανεπαρκών εργαλείων μπορεί να μετακινήσει την κρίσιμη ταχύτητα κοντά στο φάσμα της ταχύτητας λειτουργίας με καταστροφικές συνέπειες.

Όσον αφορά στον δεύτερο τύπο, ο πιο κοινός αυτό-προκαλούμενος κραδασμός στην επιπεδοποίηση είναι ο «αναγεννητικών ιχνών κραδασμού». τεράστιες προσπάθειες έχουν γίνει για να κατανοηθεί, να προβλεφθεί και να αποφευχθεί ο κραδασμός αυτού του τύπου, από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και ειδικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι ετών. Αφού η επιπεδοποίηση είναι μία εγγενώς διακοπτόμενη λειτουργία κοπής, οι κραδασμοί εμφανίζονται πάντα, και επομένως, η αιχμή αφήνει κύματα στην επιφάνεια του μετάλλου. Η διαφορά της φάσης μεταξύ της τρέχουσας δόνησης αιχμής και των κυματισμών που παράχθηκαν στο προηγούμενο πέρασμα, έχουν ως αποτέλεσμα μία μεταβλητή πυκνότητα θραυσμάτων και μία υψηλά μεταβλητή ισχύ κοπής; αυτό διεγείρει τους δομικούς τύπους της μηχανής, το σύστημα άτρακτος-εργαλειοθήκη-εργαλείο και το επεξεργαζόμενο κομμάτι. Αν ένα στοιχείο αυτού του συστήματος έχει έλλειψη δυναμικής ακαμψίας ή απόσβεσης, οι μετατοπίσεις και οι δυνάμεις γίνονται υψηλότερες σε κάθε πέρασμα δοντιού και η διαδικασία γίνεται ασταθής. Η σχέση μεταξύ των δυνάμεων και των μετατοπίσεων ήταν καλά συνοψισμένα από τον Merrit, προτείνοντας έναν αναγεννητικό βρόχο παρόμοιο με την Σχήμα 3.26.

Τα ίχνη των κραδασμών μπορούν να αποφευχθούν εντελώς υπολογίζοντας τα διαγράμματα «λοβών σταθερότητας». Αυτά τα διαγράμματα δηλώνουν το οριακό ελεύθερο από ίχνη αξονικό βάθος κοπής σε κάθε ταχύτητα ατράκτου για ένα δεδομένο ακτινικό βάθος κοπής. Επομένως, απεικονίζουν την οριογραμμή μεταξύ των σταθερών και των ασταθών περιπτώσεων, οι οποίες συντίθενται από πολλές καμπύλες σχήματος-λοβού.

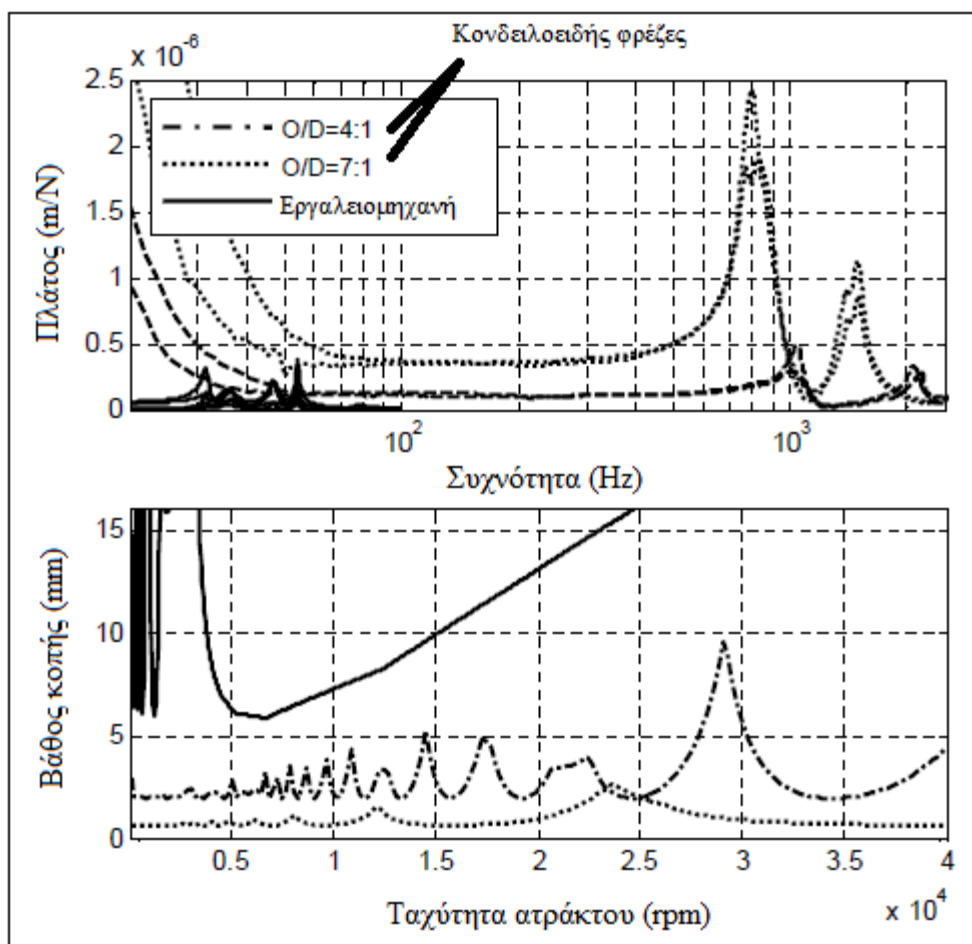


Σχήμα 3. 26 – Σχηματικό διάγραμμα του βρόχου σημαδιών κραδασμού.

Η παραδοσιακή προσέγγιση σε ολόκληρο τον 20<sup>ο</sup> αιώνα ήταν πως τα σημάδια κραδασμών στην επιπεδοποίηση ήταν ένα πρόβλημα ξεχονδρίσματος ατσαλιού, επηρεάζοντας τους δομικούς τύπους χαμηλής συχνότητας της εργαλειομηχανής, από περίπου 15 έως 200Hz. Οι ταχύτητες κοπής που πηγάζουν από την μηχανή και την τεχνολογία του εργαλείου που είναι διαθέσιμη σε αυτά τα χρόνια, υποδήλωνε πως οι τύποι υψηλής συχνότητας δεν ήταν διεγερμένοι.

Ωστόσο, στα τέλη αυτού του αιώνα, η μηχανική κατεργασία υψηλής ταχύτητας σε ταχύτητες περιστροφής που κυμαίνονται από 15,000 έως 40,000rpm έγιναν δυνατές, και ως συνέπεια, άρχισαν να εμφανίζονται σημάδια κραδασμών σε υψηλότερες συχνότητες, μεταξύ 500 και 2,500Hz (Σχήμα 3.27). Στην μηχανική κατεργασία υψηλής συχνότητας, τα τοπικά μοντέλα του υποσυστήματος άτρακτος-εργαλειοθήκη-εργαλείο, διεγείρονται επειδή η συχνότητα που περνάει από το δόντι, είναι πολύ πάνω από τις τυπικές συχνότητες της δομής της μηχανής. Οι συνέπειες των σημαδιών υψηλής συχνότητας είναι άσχημη τραχύτητα της επιφάνειας και μείωση της ζωής του εργαλείου, αλλά πιο μεγάλο πρόβλημα δημιουργεί η ζημιά των εδράνων της ατράκτου. Ένα σπασμένο εργαλείο μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα, και κάποιο σημάδι στο κομμάτι επεξεργασίας μπορεί να διορθωθεί, αλλά το κόστος επιδιόρθωσης μίας σπασμένης ατράκτου είναι υψηλό και σημαίνει καθυστερήσεις στην παραγωγή. Συνεπώς, μερικές εταιρίες αγοράζουν μία επιπρόσθετη άτρακτο για αντικατάσταση, μέχρι να επισκευαστεί εκείνη που έχει χαλάσει.

Για να αποφευχθούν τα σημάδια κραδασμών υψηλής συχνότητας, το διάγραμμα σταθερότητας λοβού (Σχήμα 3.27) προτείνει την μηχανική κατεργασία σε ακόμη υψηλότερες ταχύτητες, στις οποίες οι περιοχές σταθερότητας μεταξύ των λοβών είναι πιο πλατιές. Έτσι, όχι μόνο επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγωγικότητα, αλλά επίσης ελαχιστοποιούνται τα σημάδια κραδασμών. Αυτό σημαίνει πως οι σχεδιαστές της ατράκτου πρέπει όχι μόνο να εξασφαλίσουν μία στατική αλλά και επίσης δυναμική ακαμψία σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Ωστόσο, η ακαμψία της ατράκτου είναι περίπλοκο να εκτιμηθεί στο στάδιο σχεδιασμού, αν και οι πρόσφατες βελτιώσεις στην μοντελοποίηση το έχουν καταστήσει δυνατό.

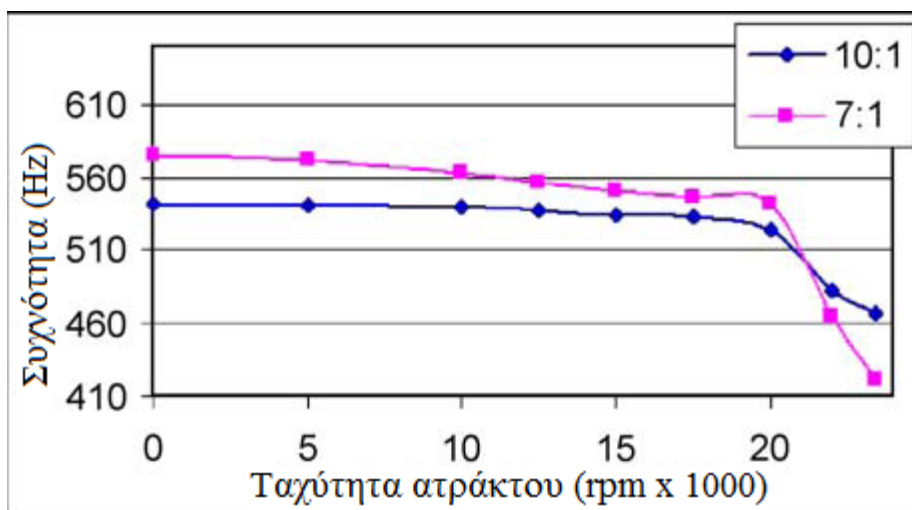


Σχήμα 3. 27 – Λειτουργίες απόκρισης της συχνότητας και αντίστοιχοι λοβοί σταθερότητας μίας δομής εργαλειομηχανής και κονδυλοειδείς φρέζες με μία αναλογία προεξοχής/διαμέτρου (O/D) 4:1 και 7:1.

Ο υπολογισμός της δυναμικής ακαμψίας επιτρέπει στους λοβούς σταθερότητας να υπολογιστούν κάτω από συνθήκες εργασίας πριν από την κατασκευή της ατράκτου. Συνεπώς, τα μοντέλα ατράκτου κάνουν δυνατή την παρατήρηση της επίδρασης των αλλαγών στην απόδοση της ατράκτου. Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται μερικές βασικές έννοιες όσον αφορά στην εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων της ατράκτου, ενώ ακολουθούνται από τις τρέχουσες μεθόδους υπολογισμού των διαγραμμάτων λοβού.

### 3.5.3.1 Η Δυναμική της Ατράκτου

Η ενότητα ασχολείται με την αναγνώριση της δυναμικής των ατράκτων με σφαιρικά έδρανα γωνιακής επαφής. Η δυναμική ακαμψία στην άκρη του εργαλείου, όπου βρίσκονται οι δυνάμεις κοπής, είναι το άθροισμα ακαμψίας όλων των στοιχείων του συστήματος, π.χ. του εργαλείου, της εργαλειοθήκης, του άξονα, των εδράνων, του κιβωτίου, και των μηχανικών σιαγόνων σύσφιξης μεταξύ τους; η μηχανή δεν συμπεριλαμβάνεται εξαιτίας των χαμηλότερων φυσικών συχνοτήτων της (δείτε προηγούμενη ενότητα). Από την άλλη πλευρά, η περιστροφή της ατράκτου εισάγει δυνάμεις που αλλάζουν την ακαμψία και στα έδρανα και στον άξονα, έτσι αλλάζοντας την «δυναμική απόκριση 0rpm» στην άκρη του εργαλείου.



Σχήμα 3. 28 – Πρώτη λειτουργική μεταβολή της συχνότητας πάνω σε δύο εργαλεία με διαφορετική αναλογία διαμέτρου-προεξοχής.

Η μεταβολή της δυναμικής της ατράκτου είναι η υπέρθεση των μηχανικών και θερμικών φαινομένων. Όταν η άτρακτος δεν περιστρέφεται, η γωνία επαφής των σφαιρών με τις εσωτερικές και εξωτερικές διαδρομές, προσδιορίζονται από την γεωμετρία και την κινηματική του εδράνου να αποφύγει τις σφαίρες που περιστρέφονται στις διαδρομές, και να εξασφαλίσουν την αξονική και ακτινική προφόρτιση των σφαιρών με τις διαδρομές. Όταν η άτρακτος αρχίσει να περιστρέφεται, δύο επιπρόσθετα φορτία κάθετα στην ταχύτητα περιστροφής ενεργούν πάνω στις σφαίρες, την φυγόκεντρο δύναμη και μία παρακινήμενη γυροσκοπική στιγμή; και τα δύο επηρεάζουν την αρχική προφόρτιση. Η φυγόκεντρος δύναμη μειώνει την αρχική προφόρτιση και αλλάζει ελαφρώς την κινηματική των εδράνων, μεταβάλλοντας τις γωνίες επαφής, και συνεπώς μειώνοντας την ακαμψία του εδράνου και της ατράκτου.

Από την άλλη πλευρά, η δύναμη επαφής στην διεπιφάνεια σφαίρας-διαδρόμου ποικίλει λόγω των δυνάμεων κοπής και της θερμικής κλίσης μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών διαδρόμων του εδράνου σε υψηλές ταχύτητες. Για παράδειγμα, το σχήμα 3.28 δείχνει την εξέλιξη της μετρήσιμης συχνότητας της πρώτης λειτουργίας (τύπου) για ένα εργαλείο, με μία αναλογία προεξοχής-διαμέτρου 10:1 και 7:1, που συσφίγγεται σε μία εργαλειοθήκη HSK63τσοκκαστονίου, που τοποθετείται πάνω στην άτρακτο Step-techHucs 230-S-40-9/24-4FMMS.

Συγχρόνως, μία γυροσκοπική στιγμή ενεργεί πάνω στον άξονα λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής, η οποία χωρίζει τις λειτουργικές συχνότητες σε δύο, αλλάζοντας επομένως την απόκριση συχνότητας του εργαλείου.

Η πειραματική μέτρηση της πραγματικής FRF στην άκρη του εργαλείου, όταν η άτρακτος εκτελείται σε υψηλές ταχύτητες, γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκη. Για να αποφευχθεί, μία προσέγγιση είναι η μοντελοποίηση της δυναμικής ολόκληρου του συστήματος ατράκτου-εργαλειοθήκης-εργαλείου. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα όπως το ISBAP από την Purdue University και διαθέσιμες εμπορικές λύσεις όπως η Promodule της CutPro ή η SPA της Metalmax.

Οι υποδομές των τεχνικών σύζευξης επιτρέπουν την δυναμική της ατράκτου και του εργαλείου να μελετηθεί ξεχωριστά, και στη συνέχεια να συνδυαστούν ώστε να αποκτηθεί η γενική απόκριση του συστήματος. Συνεπώς, αφού η δυναμική της ατράκτου έχει μελετηθεί θεωρητικά και πειραματικά, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η απόκριση στην άκρη του εργαλείου για διαφορετικά εργαλεία. Δεδομένης της σπουδαιότητας και της διαμέτρου του εργαλείου, και της προεξοχής πάνω στην δυναμική συμπεριφορά, αυτές οι τεχνικές είναι πολύ

ενδιαφέρουσες για τους χρήστες της εργαλειομηχανής. Αν οι κατασκευαστές ατράκτων και μηχανών ενσωματώσουν τις δυναμικές καθενός από τα προϊόντα τους σε μία χρησιμότητα λογισμικού, ο τελικός χρήστης μπορεί να εισάγει την συγκεκριμένη γεωμετρία των εργαλείων του, για να εξασφαλίσει την απόκριση συχνότητας. Αυτή η FRF είναι μία είσοδος για τον υπολογισμό των λοβών σταθερότητας, που οδηγεί στην επιλογή υψηλά παραγωγικών καταστάσεων.

Διαφορετικά, αν δεν παρέχεται κάποιο μοντέλο ή αν δεν είναι αρκετά ακριβές, η RFR μπορεί να αποκτηθεί με μία πειραματική προσέγγιση βασισμένη στην μέτρηση της διέγερσης και της απόκρισης. Στα 0rpm, γίνεται εύκολα με τον έλεγχο κρουνού με ένα κρουσίμετρο και ένα επιταχυνσιόμετρο. Ωστόσο, σε υψηλότερες ταχύτητες, το τεστ αυτό μπορεί να είναι επικίνδυνο ή λιγότερο ακριβές; επομένως, ερευνώνται εναλλακτικές διαδικασίες όπως η χρήση ενεργών μαγνητικών εδράνων και για την μέτρηση της διέγερσης χωρίς επαφή, και για την μέτρηση της απόκρισης.

### 3.5.3.2 Η Εκτίμηση των Λοβών Σταθερότητας

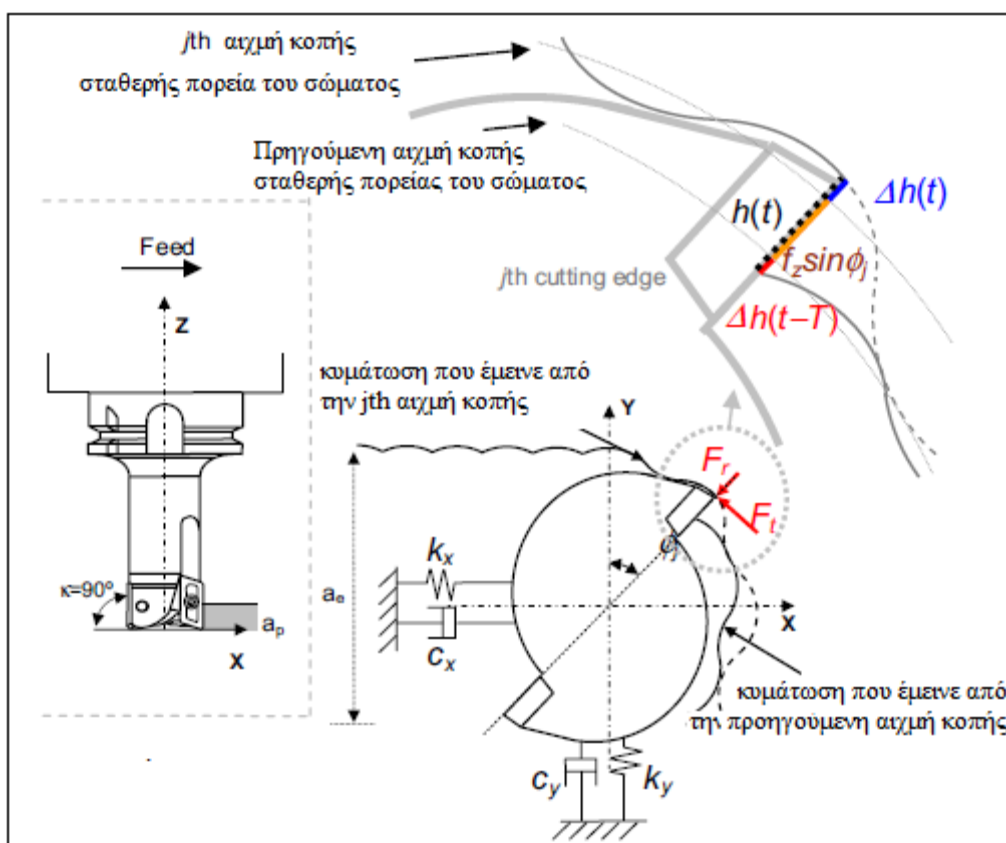
Για την αξιολόγηση μίας ατράκτου σε συνθήκες εργασίας, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα μοντέλο (πρότυπο) της διαδικασίας, όπου σχετίζονται οι παράμετροι κοπής, οι ιδιότητες του υλικού του επεξεργαζόμενου κομματιού και η γεωμετρία του εργαλείου.

Το πραγματικό μοντέλο φραιζαρίσματος είναι η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, που ενσωματώνει την εξίσωση της κίνησης. Αυτό το μοντέλο αναπαράγει την εξέλιξη στον χρόνο των δυνάμεων, των μετατοπίσεων και της πυκνότητας των θραυσμάτων, κάνοντας δυνατό τον καθορισμό του αν η μηχανική κατεργασία είναι σταθερή ή ασταθής, και στην σταθερή περίπτωση, αν το πλάτος των επιβεβλημένων κραδασμών είναι αποδεκτό. Το βασικό μειονέκτημα της μοντελοποίησης στο πεδίο του χρόνου είναι ο χρόνος υπολογισμού των λοβών σταθερότητας.

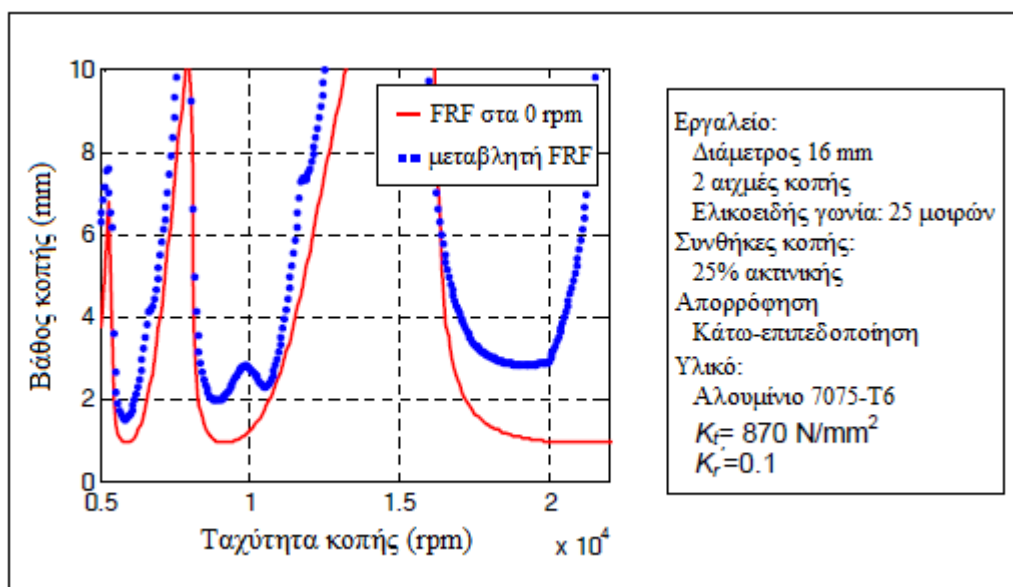
Η εναλλακτική λύση είναι να υπολογιστούν οι λοβοί σταθερότητας απευθείας στο πεδίο του χρόνου, ή να επιλυθεί η διαφορική εξίσωση περιοδικής καθυστέρησης. Μία σχηματική περιγραφή αυτών των μοντέλων υπογραμμίζεται στο σχήμα 3.29 και στον Πίνακα 3.2. Τα μοντέλα ακολουθούν τα παρακάτω βήματα: a) πρέπει να διατυπωθεί η σχέση μεταξύ του πάχους των θραυσμάτων και του κραδασμού του συστήματος, b) προτείνεται ένα μοντέλο δυνάμεων κοπής, c) εισάγεται η δυναμική του συστήματος, και τέλος d) λύνεται το πρόβλημα ιδιοτιμής που καθορίζει την σταθερότητα της διαδικασίας.

Για σκοπούς επιβεβαίωσης της συμπεριφοράς της ατράκτου, υπό τον όρο της δύναμης κοπής, αρκετά ακριβές είναι ένα απλό ημί-μηχανιστικό μοντέλο δύναμης, με μία γραμμική σχέση μεταξύ της δύναμης και του πάχους του θραύσματος. Τα εργαλεία κοπής για υψηλής ταχύτητας ξεχόνδρισμα κραμάτων αλουμινίου, έχουν μία τυπική γωνία ελίκωσης μικρότερη από 30° έτσι, στα συνηθισμένα βάθη κοπής, η επίδραση αυτής της γωνίας στο σχήμα των λοβών είναι ελάχιστη και μπορεί να παραβλεφθεί. Αν ο σκοπός είναι να υπολογιστούν οι λοβοί σταθερότητας για εργαλεία με περίπλοκες γεωμετρίες ή ελικοειδείς κονδυλοειδείς φρέζες, χρειάζεται ένα πιο σύνθετο μοντέλο.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να τροποποιηθούν οι αλγόριθμοι, για να συμπεριληφθεί η ανεξαρτησία της δυναμικής του συστήματος στην ταχύτητα της ατράκτου. Στο σχήμα 3.29 υπάρχει μία σύγκριση των λοβών σταθερότητας θεωρώντας την FRF στα 0rpm, και την ανεξάρτητης ταχύτητας FRF για το εργαλείο με μία αναλογία O-D του 7:1 στο σχήμα 3.30.



Σχήμα 3. 29 – Σχηματικό διάγραμμα ενός 2D μοντέλου φραιζαρίσματος.



Σχήμα 3. 30 – Οι λοβοί σταθερότητας που αποκτώνται με την FRF μετριοούνται στα 0 rpm και με την επίδραση της ταχύτητας της ατράκτου πάνω στην FRF.

**Πίνακας 3.2** – Θεμελιώδεις μέθοδοι για την άμεση απόκτηση του διαγράμματος λοβού σταθερότητας

Προσέγγιση				
Ανάλυση του βρόχου ιχνών		Ανάλυση της διαφορικής εξίσωσης περιοδικής καθυστέρησης		
Παραδείγματα				
Μονής συχνότητας [1]	Πολλαπλών συχνοτήτων [7]	ημί διακριτοποίηση [9]	Ψεύδο φασματικό Chebyshev	Στοιχείο πεπερασμένου χρόνου [5]
a) Μοντέλο πάχους θραύσματος				
$h_j(\phi_j) = (\Delta x \cdot \sin \phi_j + \Delta y \cdot \cos \phi_j)$ ; $\Delta x = x(t) - x(t - T)$ ; $\Delta y = y(t) - y(t - T)$				
b) Μοντέλο δυνάμεων κοπής				
$\begin{Bmatrix} F_t(\phi_j) \\ F_r(\phi_j) \end{Bmatrix} = K_t \cdot a_p \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ K_r \end{Bmatrix} \cdot h_j(\phi_j)$ $\begin{Bmatrix} F_x(\phi_j) \\ F_y(\phi_j) \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^z g(\phi_j) \begin{bmatrix} -\cos \phi_j & -\sin \phi_j \\ \sin \phi_j & -\cos \phi_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_t(\phi_j) \\ F_r(\phi_j) \end{Bmatrix}$ $\begin{Bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{Bmatrix} = a_p \cdot K_t \cdot [A(t)] \cdot \begin{Bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta y(t) \end{Bmatrix}$				
c) Δυναμική συστήματος				
$\begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} = (1 - e^{-i\omega_c T}) [G(\omega_c, \Omega)] \cdot \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix}$		$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}$ $[M(\Omega)]; [C(\Omega)]; [K(\Omega)]$		
Λειτουργεί με FRF στην άκρη του εργαλείου		Λειτουργικές παράμετροι στην άκρη του εργαλείου		
d) Διαδικασία ανάλυσης της σταθερότητας				
Σάρωση της FRF αναζητώντας το όριο σταθερότητας σε κάθε συχνότητα	Σάρωση της ταχύτητας ατράκτου και της συχνότητας της FRF αναζητώντας το όριο σε κάθε ταχύτητα της ατράκτου	Για ένα πλέγμα συνθηκών κοπής, έλεγχος για το αν οι ιδιοτιμές της μήτρας που προσδιορίζει την σταθερότητα της διαδικασίας έχει όρισμα μικρότερο από 1		
Ορολογία				
$h_j$ : Δυναμικό πάχος θραυσμάτων της jth αιχμής κοπής $\phi$ : Γωνιακή θέση της jth αιχμής κοπής με αναφορά στον άξονα Y $z$ : Αριθμός δοντιών του εργαλείου $T$ : Περίοδος διέλευσης δοντιού, υπολογίζεται από $T = 2\pi 60 / \Omega z$ $F_{(x,y)}$ : Δύναμη κοπής στην επόμενη, ακτινική, X και Y κατεύθυνση $K_t$ : Συντελεστή διαμοίρασμού επαπτόμενης κοπής $K_r$ : Συντελεστής διαμοίρασμού ακτινικής κοπής κανονικοποιημένος με αναφορά στο $K_t$ $a_p$ : Αξονικό βάθος κοπής $g(\phi)$ : Λειτουργία παραθύρου ίση με 1 όταν κόβει η jth αιχμή κοπής $[A(t)]$ : Κατευθυντικοί συντελεστές T-περιοδικής μήτρας $\omega_c$ : Συχνότητα των ιχνών κραδασμού σε rad/s $\Omega$ : Ταχύτητα της ατράκτου σε rad/s				

### 3.5.3.3 Μέθοδοι για την Μείωση και την Αποφυγή των Ιχνών Κραδασμού

Η εκτίμηση των λοβών που εξηγήθηκε παραπάνω, είναι η εκτός λειτουργίας προσέγγιση για την αποτροπή της ασταθούς μηχανικής κατεργασίας. Αν οι λοβοί υπολογιστούν σωστά, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις συνθήκες κοπής για σταθερή κατεργασία, με ταυτόχρονα, ένα πολύ υψηλό βάθος κοπής, με άλλα λόγια με ένα υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή υποδηλώνει μία ολοκληρωμένη ανάλυση της δυναμικής της μηχανής, που είναι δύσκολο να διεξαχθεί από βιομηχανικούς χρήστες, και μία σε βάθος γνώση της διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας και των υλικών. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις εκτός λειτουργίας, για την παρακολούθηση του κραδασμού ή του επιπέδου θορύβου και την τροποποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας:

**Μεταβολή της ταχύτητας της ατράκτου:** Τα CNC παρακολουθούν το επίπεδο κραδασμού ή θορύβου και τροποποιούν γρήγορα την ταχύτητα της ατράκτου. Για παράδειγμα, το λογισμικό Harmonizer από την Metalmax, φάχνει μία σταθερή ταχύτητα. Μία μεταβολή του προηγούμενου, είναι η συνεχής μεταβολή της ταχύτητας της ατράκτου (SSV) που αλλάζει συνεχώς την ταχύτητα της ατράκτου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής.

**Αύξηση της απόσβεσης:** Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για αυτό, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ένα ενεργό μαγνητικό έδρανο για να απορροφά τις δυναμικές δυνάμεις, λαμβάνοντας πλεονέκτημα από τις ιδιότητες απόσβεσης των ηλεκτρο-ρεολογικών υγρών, ή στηρίζοντας το κυλινδρικό έδρανο με ένα μη-περιστρεφόμενο έδρανο και ρυθμίζοντας την πίεση.

Όσον αφορά στο εργαλείο και στην εργαλειοθήκη, υπάρχουν πολλές επιλογές για να αυξηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος της ατράκτου:

- Χρησιμοποιώντας εργαλεία με ενσωματωμένη απόσβεση όπως το SandvikCoromantCoroMill 390 ή ειδικές βέργες διεύρυνσης οπών.
- Μειώνοντας την Ο/Δαναλογία του εργαλείου. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα των μηχανών πέντε αξόνων.
- Χρησιμοποιώντας εργαλεία monoblock, όπου το στέλεχος και η εργαλειοθήκη βρίσκονται στο ίδιο σώμα.
- Σπάζοντας την περιοδικότητα των επιδράσεων των δοντιών, χρησιμοποιώντας ποικίλες αποστάσεις οπών και ποικίλα ελικοειδή εργαλεία.

### **3.5.4 Η Θερμική Συμπεριφορά**

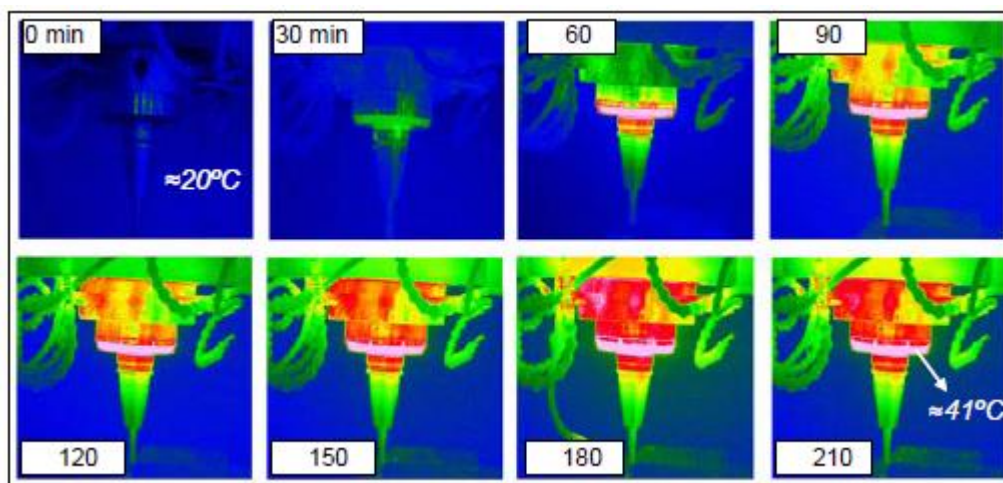
Στις εργαλειομηχανές και στις ατράκτους, τα τρία είδη μεταφοράς της θερμότητας, η αγωγιμότητα, η μεταγωγή και η ακτινοβολία, μπορούν αν είναι παρόντα και επιπλέον, μπορεί να εμφανιστούν ταυτόχρονα. Η αγωγιμότητα συμβαίνει, για παράδειγμα, στην περιοχή επαφής μεταξύ του εργαλείου κοπής και του επεξεργαζόμενου κομματιού. Η μεταγωγή συμβαίνει όταν τα ψυκτικά γαλακτώματα, η ελάχιστη ποσότητα λιπαντικού (WQL) ή αέρα, κάνουν επαφή με το περιστροφικό εργαλείο κοπής, ανταλλάσσουν θερμότητα και στη συνέχεια αποβάλλονται. Και τέλος, η ακτινοβολία, η οποία είναι η λιγότερο σημαντική όσον αφορά στις εργαλειομηχανές, συμβαίνει όταν, για παράδειγμα, η θερμοκρασία ενός στοιχείου αυξάνει εξαιτίας την έκθεσης στον ήλιο ή σε κοντινές μηχανές που συμπεριφέρονται ως πηγές θερμότητας. Και οι τρεις τύποι μεταφοράς της θερμότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά της εργαλειομηχανής σε απόκριση με τις εσωτερικές αλλαγές της θερμοκρασίας από τα στοιχεία της εργαλειομηχανής και της διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας, και των εξωτερικών αλλαγών της θερμοκρασίας.

Η αύξηση στην θερμοκρασία της ατράκτου αυξάνει το μήκος του άξονα της ατράκτου. Η θερμική διαστολή μπορεί να αναπαρασταθεί ως ακολούθως:

$$L_{T_1} = L_{T_0} \times (1 + \alpha \times (T_1 - T_0)) \quad (3.11)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής ο οποίος ποικίλει σύμφωνα με το υλικό και καθορίζεται πειραματικά,  $T_1$  και  $T_0$  είναι οι τελικές και αρχικές θερμοκρασίες, διαδοχικά, και  $L_{T_1}$  και  $L_{T_0}$  είναι τα αντίστοιχα μήκη σε κάθε θερμοκρασία. Η εξίσωση 3.13 είναι περιορισμένης χρήσης αφού υποθέτει πως η κατανομή της θερμότητας είναι σταθερή κατά μήκος ολόκληρου του σώματος και πως είναι ομογενής και ομοιόμορφη, αλλά δίνει μία καλή ιδέα των σχετιζόμενων βασικών παραγόντων. Η θερμική διαστολή εξαρτάται από το υλικό, το αρχικό μήκος του στοιχείου και την ποικιλία στην θερμοκρασία. Ο Πίνακας 6.2 στο Κεφάλαιο 6 δείχνει τον συντελεστή θερμικής διαστολής για υλικά που βρίσκονται κοινώς στον σχεδιασμό και στην κατασκευή των εργαλειομηχανών. Επομένως, για να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις της θερμότητας, είναι απαραίτητη η παρέμβαση σε τρεις περιοχές: το υλικό που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει έναν χαμηλό θερμικό συντελεστή, το μήκος του άξονα πρέπει να είναι ελαχιστοποιημένο, και η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει να μειωθεί από ένα σύστημα ψύξης.

Η θερμική ανάπτυξη επηρεάζει την ακρίβεια της διαδικασίας. Η διαστολή του άξονα «πιέζει» το εργαλείο αξονικά προς το επεξεργαζόμενο κομμάτι, έτσι η θέση της κατεργασμένης επιφάνειας διαφέρει από την επιθυμητή. Αυτή η επίδραση φαίνεται καθαρά στο σχήμα 3.31, όπου μία άτρακτος υψηλής ταχύτητας θερμαίνεται κατά τη διάρκεια 3.5 ωρών. Οι υπέρυθρες εικόνες έχουν ληφθεί με αυξήσεις 30 λεπτών. Στο διάστημα αυτό, η θερμοκρασία της ατράκτου αυξήθηκε από περίπου 20°C στους 41°C. Το σφάλμα μεταξύ της αρχικής εικόνας και της τελευταίας για μία μηχανική υποδοχή είχε ως αποτέλεσμα μία μεταβολή του βάθους των 0.1mm. Μία λύση για την μείωση αυτού του προβλήματος είναι να αντισταθμίσει την απόκλιση στην άτρακτο, που απαιτεί την μέτρηση της θερμικής παραμόρφωσης που προκαλείται. Ο Mazak ανέπτυξε και έβγαλε στο εμπόριο αυτή τη λύση στην λειτουργία ελέγχου της θερμικής παραμόρφωσης, από τον MazatrolMatrixCNC έλεγχο.



Σχήμα 3. 31 – Βασική θερμοκρασία της ατράκτου κατά τη διάρκεια 3.5 ωρών. Κάθε εικόνα έχει ληφθεί με προσauξήσεις 30 λεπτών.

Τα έδρανα επηρεάζονται επίσης από την θερμική ανάπτυξη, αλλάζοντας τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Οι εσωτερικοί και εξωτερικοί δακτύλιοι και τα κυλινδρικά στοιχεία, υφίστανται μία διαφορετική θερμική ανάπτυξη, έτσι αλλάζει η αρχική προφόρτιση των εδράνων. Ακόμη, η θερμική διαστολή του άξονα προσθέτει περισσότερη προφόρτιση κατά τέτοιο τρόπο που το εσωτερικό ακροφύσιο πιέζεται προς το έδρανο. Σαν αποτέλεσμα της εκτεταμένης προφόρτισης, αυξάνονται οι δυνάμεις τριβής, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και μειώνεται η ζωή του εδράνου. Υπάρχουν πολλές λύσεις για να μειωθεί αυτή η επίδραση. Για παράδειγμα, μία τεχνική που χρησιμοποιείται στις ατράκτους υψηλής ταχύτητας φραιζαρίσματος και λείανσης, είναι να στηριχθούν τα έδρανα πάνω σε ένα κυμαινόμενο

κιβώτιο προφορτισμένα με ελατήρια που επιτρέπουν την αξονική κίνηση. Μία άλλη τεχνική είναι να χρησιμοποιηθεί μία υδραυλική συσκευή για να αντισταθμίσει την προφόρτιση των εδράνων σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, ώστε να είναι δυνατόν να διατηρηθούν οι δυνάμεις τριβής.

#### 3.5.4.1 Πηγές Θερμότητας

Για να αποφευχθούν τα προβλήματα θερμότητας και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της ατράκτου, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις πηγές θερμότητας, ώστε να μειωθεί η συνεισφορά τους. Οι κύριες πηγές θερμότητας που επηρεάζουν την άτρακτο είναι οι κινητήρες, η τριβή στα έδρανα και η διαδικασία κοπής.

Η θερμότητα που παράγεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες στον στάτορα και τον ρότορα, είναι μία λειτουργία ροπής και ταχύτητας και καθορίζεται από την αποδοτικότητα του κινητήρα. Η ηλεκτρική ισχύς που εισάγεται στον κινητήρα μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, αλλά επίσης και σε θερμότητα, λόγω των αρχικών απωλειών χαλκού, σιδήρου και τυχαίων απωλειών, καθώς και δευτερευόντων απωλειών χαλκού. Στις ενσωματωμένες ατράκτους, η πηγή θερμότητας είναι πολύ κοντά στον άξονα της ατράκτου, ώστε η θερμότητα να εκκενώνεται σωστά. Οι άτρακτοι που κινούνται με ιμάντα και με οδοντοτροχό, έχουν πηγές θερμότητας στα στοιχεία μετάδοσης, στις τροχαλίες και στο κιβώτιο ταχυτήτων, διαδοχικά, λόγω της τριβής. Μία άλλη πηγή θερμότητας είναι λόγω της ιξώδους τριβής μεταξύ των περιστροφικών στοιχείων και του αέρα.

Η θερμότητα που παράγεται στα έδρανα είναι λόγω της τριβής μεταξύ των κυλινδρικών στοιχείων και των εσωτερικών και εξωτερικών διαδρόμων και εξαρτάται από την ταχύτητα, την προφόρτιση και την λίπανση. Οι πιο γρήγορες ταχύτητες σημαίνουν υψηλότερες δυνάμεις επαφής λόγω της φυγοκέντρου δύναμης και, επιπλέον, υψηλότερη τριβή. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη η διάμετρος των σφαιρικών εδράνων, τόσο πιο γρήγορη είναι η γραμμική ταχύτητα, και ξανά αυξάνει η τριβή. Αν και μία βαριά προφόρτιση μπορεί να είναι επιθυμητή για την αύξηση της ακαμψίας της ατράκτου, υποδηλώνει επίσης υψηλότερες δυνάμεις επαφής και τριβής, συνεπώς, μειώνεται η ζωή του εδράνου. Τέλος, η φτωχή λίπανση σε μεγάλες ταχύτητες, μειώνει δραστικά την διάρκεια ζωής των εδράνων της ατράκτου.

Η θερμότητα που παράγεται στην ζώνη αποκοπής λόγω της απομάκρυνσης του μηχανισμού θραυσμάτων, μπορεί να μεταφερθεί από το εργαλείο στην εργαλειοθήκη και στην άτρακτο. Το μέγεθος του προβλήματος εξαρτάται έντονα από το υλικό του επεξεργαζόμενου κομματιού, από το εργαλείο και από το υλικό της εργαλειοθήκης, και το υγρό κοπής. Ο Weck ανέφερε μία περίπτωση μείωσης της θερμικής ανάπτυξης που έφτανε στο 50% στο φραιζάρισμα αποπεράτωσης χρησιμοποιώντας μία εργαλειοθήκη που φτιάχτηκε χαμηλή διαστολή υλικού ινβάρ, αντί από ένα χαλύβδινο εργαλείο.

#### 3.5.4.2 Η Ψύξη

Η ψύξη της ατράκτου είναι απαραίτητη ώστε να εγκαθίστανται οι θερμοκρασίες και να μπορούν να αποφευχθούν οι αρνητικές επιδράσεις της εκτεταμένης θερμότητας και των μεταβολών της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ατράκτου. Αυτό είναι ο λόγος που τα ψυκτικά υγρά επιβάλλεται να κυκλοφορούν μέσω ποικίλων ζωνών της δομής της κουκουβάγιας και της ατράκτου, για να απορροφήσουν την παραγόμενη θερμότητα. Σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένας «μανδύας» ψύξης γύρω από την άτρακτο, και αυτό επιτυγχάνεται περιβάλλοντάς την με ψυκτικό υπό τη μορφή κοιλοτήτων ή καναλιών; δείτε την Σχήμα 3.32. Υπάρχει μία ποικιλία ψυκτικών υγρών, τα πιο συνήθη εκ των οποίων είναι ο αέρας, το λάδι και το νερό με προσθήκες, για να αποτρέψουν την οξειδωση των αγωγών.

Η πιο κοινή ψύξη της ατράκτου για έναν καλό έλεγχο της θερμοκρασίας βασίζεται σε ένα σύστημα ψύξης κλειστού βρόχου, όπου το ψυκτικό που έρχεται από την άτρακτο τροφοδοτείται μέσα σε μία εξωτερική μονάδα ψύξης για να την ψύξει, και μετά αντλείται πάλι πίσω στην άτρακτο. Οι μονάδες ψύξης έχουν ανταλλαγείς θερμότητας όπου το ψυκτικό υγρό ψύχει το κύκλωμα ψύξης. Τα συστήματα ψύξης κλειστού βρόχου έχουν μεγαλύτερη ικανότητα απομάκρυνσης της θερμότητας και χρειάζονται λιγότερο χρόνο για να το κάνουν, από ότι άλλα συστήματα ανταλλαγής θερμότητας. Ελέγχονται με έναν θερμοστάτη που ελέγχει την θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού που κυκλοφορεί γύρω από την άτρακτο, κρατώντας την σταθερή κατά έναν τρόπο που η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία δωματίου.

Μία άλλη λύση αποτελείται από την συνεχόμενη κυκλοφορία ψυχρού ξηρού αέρα γύρω από την άτρακτο. Πιο οικονομικά αν και πιο ανεπαρκή συστήματα χρησιμοποιούν το υγρό κοπής για να ψύξουν την άτρακτο. Το υγρό κοπής τροφοδοτείται μέσα στις κοιλότητες της ατράκτου και στη συνέχεια ψεκάζεται πάνω στο εργαλείο. Αυτή η λύση είναι κάπως απαρχαιωμένη, καθώς το υγρό που κυκλοφορεί θερμαίνεται από την διαδικασία κοπής, και έτσι μειώνεται η ψυκτική του ικανότητα.

### **3.5.5 Άτρακτοι σε χρήση: Άλλα Προβλήματα**

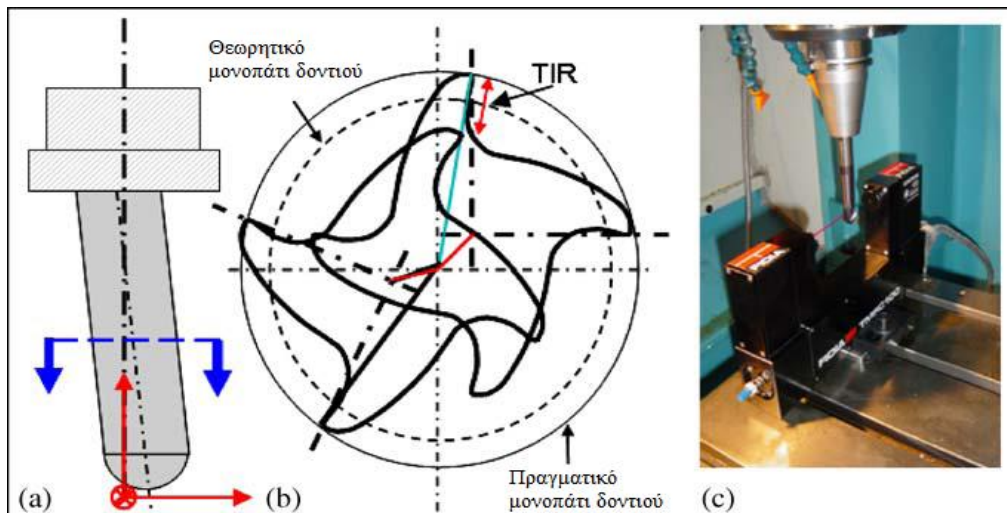
Άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την απόδοση της ατράκτου, που ο μηχανικός πρέπει να αντιμετωπίσει είναι η εκκεντρότητα και της ατράκτου και του εργαλείου, που μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία ακρίβειας και σε συγκρούσεις με το επεξεργαζόμενο κομμάτι ή με τα στοιχεία της μηχανής, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στην άτρακτο.

#### **3.5.5.1 Εκκεντρότητα**

Ο όρος «εκκεντρότητα» στην μηχανική κατεργασία περιγράφει την κατάσταση μία ατράκτου και ενός εργαλείου, όταν έχουν έναν άξονα περιστροφής που διαφέρει από τον δικό τους γεωμετρικό άξονα. Η συνολική ενδεχόμενη εκκεντρότητα, TIR, είναι η συνολική απόσταση που μετρείται από την μέγιστη θέση στην ακτινική κατεύθυνση, στην ελάχιστη θέση στην ίδια κατεύθυνση; δείτε την Σχήμα 3.32. Ο παράγοντας αυτός περιορίζει την παραγωγικότητα, καθώς επηρεάζει αρνητικά την δυναμική ισορροπία, την κατανομή του φορτίου θραυσμάτων, το τμήμα του φινιρίσματος και την διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η εκκεντρότητα μπορεί να έχει αναφοράς στην άτρακτο ή στο εργαλείο.

Οι εκκεντρικότητες στην μύτη της ατράκτου μπορούν να εμφανιστούν για διάφορους λόγους, όπως ελαττωματικά στοιχεία της ατράκτου, ανακρίβειες στην συναρμολόγηση, μεταξύ άλλων πιθανοτήτων. Αν και οι ακτινικές και οι αξονικές εκκεντρότητες μετριοούνται στην άκρη (μύτη) της ατράκτου, πιο σημαντική είναι η ακτινική εκκεντρότητα.

Η εκκεντρότητα του εργαλείου κοπής μετράται συνήθως σαν μία σύνθεση ακτινικών και γωνιακών εκκεντροτήτων, και παράγεται από ανακρίβειες στην λειτουργία στήριξης. Το αποτέλεσμα είναι πως ένα δόντι υποστηρίζει μεγαλύτερα φορτία θραυσμάτων από τα άλλα. Αυτό το σφάλμα οφείλεται στις ελλείψεις της προσαρμογής εργαλείου-φωλιάς σύσφιξης, στον βαθμό φθοράς της φωλιάς, ή σε μικρές προσμίξεις θραυσμάτων ή ψυκτικού υγρού.



Σχήμα 3. 32 – α) Σχηματικό εκκεντρότητας εργαλείου. β) Επίδραση της εκκεντρότητας του εργαλείου στο μονοπάτι πραγματικής αιχμής κοπής και TIR, γ) Έλεγχος με λέιζερ της εκκεντρότητας του εργαλείου.

Η εκκεντρότητα μπορεί να μετρηθεί ενώ η άτρακτος βρίσκεται σε λειτουργία (δυναμική μέτρηση) ή σε παύση, χρησιμοποιώντας στατικούς ελέγχους. Η δυναμική μέτρηση παρέχει πιο αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα, αν και τα όργανα που απαιτούνται είναι πιο ακριβά.

### 3.5.5.2 Συγκρούσεις

Οι τυχαίες συγκρούσεις που παράγονται κατά τη διάρκεια των λειτουργιών απομάκρυνσης, είναι μία από τα μεγαλύτερα προβλήματα για τους χειριστές των εργαλειομηχανών. Μπορεί να έχουν εξαιρετικά αρνητικές, ακόμη και μη αναστρέψιμες επιδράσεις στην δομή της εργαλειομηχανής και ειδικά στην άτρακτο, στο εργαλείο κοπής ή στο επεξεργαζόμενο κομμάτι. Γενικά, όταν συμβεί μία σημαντική σύγκρουση, η μηχανή υφίσταται μία έκτακτη διακοπή της λειτουργίας, για να μειώσει τη ζημιά και να επιτρέψει στον χειριστή να φτιάξει το πρόβλημα αν αυτό είναι δυνατόν. Ο χειριστής μπορεί επίσης να πιάσει ένα κουμπί έκτακτης διακοπής της λειτουργίας για να σταματήσει τη μηχανή όταν είναι αναγκαίο.

Παρ' όλα αυτά, η πρόληψη των ατυχημάτων και η ασφάλεια που σχετίζεται με τις εργαλειομηχανές έχει βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια. Ένας τρόπος για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις είναι να τις προβλέψουμε χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις της διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας. Τα προγράμματα υποβοηθούμενης από υπολογιστή κατεργασίας (CAM) παρέχουν αυτού του είδους την αξιολόγηση και ανάλυση των πιθανών προβλημάτων που μπορεί να εμφανιστούν, έτσι ώστε να μπορούν να επιλυθούν πριν να αρχίσει η πραγματική εργασία με την μηχανή. Επίσης, υπάρχουν CNC που μπορούν να ανιχνεύσουν online τις παρεμβολές στην μηχανή. Είναι η περίπτωση του Mazak Mazatrol Matrix που χρησιμοποιεί ένα συγχρονισμένο μοντέλο 3D, για τον έλεγχο των συγκρούσεων όταν ένας χειριστής μετακινεί χειροκίνητα τους άξονες της μηχανής.

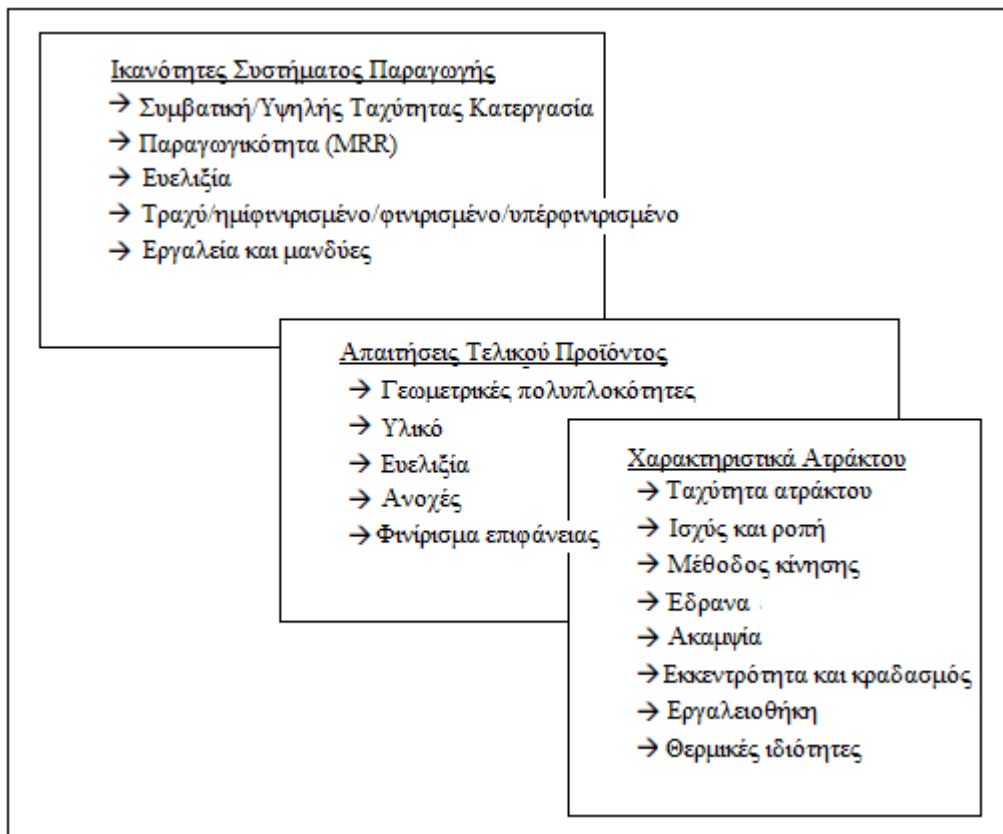
## 3.6 Επιλογή Ατράκτου

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η βιομηχανία ατράκτων παρέχει ένα μεγάλο φάσμα από επιλογές και διαμορφώσεις ατράκτων για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε τομέα. Το σχήμα 3.33 δείχνει ένα παράδειγμα τριών προστιθέμενων επιλογών στην τυπική άτρακτο, που προσφέρθηκε από την EDEL.

Η επιλογή της πιο κατάλληλης ατράκτου, είναι μία διαδικασία αλληλεπίδρασης που πρέπει να λάβει υπόψη τα τελικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και των απαιτήσεων του συστήματος παραγωγής. Η μέγιστη ταχύτητα της ατράκτου, η ισχύς απόδοσης, η ροπή, η μέθοδος κίνησης, ο τύπος των εδράνων, η ακαμψία και η δυναμική συμπεριφορά, η

τεχνολογία των εργαλειοθηκών και οι θερμικές ιδιότητες, αποτελούν όλα χαρακτηριστικά της ατράκτου που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν, για να ληφθούν οι καλύτερες προδιαγραφές του τελικού προϊόντος, όσον αφορά στην ανοχή, το φινίρισμα των επιφανειών κλπ. και να συναντηθούν οι απαιτήσεις του συστήματος υπό τη μορφή παραγωγικότητας, ευκαμψίας, κλπ.

Συνεπώς, η επιλογή της σωστής ατράκτου είναι μία σημαντική αλλά και πολύ δύσκολη εργασία, καθώς η λάθος απόφαση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το σύστημα παραγωγής και την απόδοση μίας εταιρίας. Αυτός που λαμβάνει τις αποφάσεις, πρέπει να εξοικειωθεί με τις τεχνολογίες της ατράκτου, ώστε να επιλεγθεί το πιο κατάλληλο έδρανο ατράκτου, μαζί με όλους τους παράγοντες που σχετίζονται; δείτε την Σχήμα 3.33 φαίνονται τα βασικά βήματα για την επιλογή μίας ατράκτου, για μία διαδικασία φραιζαρίσματος.



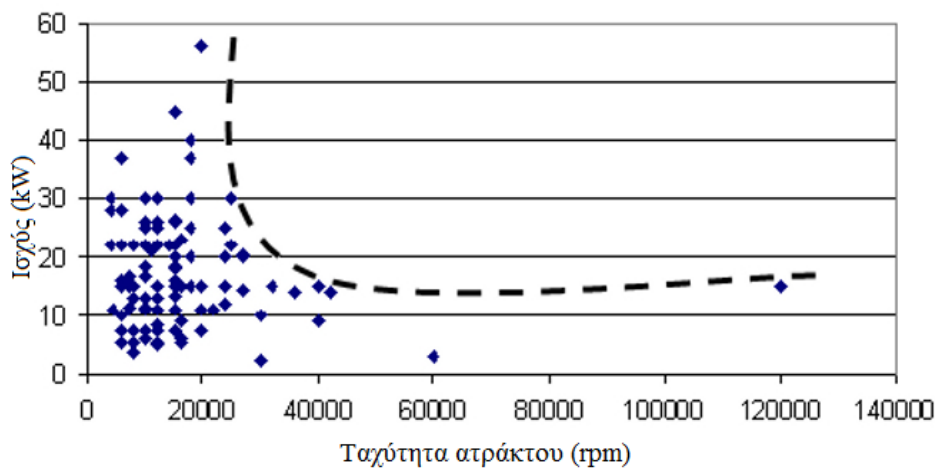
Σχήμα 3. 33 – Το σύστημα παραγωγής και οι απαιτήσεις του τελικού προϊόντος αποτελούν αποφασιστικούς παράγοντες στην επιλογή των χαρακτηριστικών της ατράκτου.

### 3.6.1 Συμβατική Μηχανική Κατεργασία ή HSM

Η συμβατική διαδικασία κατεργασίας, συνδυάζει χαμηλές ταχύτητες ατράκτου και ποσοστά τροφοδοσίας, και υψηλά βάθη κοπής και βυθίσεις εργαλείου. Αυτές οι διαδικασίες απαιτούν μία άτρακτο με υψηλή αποτελεσματική ισχύ και ροπή. Σε σύγκριση, η υψηλής ταχύτητας κατεργασία σημαίνει υψηλότερες ταχύτητες άξονα και αυξημένα ποσοστά τροφοδοσίας για να επιτευχθούν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης υλικού.

Οι συμβατικές άτρακτοι, συνήθως λειτουργούν σε ταχύτητες χαμηλότερες από 10,000rpm και η ισχύς απόδοσής τους δεν υπερβαίνει τα 25KW. Υπάρχει μία σχέση, ή ένας συμβιβασμός μεταξύ της ισχύος αποδοτικότητας της μηχανής και της μέγιστης της ταχύτητας περιστροφής. Όπως δείχνει το σχήμα 3.34, είναι ασυνήθιστο να βρεθούν μηχανές στην αγορά που να μπορούν να προσφέρουν υψηλές ταχύτητες ατράκτου σε σύζευξη με την υψηλή ισχύ. Γενικά, είναι πολύ ακριβοί άτρακτοι και είναι προσανατολισμένοι στην

κατεργασία αλουμινίου για τον αεροναυτικό τομέα, ο οποίος απαιτεί αυτού του είδους τις ατράκτους, όπως και το υλικό του επεξεργαζόμενου κομματιού και τα εργαλεία, επιτρέπουν την μηχανική κατεργασία σε πολύ υψηλές ταχύτητες.



Σχήμα 3. 34 – Τυπική ταχύτητα ατράκτου ενάντια στις εργαλειομηχανές ισχύος.

Η επιλογή των εργαλείων κοπής, όσον αφορά στην καταλληλότητα ενός υλικού επεξεργαζόμενου κομματιού, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των παραμέτρων κοπής, είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή μίας κατάλληλης ατράκτου.

### 3.6.2 Επιλογή Εργαλείου

Τα χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής που χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή της κατεργασίας, επηρεάζοντας τα χαρακτηριστικά της απόδοσης που απαιτούνται στην άτρακτο. Υπάρχει μία τεράστια ποικιλία εργαλείων κοπής όσον αφορά στο σχήμα, το μέγεθος, τον αριθμό των δοντιών, της επιφάνεια του μανδύα, την απόδοση, την χρήση, τον κατασκευαστή, κλπ.

Η πολυπλοκότητα της επιφάνειας, η ακρίβεια και η τραχύτητα της επιφάνειας, καθορίζουν το ποια λειτουργία και ποιο εργαλείο κοπής χρειάζεται. Τέτοιοι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη ξανά και ξανά όταν προγραμματίζονται λειτουργίες λείανσης, ημί-φινιρίσματος, φινιρίσματος και υπέρ-φινιρίσματος. Για απλές γεωμετρίες που απαιτούν σημαντικό ξεχόνδρισμα, χρησιμοποιούνται εργαλεία μικρής διαμέτρου με πολλές αιχμές κοπής. Από την άλλη πλευρά, τα εργαλεία μικρής διαμέτρου χρειάζονται για σύνθετες γεωμετρίες για να εξασφαλίσουν τις απαιτήσεις υψηλής ακριβείας ή την υψηλή λείανση των επιφανειών.

Οι παράμετροι κοπής μπορούν να υπολογιστούν με την βοήθεια πινάκων που παρέχονται συνήθως από τους κατασκευαστές και χρησιμοποιώντας την γνωστή ημί-μηχανιστική φόρμουλα. Το επεξεργαζόμενο κομμάτι προϋποθέτει την ταχύτητα κοπής  $V_c$  η οποία καθορίζει την ταχύτητα της ατράκτου  $N$  σε rpm:

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} \quad (3.12)$$

όπου  $D$  είναι η διάμετρος του εργαλείου. Στη συνέχεια, η ταχύτητα τροφοδοσίας  $V_f$  σε mm/min υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την προτεινόμενη τροφοδοσία ανά δόντι σε mm και τον αριθμό δοντιών του εργαλείου:

$$V_f = f_z \cdot z \cdot N \quad (3.13)$$

Μόλις επιλεχθούν το ακτινικό βάθος κοπής  $a_e$  και το αξονικό βάθος κοπής  $a_p$ , ο όγκος του απομακρυσμένου υλικού  $Q$  σε  $\text{cm}^3/\text{min}$  μπορεί να υπολογιστεί με την ταχύτητα τροφοδοσίας  $V_f$ .

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot V_f}{1000} \quad (3.14)$$

### 3.6.3 Το Υλικό του Επεξεργαζόμενου κομματιού

Η αποδοτική ισχύς που απαιτείται για να απομακρύνει έναν συγκεκριμένο όγκο σε συγκεκριμένο χρόνο εξαρτάται από το υλικό. Αυτή η τιμή είναι εύκολο να εκτιμηθεί από τους ελέγχους κοπής για την διεύρυνση οπής, αλλά για την επιπεδοποίηση γίνεται πολύ πιο πολύπλοκο να αποκτηθεί, αφού ο αριθμός των δοντιών στην κοπή αλλάζει και το πάχος του θραύσματος είναι επίσης μεταβλητό. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, μία μέση τιμή του πάχους θραυσμάτων  $h_m$  υπολογίζεται σε mm και σχετίζεται στην συγκεκριμένη ισχύ κοπής  $k_{c1}$  που μετρείται στα τεστ διεύρυνσης οπών.

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \text{ where } h_m = \frac{\sin \kappa \cdot 180 \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot d \cdot \arcsin(a_e/d)} \quad (3.15)$$

Ο παράγοντας  $m_c$  χρησιμοποιείται επίσης για να ληφθεί υπόψη το «φαινόμενο μεγέθους» κοπής σε χαμηλή τροφοδοσία. Η δεύτερη στήλη του Πίνακα 3.3 δείχνει την συγκεκριμένη ισχύ κοπής σε  $\text{N/mm}^2$  πολλών υλικών.

**Πίνακας 3.3** – Συντελεστές συγκεκριμένης κοπής ισχύος και συντελεστές συγκεκριμένης ισχύος πολλών υλικών.

Υλικό εργασίας	Συγκεκριμένη ισχύς κοπής ( $\text{N/mm}^2$ )	Συγκεκριμένος συντελεστής ισχύος $K$
Δομικά ατσάλια	1,600–1,800	4.0–5.7
Χάλυβες	1,950–2,900	5.3–7.4
Χυτοσίδηρος	900–1,100	2.5–3.7
Κράματα Τιτανίου	1,300–1,400	4.7–5.1
Κράματα Αλουμινίου	400–700	1.3–2.1

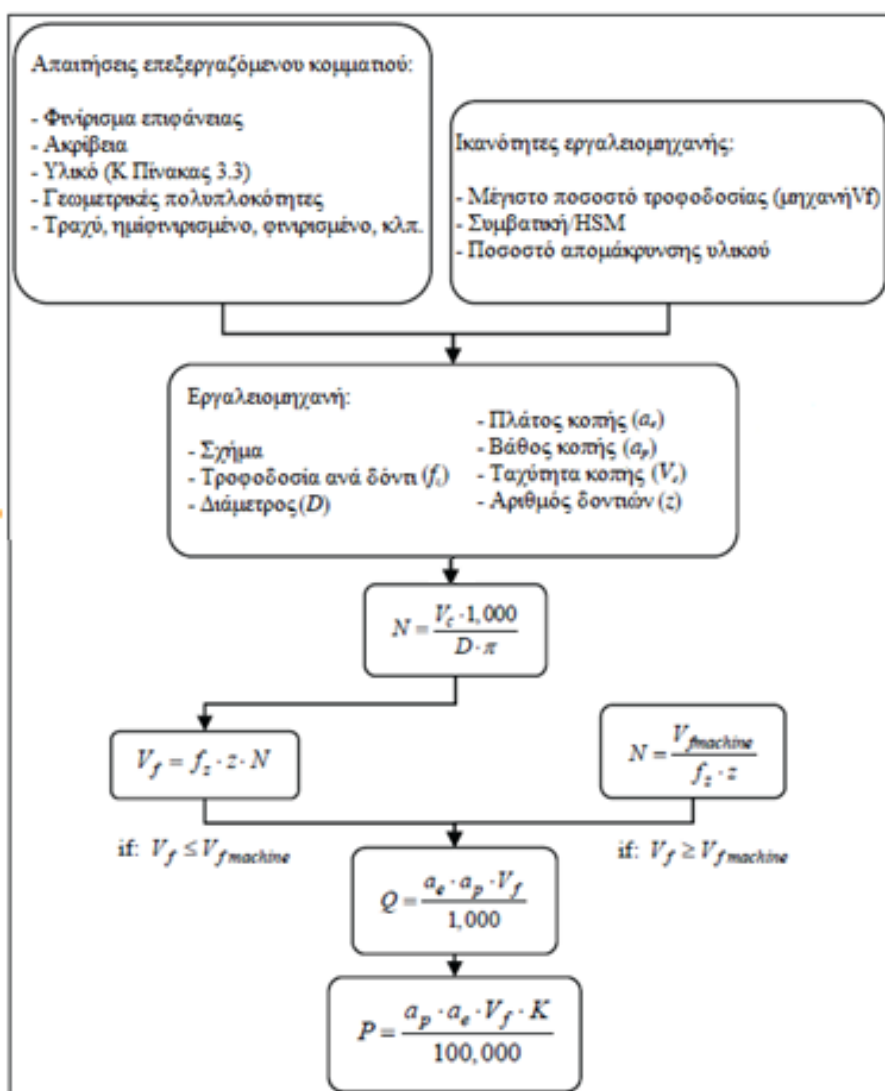
### 3.6.4 Απαιτήσεις Ισχύος και Ταχύτητας της ατράκτου

Αφού απομακρυνθεί ο όγκος του υλικού και είναι γνωστές οι συγκεκριμένες δυνάμεις κοπής, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς σε kW χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση, όπου η είναι η αποδοτικότητα της μηχανής.

$$P = \frac{Q \cdot k_c}{60 \cdot 1,000 \cdot \eta} \quad (3.16)$$

Ωστόσο, για να απλοποιηθεί η εκτίμηση της συγκεκριμένης ισχύος κοπής στην επιπεδοποίηση, οι σύγχρονοι κατασκευαστές παρέχουν απευθείας έναν συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος  $K$  εξαρτώμενου από την τροφοδοσία ανά δόντι και από την ακτινική βύθιση  $a_e/D$ ; δείτε τον Πίνακα 3.3, Συνεπώς η απαιτούμενη ισχύς σε kW μπορεί να υπολογιστεί απλά ως:

$$P = \frac{a_p \cdot a_e \cdot V_f \cdot K}{100,000} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3. 35 – Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της ταχύτητας της ατράκτου και της αποδοτικής ισχύος στην επιτεδοποίηση.

Η ισχύς που λαμβάνεται με αυτή την έκφραση είναι μετά καλά προσαρμοσμένη για να συμπεριλάβει την επίδραση της γωνίας κλίσης των αιχμών κοπής. Συνεπώς, οι απαιτήσεις περιστροφικής ταχύτητας της ατράκτου  $N$  και η αποδοτική ισχύς  $P$  για την μηχανική κατεργασία του επεξεργαζόμενου κομματιού, μπορεί να υπολογιστεί, μόλις γνωρίσουμε το ποιο εργαλείο και ποιες στρατηγικές θα χρησιμοποιηθούν για το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα στις συμβατικές μηχανές ή στο HSM, το υλικό που είναι να κατεργαστεί και την απαιτούμενη ακρίβεια, την ομαλότητα και την γεωμετρική πολυπλοκότητα. Ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων είναι μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία φαίνεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.35.

Με την ταχύτητα του άξονα και την αποτελεσματική ισχύ που απαιτείται, η άτρακτος μπορεί να επιλεγεί. Πρέπει να υπενθυμιστεί πως το υπολογισμένο ποσοστό τροφοδοσίας δεν μπορεί να υπερβαίνει το μέγιστο ποσοστό τροφοδοσίας της μηχανής. Αν λαμβάνεται ένα υψηλότερο ποσοστό τροφοδοσίας στους υπολογισμούς, θα πρέπει να υπολογίσουμε ξανά την απαιτούμενη ταχύτητα της ατράκτου  $N$ , χρησιμοποιώντας το μέγιστο ποσοστό τροφοδοσίας της μηχανής  $V_{f\text{machine}}$ .

Κατά αυτό τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη οι δυνατότητες της εργαλειομηχανής και οι τεχνολογικές ελλείψεις που σχετίζονται με την επιτεδοποίηση ενός συγκεκριμένου υλικού. Αν η μηχανή φραιζαρίσματος είναι ικανή να προσφέρει την ταχύτητα περιστροφής, το

ποσοστό τροφοδοσίας και την ισχύ αποδοτικότητας που έχει υπολογιστεί, τότε η μηχανική κατεργασία μπορεί να εξελιχθεί.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να διεξαχθεί κατά έναν παρόμοιο τρόπο, για να υπολογιστούν οι παράμετροι και οι απαιτήσεις στις άλλες διαδικασίες απομάκρυνσης μετάλλου, όπως εκείνες που χρησιμοποιούν τόνρους ή μηχανές λείανσης.

### **3.7 Συνοπτικά Συμπεράσματα**

Η άτρακτος της εργαλειομηχανής παίζει έναν σημαντικό ρόλο στις λειτουργίες μηχανικής κατεργασίας, επειδή παρέχει την σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και του επεξεργαζόμενου κομματιού και της ροπής που χρειάζεται για να εκτελεστεί η απομάκρυνση του υλικού. Συνεπώς, οι προδιαγραφές της ατράκτου έχουν μία τεράστια επιρροή στην απόδοση της εργαλειομηχανής και στην ευελιξία του συστήματος παραγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό, τα βασικά στοιχεία των ατράκτων και η τεχνολογία που έχει παρουσιαστεί πίσω από αυτές, όπως και πολλές όψεις που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά τους στις συνθήκες κοπής, και μερικά κριτήρια για να κάνουν μία σωστή επιλογή των αξόνων.

Τα πλεονεκτήματα στην τεχνολογία ατράκτων έχει επιτρέψει στις τεχνολογίες κατεργασίας υψηλής ταχύτητας να αναπτυχθούν. Υψηλότερες ταχύτητες κοπής έχουν γίνει δυνατές λόγω των βελτιώσεων στις τεχνολογίες των εδράνων, στα συστήματα λίπανσης, στην μηχανική, με τον έλεγχο των κινητήρων με κωδικοποιητή ανάδρασης ή τα προσφάτως ανεπτυγμένα AMB στα συστήματα κίνησης, στην μοντελοποίηση για την πρόληψη της θερμικής και δυναμικής συμπεριφοράς της ατράκτου. Παρ' όλα αυτά, η περαιτέρω εργασία είναι απαραίτητη για την αύξηση των περιορισμών της μέγιστης ταχύτητας της ατράκτου, της μέγιστης ισχύος που είναι διαθέσιμη και της διάρκειας ζωής της ατράκτου. Επιπλέον, οι άτρακτοι έχουν επίσης γίνει ένα εργαλείο για την επεξεργασία της παρακολούθησης και της διάγνωσης. Η αυξημένη χρήση των αισθητήρων δεν είναι μόνο μία πηγή πληροφοριών για τον μηχανικό, ώστε να βελτιώσει την διαδικασία κοπής και τον έλεγχο υγείας της ατράκτου, αλλά επίσης επιτρέπει την χρήση των τεχνικών ελέγχου και των ενεργοποιητών ώστε να αποφευχθούν τα online δυναμικά και θερμικά προβλήματα.



## 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Νέες Εξελίξεις στην Κίνηση και στις Τράπεζες

### Περίληψη Κεφαλαίου:

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται οι διαφορετικές εναλλακτικές οδήγησης των εργαλειομηχανών. Δείχνουν τί επικρατεί τεχνολογικά στη βιομηχανική παραγωγή. Οι γραμμικοί και οι περιστροφικοί οδηγοί αναλύονται από μία περιγραφική προοπτική και εξηγούνται επίσης μερικές βασικές αρχές σχεδιασμού. Έχουν ληφθεί παραδείγματα από γνωστούς κατασκευαστές. Τέλος, φαίνονται οι τελευταίες τάσεις των στοιχείων για τα συστήματα κίνησης, δίνοντάς μας μία προοπτική των μελλοντικών εργαλειομηχανών.

### 4.1 Εισαγωγή

Οι σημερινές τάσεις στην κατασκευή των εργαλειομηχανών απαιτούν υψηλότερη απόδοση όσον αφορά στην ταχύτητα και στην ακρίβεια της μηχανικής κατεργασίας. Για να εκπληρωθούν αυτές οι απαιτήσεις, στους βασικούς ανταγωνιστές, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες στην ανάπτυξη νέων στοιχείων και διαμορφώσεων οδήγησης και κατεύθυνσης, για γραμμικές όπως και περιστροφικές κινήσεις. Αυτό το «ταξίδι χωρίς τέλος» κεντρίζει τις βασικές του δραστηριότητες στις ακόλουθες περιοχές:

- Μία συνεχής ανάπτυξη των σερβοκινητήρων.
- Μία κλίση προς τη διαμόρφωση διαφανειών και οδηγών για οικογένειες μηχανών. Ίσως να μην είναι κατάλληλη από τεχνικής απόψεως, αλλά είναι από οικονομικής απόψεως. Τα πλεονεκτήματα αυτή της κλίσης ξεκινούν από τα εγγενή πλεονεκτήματα σε όλες τις διαμορφώσεις: η μείωση του χρόνου ανάπτυξης της μηχανής, η μείωση της σχεδιαστικής ή βοηθητικής αποτυχίας ή των σφαλμάτων, και η μείωση των αναφορών εξαρτήματος και στοιχείου. Αντίθετα, σε ένα αρχικό στάδιο, απαιτεί μία σε βάθος μελέτη της οικογένειας μηχανών για να αναπτυχθούν, σε συνδυασμό με τον τρόπο διαχωρισμού τους σε μονάδες. Οι προδιαγραφές για αυτές τις μονάδες είναι ακόμη πιο δύσκολο να πραγματοποιηθούν από ότι εκείνες των διαφανειών για μία συγκεκριμένη μηχανή.

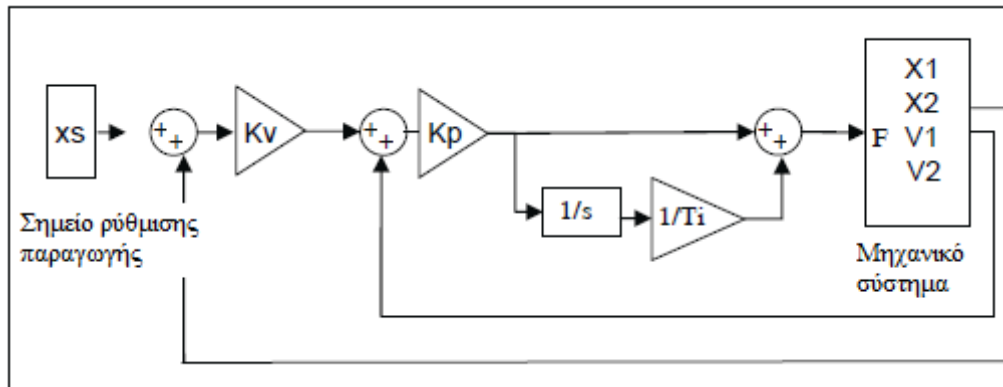
Υπάρχει επίσης μία τάση όχι βελτίωσης των ξεχωριστών στοιχείων, αλλά την επιλογή και την αναβάθμισή τους; αυτή η τάση είναι πάνω από όλα καθαρή στην περίπτωση των συστημάτων κίνησης. Επιπλέον, για κάποιο διάστημα, οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών σχεδίαζαν και είχαν τα μέσα για να κατασκευάσουν την κατεύθυνση αυτών, στην ουσία μέσω συστημάτων τριβής. Σήμερα, η τάση είναι να χρησιμοποιούνται ράουλα, που αναπτύχθηκαν από έναν διαφορετικό σχεδιαστή, και να αναβαθμίζονται σχεδιαστικά.

Ο ορισμός των σχεδιαστικών προδιαγραφών των γραμμικών και περιστροφικών οδηγών. Ακόμη, από τις μηχανές συγκεκριμένου σκοπού, ο προσδιορισμός των δυνάμεων, των χρόνων, των ταχυτήτων κλπ., εμπλέκει μία πρόκληση η οποία καθορίζει τελείως την διαμόρφωση της κίνησης και της κατεύθυνσης. Όπως σε όλες τις ασκήσεις σχεδιασμού, η λύση που επιλέγεται, πάντα έχει ως αποτέλεσμα τον συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων με έναν συγκεκριμένο βαθμό ασυμβατότητας.

#### 4.1.1 Ακρίβεια και Δυναμική

Η συνεχής τάση μείωσης του χρόνου κατεργασίας και η βελτίωση της ακρίβειας, απαιτούν βελτίωση των διαστάσεων όλων των στοιχείων της μηχανής, συμπεριλαμβάνοντας τα συστήματα κίνησης και κατεύθυνσης.

Το μηχανικό σχέδιο ενός οδηγού καθορίζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του, και με τη σειρά τους, αυτά τα χαρακτηριστικά περιορίζουν την ικανότητα του ελέγχου σερβοκίνησης να ενεργήσει, δηλαδή, να εκτελεστεί σωστά ακόμη και σε υψηλές τιμές κέρδους των βρόχων ελέγχου. Ο βασικός βρόχος ελέγχου που συνήθιζε να κατευθύνει ένα φορτίο εργαλειομηχανής, φαίνεται στο σχήμα 4.1. Φαίνονται επίσης οι βασικές παράμετροι ελέγχου,  $K_v$ ,  $K_p$  και  $T_i$ . Όπως φαίνεται, ο ελεγκτής της θέσης του βρόχου είναι ένα ανάλογο κέρδος ( $K_v$ ) ενώ ο βρόχος ταχύτητας έχει ανάλογες ( $K_p$ ) και ακέραιες ( $T_i$ ) επιδράσεις.



Σχήμα 4. 1 – Βρόχοι ελέγχου θέσης και ταχύτητας.

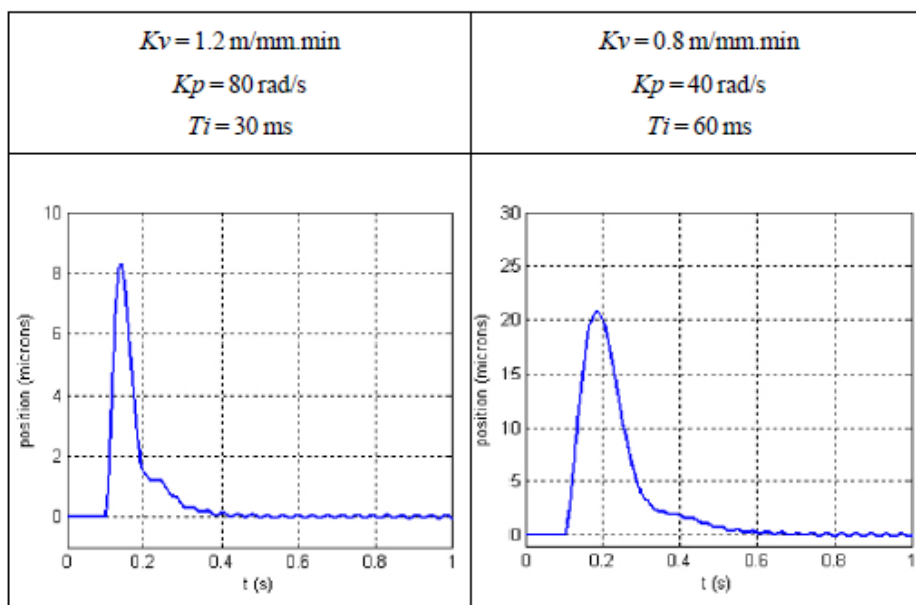
Από τη μία, η υψηλή τιμή κέρδους των βρόχων ελέγχου έχουν ως αποτέλεσμα μία κίνηση, η οποία ανταποκρίνεται γρηγορότερα στην περίπτωση των σημείων ρύθμισης και συνεπώς παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια παρεμβολών, χωρίς να λαμβάνει υπόψη άλλες λειτουργίες CNC.

Οι παράμετροι ελέγχου που επιτρέπονται από τον οδηγό σχετίζονται με τις φυσικές συχνότητες της αλυσίδας μεταφοράς ισχύος, μεταξύ του κινητήρα και της διαφάνειας. Για να αποκτηθούν υψηλά δυναμικά, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η ακαμψία της αλυσίδας μεταφοράς και να μειωθούν οι μάζα και η αδράνεια των κινούμενων στοιχείων.

Από την άλλη πλευρά, τα υψηλά κέρδη παρέχουν ακαμψία ενάντια στις διακοπές. Όταν η διαφάνεια υπόκειται σε ένα στάδιο ισχύος, λόγω της δύναμης τριβής σε μία αλλαγή κατεύθυνσης της κίνησης, για παράδειγμα, το πλάτος της μέγιστης οδήγησης είναι αντιστρόφως ανάλογο με το προϊόν των αναλογικών και ακέραιων ενεργειών του βρόχου ταχύτητας, ενώ ο χρόνος αποκατάστασης είναι αντιστρόφως ανάλογος με την θέση του βρόχου κέρδους. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 4.2.

Το εύρος ζώνης της κίνησης, άμεσα σχετιζόμενο με τα κέρδη των βρόχων ελέγχου, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες από τη φύση τους συχνότητες κίνησης (οδήγησης), πρέπει να είναι τέτοια που να μην διεγείρουν τους δομικούς τύπους της εργαλειομηχανής. Συνεπώς, παρουσιάζει ενδιαφέρον η διάσταση της οδήγησης, λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές συχνότητες της δομής.

Σαν συμπέρασμα, στην θεώρηση στις νέες απαιτήσεις ακριβείας και παραγωγικότητας, το σχέδιο των οδηγών κατέχει ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου του δυναμικού χαρακτήρα τους. Για αυτό, χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία μας επιτρέπουν να καθορίσουμε τις φυσικές συχνότητες του συστήματος κίνησης (οδήγησης).



Σχήμα 4. 2 – Επίδραση των κερδών στην απόκριση της κίνησης ενάντια σε ένα δυναμικό βήμα των 100N.

## 4.2 Γραμμικοί Κινήσεις από Σφαιρικούς Κοχλίες

Η κίνηση από σφαιρικό κοχλία είναι η πιο διαδεδομένη στο πεδίο των εργαλειομηχανών για διαδρομές που δεν υπερβαίνουν τα 4-5 μέτρα. Τα χαρακτηριστικά που την τοποθετούν σε τόσο ευνοϊκή θέση είναι η υψηλή μηχανική μείωση που παρέχεται διατηρώντας μία υψηλή αποδοτικότητα και ακαμψία, όπως και επαρκή ακρίβεια για ήδη υπάρχουσες εργαλειομηχανές.

Ένας σφαιρικός κοχλίας είναι μία μηχανική συσκευή, η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε γραμμική κίνηση. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με του κοχλία μολύβδου, στον οποίο η ολίσθηση μεταξύ των νημάτων του κοχλία μολύβδου και του περικοχλίου έχει αντικατασταθεί από την κύλιση των σφαιρών, οι οποίες επανακυκλοφορούν μέσα στο περικόχλιο.

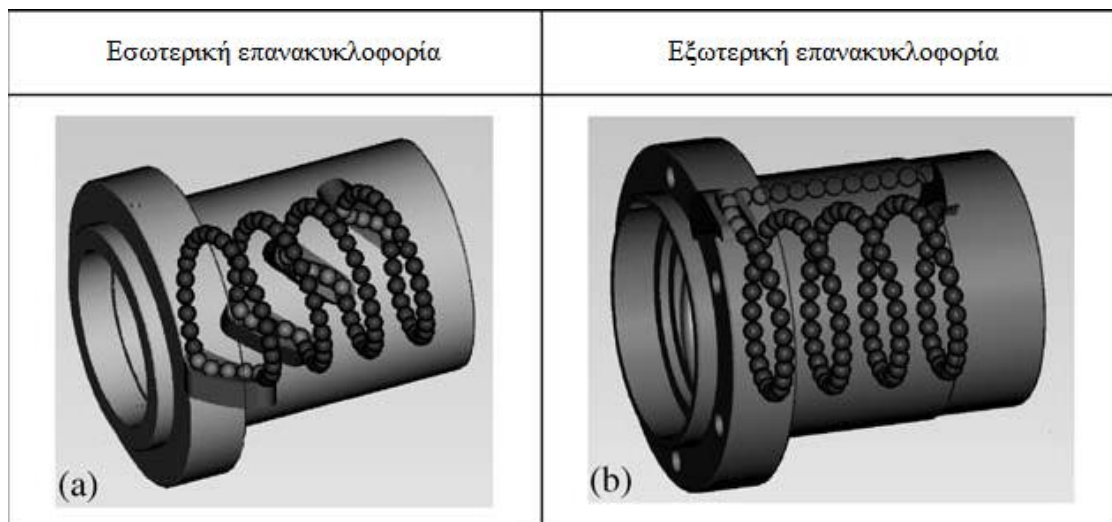
### 4.2.1 Διαστασιολόγηση

Μία σωστή διαστασιολόγηση και επιλογή ενός σφαιρικού κοχλία πρέπει να λάβει υπόψη πολλές πτυχές.

#### 4.2.1.1 Η Εξάλειψη του Κενού

Οι απαιτήσεις ακρίβειας των εργαλειομηχανών που ήδη υπάρχουν, απαιτούν τη χρήση συστημάτων κίνησης (οδηγών), οι οποίοι έχουν μειωθεί στην μεγαλύτερη δυνατή έκταση. Οι σφαιρικοί κοχλίες που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των διαφανειών των εργαλειομηχανών τείνουν να είναι προφορτισμένοι για να εξαλείψουν αυτό το κενό. Υπάρχουν διαφορετικά συστήματα για την παροχή της προφόρτισης.

Το πιο απλό σύστημα προφόρτισης συνίσταται στην χρησιμοποίηση σφαιρών ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου από τον διαθέσιμο χώρο. Αυτός ο τύπος προφόρτισης είναι έγκυρος μόνο όταν η απαραίτητη προφόρτιση είναι μικρή; λόγω αυτού, οι σφαίρες υφίστανται ολίσθηση στα σημεία επαφής, τα οποία παράγουν υψηλή φθορά.



Σχήμα 4. 3 – Λεπτομέρεια επανακυκλοφορίας της σφαίρας. a) Εσωτερική. b) Εξωτερική (από Shuton)

Όταν η απαραίτητη προφόρτιση είναι μέση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα και μόνο περικόχλιο, στο οποίο η ίνα έχει τροποποιηθεί σε μία μονή ενδιάμεση ίνα του περικόχλιου. Συνεπώς, οι σφαίρες κάνουν μόνο επαφή σε δύο σημεία.

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την παροχή μίας μέσου ύψους και καλά ελεγχόμενης προφόρτισης, που συνίσταται από δύο περικόχλια μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ένας διαχωριστής, η πυκνότητα του οποίου καθορίζει την ισχύ της προφόρτισης. Στο σχήμα 4.3, συσφίγγονται τα δύο περικόχλια.

Όταν ο κοχλίας υπόκειται σε δυνάμεις, η προφόρτιση σε μία από τις πλευρές του περικόχλιου αυξάνει και μειώνεται στην άλλη. Μπορεί να καταδειχτεί πως η προφόρτιση χάνεται όταν η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι 2.38 φορές της αξίας της. Γενικά, αυτή η κατάσταση πρέπει να αποφευχθεί επειδή, επιπρόσθετα με το κενό, παράγει μία πρόωρη φθορά των σφαιρών.

Η προφόρτιση αυξάνει την φθορά και την παραγωγή θερμότητας. Για το λόγο αυτό, η προφόρτιση περιορίζεται περίπου στο 12% της χωρητικότητας του δυναμικού φορτίου, με μία φυσιολογική τιμή μεταξύ 6% και 8%.

#### 4.2.1.2 Τύποι Επανακυκλοφορίας

Η επανακυκλοφορία των σφαιρών μπορεί να διεξαχθεί είτε μέσω ενός εσωτερικού εκτροπέα ή, αλλιώς, μέσω ενός εξωτερικού σωλήνα. Όταν είναι δυνατό, προτιμάται η χρήση του εκτροπέα μέσω ενός εξωτερικού σωλήνα, λόγω του ότι παράγεται λιγότερος θόρυβος, θερμοκρασία και φθορά. Παρόλα αυτά, η διάμετρος του περικόχλιου με εξωτερική επανακυκλοφορία είναι μεγαλύτερη, που προϋποθέτει την χρήση του σε συγκεκριμένους σχεδιασμούς. Το σχήμα 4.3 δείχνει διαφορετικούς τύπους επανακυκλοφορίας των σφαιρών.

#### 4.2.1.3 Κρίσιμη Ταχύτητα και Εκτροπή

Όταν γυρίζει ο κοχλίας, ο κύριος περιοριστής της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας είναι το φαινόμενο «κρούσης» (Whip). Αυτό εμπλέκει την αστάθεια που παρουσιάζεται όταν η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία είναι η ίδια με την συχνότητα κάμψης. Αυτή η συχνότητα εξαρτάται από την διάμετρο του κοχλία, του μη υποστηριζόμενου μήκους και του τύπου των στηριγμάτων. Στην πράξη, η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία διατηρείται κάτω από το 80% της υπολογιζόμενης οριακής τιμής. Η κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να καθοριστεί από:

$$N_{\sigma} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot S}} \cdot 60 \quad (4.1)$$

όπου:

$N_{cr}$ : Κρίσιμη ταχύτητα (rpm)

E: Μέτρο ελαστικότητας

I: Αδράνεια τμήματος

S: Περιοχή τμήματος

$\rho$ : Πυκνότητα

L: Μη υποστηριζόμενο μήκος

**Πίνακας 4.1** – Λειτουργία κρίσιμης ταχύτητας του τύπου των στηριγμάτων.

Τύπος στηριγμάτων	$\lambda$	$N_{\sigma}$
Σταθερά-σταθερά	4.730	$221 \cdot d/L^2$
Σταθερά-στηριζόμενα	3.927	$152 \cdot d/L^2$
Σταθερά-ελεύθερα	1.875	$34 \cdot d/L^2$

Ο παράγοντας  $\lambda$  εξαρτάται από τον τύπο των στηριγμάτων που χρησιμοποιούνται (δείτε Πίνακα 4.1). Στον ακόλουθο πίνακα, φαίνεται η επιτρεπόμενη ταχύτητα (rpm) ενός κοχλία, περιορισμένη στο 80% της κρίσιμης ταχύτητας, σύμφωνα με την διάμετρο (mm), το μη υποστηριζόμενο μήκος (m) και τον τύπο των στηριγμάτων.

Μία πιθανότητα αύξησης της κρίσιμης ταχύτητας ενός κοχλία είναι μέσω της χρήσης των «υποστηριγμάτων». Με αυτό τον τρόπο, η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων μειώνεται έτσι ώστε η συχνότητα κάμψης του κοχλία αυξάνει ουσιαστικά. Καθώς κινείται η διαφάνεια, τα υποστηρίγματα πρέπει να αποσύρονται αυτόματα, για να αποτρέψουν τη σύγκρουση με το περικόχλιο. Στην πράξη, η χρήση των υποστηριγμάτων είναι αρκετά περίπλοκη και όχι διαδεδομένη.

Μία άλλη οπτική που πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν χρησιμοποιούνται μακριοί κοχλίες, μήκους μεγαλύτερου από 4 ή 5 μέτρα, είναι η απόκλιση που αποκτούν λόγω του βάρους τους. Είναι επιθυμητό η απόκλιση να μην υπερβαίνει το 1mm, ώστε να αποφευχθεί σημαντική ακτινική πίεση πάνω στο περικόχλιο, το οποίο αναπτύσσει μία ταχύτατη φθορά του συστήματος κίνησης. Τα υποστηρίγματα βοηθούν επίσης στην μείωση της απόκλισης όταν χρησιμοποιούνται μακριοί κοχλίες.

#### 4.2.1.4 Η Προφόρτιση

Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, κυρίως λόγω της ροπής τριβής μεταξύ του κοχλία και του περικόχλιου, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και των δύο στοιχείων. Συνήθως είναι μία αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 5°C και 10°C. Αν ο κοχλίας συγχωνεύεται και στα δύο άκρα, η διαστολή λόγω της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε κάμψη, η οποία επηρεάζει δραστικά την απόδοση οδήγησης της κίνησης. Για να αποφευχθεί αυτή η κάμψη, ο κοχλίας συνήθως προφορτίζεται για να αντισταθμίσει την διαστολή.

#### 4.2.1.5 Τιμή $d^*N$ και Λίπανση

Ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας που σχετίζεται με την ταχύτητα είναι η ολίσθηση των σφαιρών μέσα στα κυλινδρικά ακροφύσια. Αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί όταν λόγω της υψηλής ταχύτητας τους, οι απαραίτητες δυνάμεις που εγγυώνται κύλιση δεν μπορούν να μεταδοθούν. Συνήθως, αυτό ποσοτικοποιείται μέσω της τιμής  $d^*N$  του προϊόντος. Αυτό είναι το προϊόν διαμέτρου (mm) και ταχύτητας περιστροφής (rpm) του κοχλία. Μία μέση τιμή για

τους κοχλίες μολύβδου που συνήθως χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές είναι 125,000mm/rpm. Η επιτρεπόμενη τιμή αυξάνει όταν χρησιμοποιείται η εξωτερική επανακυκλοφορία ή διεξάγεται λίπανση είτε με λάδι ή με λάδι-αέρα αντί για γράσο. Η χρήση μίας σφαίρας μικρής διαμέτρου ή κεραμικών σφαιρών, βοηθούν επίσης στην αύξηση της επιτρεπόμενης τιμής  $d \cdot N$ . Η υπέρβαση της επιτρεπόμενης τιμής οδηγεί σε ταχύτατη φθορά του σφαιρικού κοχλία.

Η διαδικασία που απαιτούν τοποθέτηση με μικρές κινήσεις, σε μία περιοχή μερικών χιλιοστών ή λιγότερης από ένα χιλιοστό, μπορεί να αυξήσουν την ταχύτητα φθοράς του κοχλία, λόγω της δυσκολίας στην λίπανση της περιοχής εργασίας. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να δοθεί ειδική προσοχή στον τύπο λίπανσης που χρησιμοποιείται.

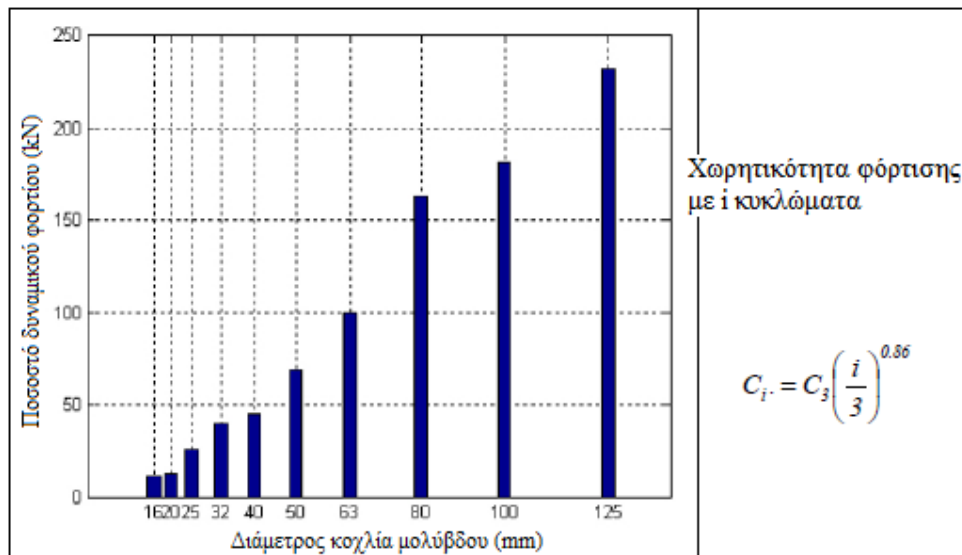
#### 4.2.1.6 Χωρητικότητα και Διάρκεια Ζωής της Φόρτισης

Οι χωρητικότητες φόρτισης διαχωρίζονται. Στην μία πλευρά, η στατική χωρητικότητα φόρτισης (C0) είναι εκείνη που παράγει μία μόνιμη παραμόρφωση του 0.01% των περιστρεφόμενων στοιχείων. Η λειτουργία κάτω από αυτή την κατάσταση πρέπει να αποφεύγεται ώστε να αποτρέπεται ο θόρυβος και η πρόωρη φθορά του συστήματος κίνησης. Για εφαρμογές εργαλειομηχανών, είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται ένας παράγοντας υψηλής ασφάλειας για να αποτρέπεται η μόνιμη ζημία στον οδηγό κίνησης. Όταν οι δυνάμεις στις οποίες υπόκειται ο οδηγός είναι γνωστές, ένας κατάλληλος παράγοντας ασφάλειας είναι 2.5. Ο συντελεστής πρέπει να είναι μεγαλύτερος όταν οι δυνάμεις δεν είναι γνωστές με βεβαιότητα, ή όταν ο οδηγός υπόκειται σε σύγκρουση ή κραδασμό. Στην πράξη, η χωρητικότητα στατικού φορτίου δεν τείνει να είναι ένας περιορισμός τη στιγμή επιλογής ενός οδηγού.

Από την άλλη πλευρά, η χωρητικότητα δυναμικού φορτίου (C) σχετίζεται με τη διάρκεια ζωής του σφαιρικού κοχλία. Αυτό εμπλέκει την φόρτιση κάτω από την οποία, το 90% των κοχλίων αγγίζουν μία περίοδο ζωής ενός εκατομμυρίου περιστροφών.

Η χωρητικότητα φόρτισης εξαρτάται βασικά από την διάμετρο του κοχλία, την διάμετρο των σφαιρών και τον αριθμό φορτίου των σφαιρικών εδράνων (αριθμός κυκλωμάτων). Αυτό επηρεάζεται επίσης από την τραχύτητα της επιφάνειας των κυλινδρικών ακροφυσίων και κατασκευαστικών ανοχών.

Το σχήμα 4.4 δείχνει την χωρητικότητα δυναμικής φόρτισης των σφαιρικών κοχλίων σύμφωνα με την διάμετρο του κοχλία. Για να δειχτούν τα αντιπροσωπευτικά δεδομένα, η διάμετρος της σφαίρα που χρησιμοποιείται πιο συχνά για κάθε διάμετρο κοχλία που έχει επιλεχθεί. Επιπλέον, οι χωρητικότητες φόρτισης αντιστοιχούν στους προφορισμένους κοχλίες, με τρία κυκλώματα σε κάθε ημισφαίριο περικοχλίου. Η αναλογία που υποδηλώνεται στην ίδια εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η χωρητικότητα δυναμικής φόρτισης, για κοχλίες με διαφορετικό αριθμό κυκλωμάτων.



Σχήμα 4. 4 – Λειτουργία χωρητικότητας δυναμικής φόρτισης της διαμέτρου του σφαιρικού κοχλίας (3 κυκλώματα).

**Πίνακας 4. 2** – Υπολογισμός της διάρκειας ζωής των προφορτισμένων σφαιρικών κοχλίων.

$F_{ma(1)} = F_{pr} \left( 1 + \frac{F_m}{3F_{pr}} \right)^{3/2}$	$F_{ma(2)} = F_{ma(1)} - F_m$
$L_{10(1)} = \left( \frac{C_{am}}{F_{ma(1)}} \right)^3 \cdot 10^6$	$L_{10(2)} = \left( \frac{C_{am}}{F_{ma(2)}} \right)^3 \cdot 10^6$
$L_{10} = \left( \frac{-10}{L_{10(1)}^9} + \frac{-10}{L_{10(2)}^9} \right)^{-9/10}$ (περιστροφές)	
$L_h = \frac{L_{10}}{n_m} \cdot \frac{1}{60}$ (ώρες)	$L_{km} = L_{10} \cdot p \cdot \frac{1}{10^6}$ (km)

Η διάρκεια του σφαιρικού κοχλίας που αποκτάται από την ισχύ προφόρτισης, τη μέση αξονική δύναμη που ενεργεί πάνω στον κοχλία και την χωρητικότητα της φόρτισης. Ο υπολογισμός σύμφωνα με το πρότυπο DIN 69051 (ISO 3408-5) συνοψίζεται στον Πίνακα 4.2.

Για να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η μέση αξονική ισχύς που ενεργεί πάνω στον κοχλία. Αυτή η μέση φόρτιση καθορίζεται χρησιμοποιώντας την Μέθοδο Κανόνων του Miner για υπολογισμούς αδράνειας. Στην περίπτωση αυτή, η ισοδύναμη ισχύς καθορίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.2.

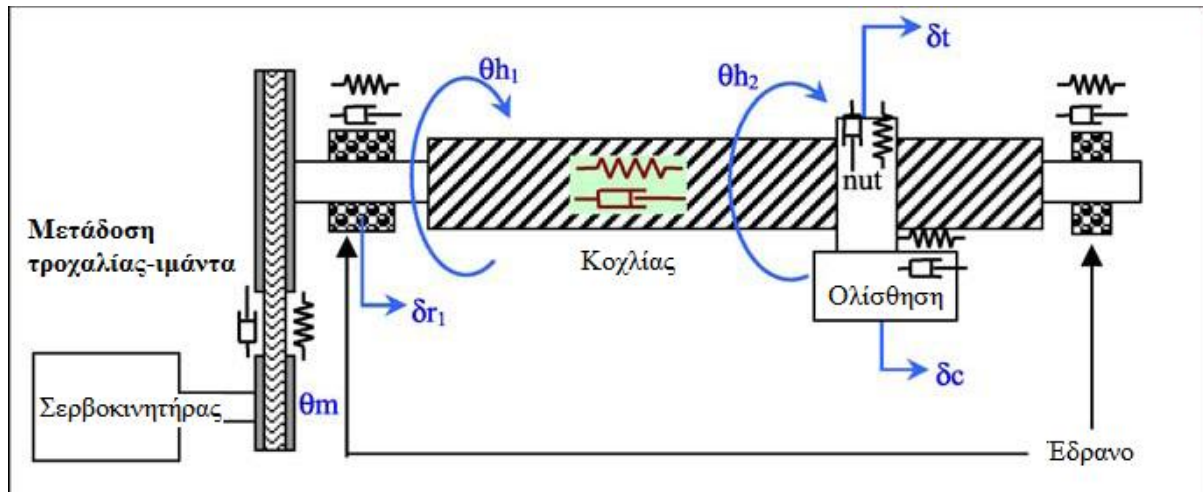
$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 q_1 \frac{n_1}{n_m} + F_2^3 q_2 \frac{n_2}{n_m} + \dots + F_n^3 q_n \frac{n_n}{n_m}} \text{ (N)} \quad (4.2)$$

Ομοίως, η μέση ταχύτητα λαμβάνεται από:

$$n_m = q_1 n_1 + q_2 n_2 + \dots + q_n n_n \text{ (rpm)} \quad (4.3)$$

#### 4.2.1.7 Δυναμικά Μοντέλα των Οδηγών Κίνησης

Όπως δηλώθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου, η χωρητικότητα για την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών των οδηγών στην φάση του σχεδιασμού, είναι ιδιαίτερης σημασίας. Μαθηματικά μοντέλα, όπως αυτά που φαίνονται στο σχήμα 4.5, έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό.



Σχήμα 4. 5 – Δυναμικό μοντέλο ενός οδηγού κίνησης σφαιρικού κοχλία με μετάδοση τροχαλίας.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό πρέπει να έχουν επαρκείς λεπτομέρειες για να είναι έγκυρα σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται. Ως αναφορά, στο μοντέλο που είδαμε παραπάνω, οι βαθμοί ελευθερίας που χρησιμοποιούνται μπορούν να διαχωριστούν με μπλε χρώμα.

Από την επιλογή των βαθμών ελευθερίας, ο υπολογισμός μήτρας για την μάζα και την ακαμψία μπορεί να ολοκληρωθεί, από την οποία θα είναι δυνατόν να ληφθούν οι φυσικές συχνότητες του συστήματος οδήγησης.

Το εύρος ζώνης των βρόχων ελέγχου, εκείνων της ταχύτητας όπως και της τοποθέτησης, θα περιοριστούν από την πρώτη φυσική συχνότητα του συστήματος που φαίνεται στο σχήμα 4.5. Συνεπώς, μπορεί να εκτιμηθεί πως το εύρος ζώνης του βρόχου ταχύτητας μπορεί να αγγίξει έως το 80% της πρώτης φυσικής συχνότητας, και του βρόχου τοποθέτησης στο 25% του εύρους ζώνης του βρόχου ταχύτητας.

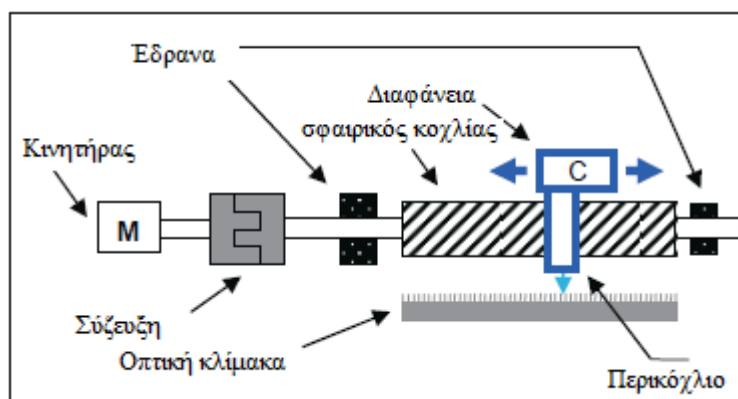
Τα δυναμικά μοντέλα των οδηγών μας επιτρέπουν επίσης να καθορίσουμε την ευαισθησία των επιτρεπόμενων κερδών ενάντια ποικίλων σχεδιασμών όπως είτε της διαμέτρου και του βήματος του κοχλία ή της ακαμψίας της σύζευξης. Ο Πίνακας 4.3 δείχνει ένα παράδειγμα του τύπου πληροφορίας που μπορεί να αποκτηθεί. Ο Πίνακας δείχνει την αύξηση σε Hz της πρώτης φυσικής συχνότητας ενάντια των αλλαγών του 10% των διαφορετικών παραμέτρων.

**Πίνακας 4. 3** – Ευαισθησία της 1<sup>ης</sup> φυσικής συχνότητας ενάντια στις αλλαγές του 10% των διαφορετικών παραμέτρων.

$\Delta \omega_1, \omega_1 = 35.7$	Παράμετρος
1.71 Hz	Σύζευξη στροφικής ακαμψίας
0.16 Hz	Αξονική ακαμψία του 1ου εδράνου
0.16 Hz	Αξονική ακαμψία του 2ου εδράνου
0.36 Hz	Αξονική ακαμψία σφαιρικού κοχλία
0.12 Hz	Στροφική ακαμψία σφαιρικού κοχλία
0.70 Hz	Αξονική ακαμψία περικόχλιου
1.73 Hz	Μάζα της ολίσθησης επεξεργαζόμενου κομματιού

#### 4.2.2 Ο Περιστροφικός Κοχλίας

Ο πιο κοινός τρόπος χρησιμοποίησης ενός σφαιρικού κοχλία αποτελείται από μία διάταξη περιστροφικού κοχλία (Σχήμα 4.6). Ο κοχλίας στηρίζεται πάνω σε πακέτα κυλίνδρων στο σταθερό μέρος της μηχανής και λειτουργεί από έναν περιστροφικό σερβοκινητήρα. Το περικόχλιο είναι σταθερό στην κινητή διαφάνεια, έτσι ώστε να αποτρέπεται η περιστροφή του. Με αυτό τον τρόπο, η περιστροφή του κοχλία παράγει μία μετατόπιση της διαφάνειας.



Σχήμα 4. 6 – Η πρότυπη διαμόρφωση του περιστροφικού κοχλία.

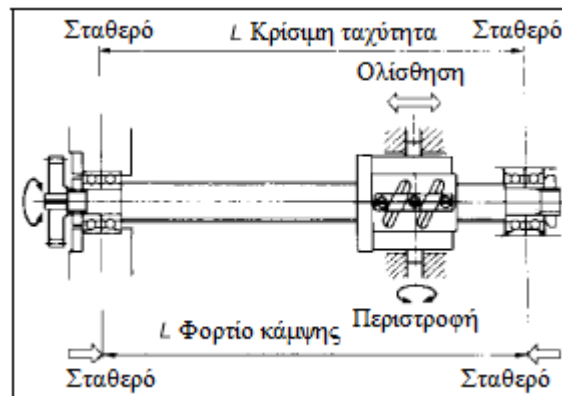
#### 4.2.3 Άλλες Διαμορφώσεις

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, η διαμόρφωση που περιγράφηκε προηγουμένως δεν είναι η πιο κατάλληλη. Μία κοινή μεταβλητή είναι ένα περιστροφικό περικόχλιο (Σχήμα 4.7). Στην διαμόρφωση αυτή, γυρίζει το περικόχλιο αντί του κοχλία. Αυτή η λύση παρέχει δύο πλεονεκτήματα: από τη μία, εξαλείφει το πρόβλημα της κρίσιμης ταχύτητας του κοχλία και από την άλλη, μπορεί να μειώσει την συνολική αδράνεια του οδηγού.

Με τους μακριούς περιστροφικούς κοχλίες (3 μέτρα), ένας από τους βασικούς περιορισμούς είναι η μειωμένη κρίσιμη ταχύτητα, ακόμη και με ενσωματωμένα στηρίγματα. Για να φτάσουν την επιθυμητή μέγιστη ταχύτητα χωρίς να αντιμετωπίζουν προβλήματα με την κρίσιμη ταχύτητα, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν μακριές αποστάσεις ανά στροφή, οι οποίες σε μεγάλο βαθμό προϋποθέτουν τις υπόλοιπες απαιτήσεις.

Από την άλλη, όταν οι κοχλίες είναι μακριοί ή οι αποστάσεις πολύ μικρές, η περιστροφική αδράνεια μπορεί να είναι μεγάλη. Στην περίπτωση αυτή, μία λύση βασίζεται σε ένα περιστροφικό περικόχλιο που παρέχει μεγαλύτερη επιτάχυνση με έναν μικρό κινητήρα.

Όταν χρησιμοποιείται το περιστροφικό περικόχλιο, το περικόχλιο και ο κινητήρας μπορεί να μετατοπιστούν, όπως και ο κοχλίας. Η δεύτερη λύση χρησιμοποιείται για την οδήγηση των ολισθήσεων, των οποίων το μήκος είναι μεγαλύτερο από την απαιτούμενη διαδρομή, για παράδειγμα οι μακριές τράπεζες εργασίας. Μέσω της λύσης περιστροφικού περικοχλίου, οι ολισθήσεις οδηγούνται με διαδρομές μέχρι 10 ή 12 μέτρων, αν και συνήθως δεν ξεπερνιούνται τα 6 ή 8 μέτρα.



Σχήμα 4. 7 – Προαιρετική διαμόρφωση από το περιστροφικό περικόχλιο.

### 4.3 Γραμμικοί Οδηγοί Κίνησης από Οδοντωτές Ράβδους και Τροχούς

Τα συστήματα κίνησης από οδοντωτές ράβδους και τροχούς προτιμώνται για χρήση όταν η διαδρομή της ολίσθησης που είναι να χρησιμοποιηθεί, είναι μεγαλύτερη από 4 ή 5 μέτρα.

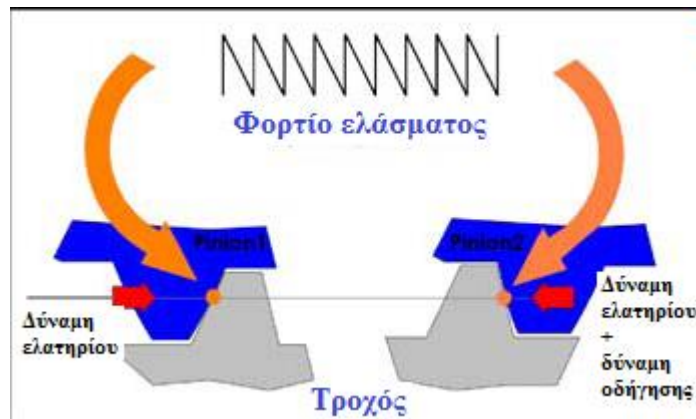
Το βασικό πλεονέκτημα τους ενάντια στο σύστημα κίνησης σφαιρικού κοχλία είναι ότι τα χαρακτηριστικά δεν εξαρτώνται από την ολίσθηση της διαδρομής. Η ολίσθηση της διαδρομής δεν περιορίζει ούτε την μέγιστη ταχύτητα, ούτε το σύστημα κίνησης, ούτε επηρεάζει την ακαμψία, αντίθετα με ότι συμβαίνει στην περίπτωση του σφαιρικού κοχλία. Επιπλέον, μας επιτρέπει να εξασφαλίσουμε υψηλά ποσοστά τροφοδοσίας και είναι μπορεί να αγγίξει τα 120m/min.

Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα κίνησης από οδοντωτές ράβδους και τροχούς δεν παρέχουν την υψηλή μείωση που μπορεί να παρέχει ο σφαιρικός κοχλίας. Για να παραχθεί μεγαλύτερη μείωση, οι τροχοί με την μικρότερη δυνατή διάμετρο πρέπει να χρησιμοποιούνται, μεταξύ 15 και 20 δοντιών. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μειωτήρας για να εξασφαλιστεί η ίδια απόδοση ισχύος και επιτάχυνσης όπως με τον κοχλία.

#### 4.3.1 Η Εξάλειψη του Κενού

Μία βασική όψη για οποιονδήποτε τύπο συστήματος κίνησης εργαλειομηχανής είναι η εξάλειψη των κενών. Στην περίπτωση των συστημάτων κίνησης οδοντωτής ράβδου και τροχού, οι λύσεις που παρέχουν μία λειτουργία χωρίς κενά έχουν υποστεί σημαντική βελτίωση τα τελευταία χρόνια.

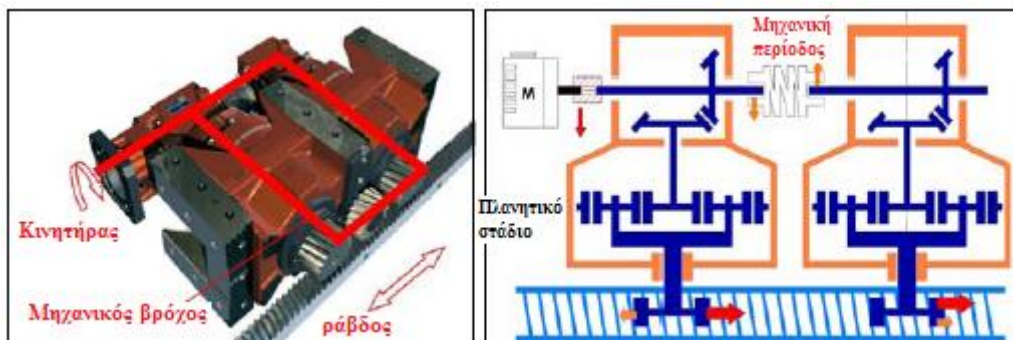
Σε αυτό τον τύπο οδήγησης, το κύριο κενό βρίσκεται μεταξύ των δοντιών του τροχού και των δοντιών της ράβδου. Για την εξάλειψη αυτού του κενού, χρησιμοποιούνται δύο τροχοί που λειτουργούν στην ίδια ράβδο, που ο καθένας στηρίζεται σε μια διαφορετική πλευρά της βέργας και συνεπώς πιέζουν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Άλλα συστήματα, όπως η διάσπαση τροχού με έναν μονό μειωτήρα, ή άλλες λύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, δεν εξάλειψαν τελείως το εγγενές παιχνίδι, το οποίο υπάρχει στο εσωτερικό του μειωτήρα και, συνεπώς, δεν οδήγησαν στο να είναι έγκυρες επιλογές για την εργαλειομηχανή.



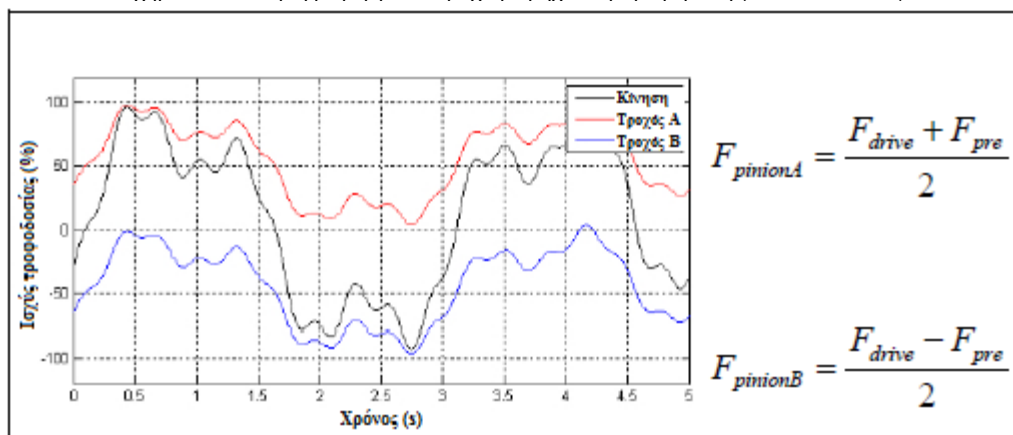
Σχήμα 4. 8 – Σύστημα προφόρτισης για αντίδραση καταστολής από RedexAndantex.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι παροχής μίας προφόρτισης μεταξύ των δύο κιβωτίων. Αυτό μπορεί να δημιουργηθεί μέσω μηχανικών μέσων (Σχήμα 4.8). Το επόμενο σχήμα δείχνει δύο κιβώτια ταχυτήτων, καθένα με τον τροχό εξόδου του να εμπλέκεται μέσα στην ράβδο. Οι άξονες εισόδου και των δύο κιβωτίων συνδέονται μέσω μίας ελαστικής σύζευξης, η οποία επιτρέπει την ρύθμιση της επιθυμητής προφόρτισης. Και τα δύο κιβώτια οδηγούνται από έναν μόνο κινητήρα (Σχήματα 4.9 και 4.10).

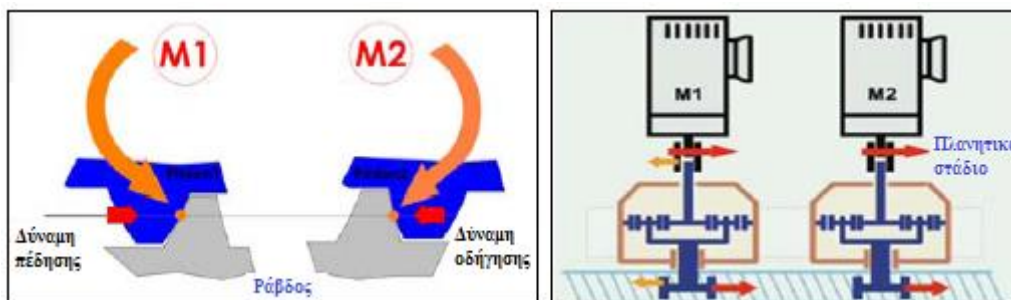
Η σημερινή τάση για την εξάλειψη του κενού είναι μέσω της χρήσης δύο ανεξάρτητων συναρμολογητών κινητήρα-μειωτήρα-τροχού. Σε αυτή την περίπτωση, η προφόρτιση διεξάγεται σε μία ηλεκτρονική βάση, κάνοντας τον ένα κινητήρα να λειτουργεί ενάντια στον άλλο (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4. 9 –Κίνηση με βέργα και τροχό με μηχανική προφόρτιση (RedexAndantex).



Σχήμα 4. 10 – Ανακατανομή του φορτίου μεταξύ των τροχών με 100% μηχανική προφόρτιση.



Σχήμα 4. 11 – Οδήγηση συστήματος ράβδου και τροχού με ηλεκτρική προφόρτιση (RedexAndantex).

Αυτή η λύση μας επιτρέπει να απλοποιήσουμε την μηχανική του συστήματος κίνησης, στο κόστος μεγαλύτερης πολυπλοκότητας για τον έλεγχο. Ένα πλεονέκτημα της προφόρτισης μέσω δύο ανεξάρτητων κινητήρων είναι η πιθανότητα του να λειτουργήσουν οι δύο κινητήρες στην ίδια κατεύθυνση, σε περίπτωση που είναι απαραίτητο, για παράδειγμα, στην επιτάχυνση. Είναι σύνηθες να διαμορφώσουμε την προφόρτιση μεταξύ 25% και 50% της μέγιστης ισχύος που παρέχεται από το σύστημα κίνησης.

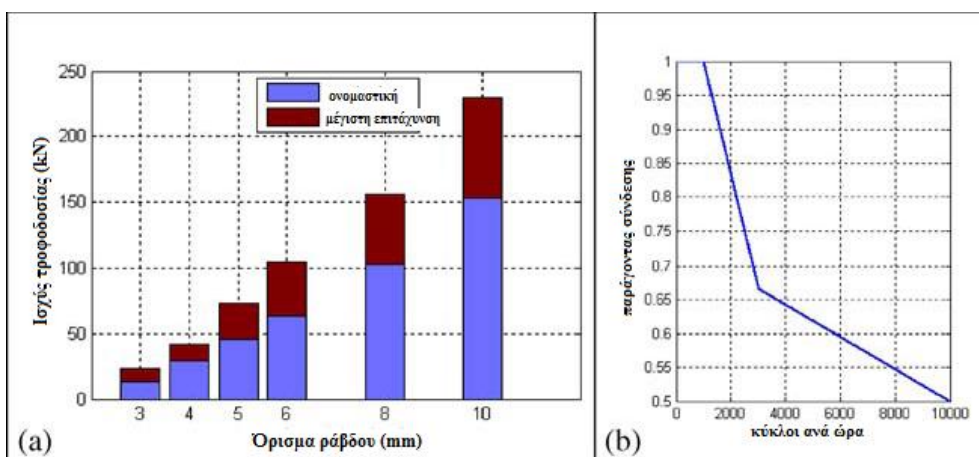
### 4.3.2 Διαστασιολόγηση

Η επιτρεπόμενη ισχύς που μεταδίδεται από την κίνηση ράβδου και τροχού, εξαρτάται βασικά από το μέτρο ελαστικότητας των δοντιών. Σε ένα μικρότερο βαθμό, εξαρτάται επίσης από τα δόντια του τροχού, το βήμα της γωνίας (ευθείς ή ελικοειδείς τροχοί με μία γωνία των 19°, 31', 42'') και το ποσοστό μείωσης που παρέχεται από τον μειωτήρα. Το σχήμα 4.12 δείχνει συγκεκριμένες τιμές αναπαράστασης της επιτρεπόμενης ισχύος για κάθε τροχό.

Η διαστασιολόγηση της κίνησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας όπως και τις διαλείπουσες συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, κάθε τροχός πρέπει να υπολογίζεται ξεχωριστά, θεωρώντας τις παρούσες δυνάμεις σύμφωνα με την ισχύ που απαιτείται από το σύστημα κίνησης και την ισχύ προφόρτισης.

Οι τιμές ονομαστικής ισχύος που φαίνονται στο σχήμα 4.12 εκτιμώνται να φτάνουν μία διάρκεια ζωής περίπου 15,000-20,000 ωρών λειτουργίας. Αυτές οι τιμές ονομαστικής ισχύος πρέπει να συγκρίνονται με την ισοδύναμη μέση ισχύ πάνω στον τροχό, που υπολογίζεται ως:

$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 q_1 \frac{n_1}{n_m} + F_2^3 q_2 \frac{n_2}{n_m} + \dots + F_n^3 q_n \frac{n_n}{n_m}} \text{ (N)} \quad (4.4)$$



Σχήμα 4. 12 – α) Μέγιστη λειτουργία φόρτισης του ορίσματος. β) Παράγοντας διόρθωσης ανά κύκλους.

Από την άλλη πλευρά, οι διαλείπουσες συνθήκες λειτουργίας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις μέγιστες απαιτούμενες δυνάμεις και τον αριθμό των κύκλων ανά ώρα. Στις εφαρμογές των εργαλειομηχανών, είναι σύνηθες να απαιτείται η μέγιστη κίνηση κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της ολίσθησης. Η απαιτούμενη ισχύς κίνησης κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης πρέπει να είναι μικρότερη από τις δυνάμεις κορυφής που δηλώνονται στο σχήμα 4.12. Επιπλέον, αν ο αριθμός των κύκλων ανά ώρα είναι υψηλός, οι επιτρεπόμενες δυνάμεις μειώνονται σύμφωνα με τον παράγοντα διόρθωσης που φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

Στην απουσία περισσότερων πληροφοριών όσον αφορά στις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί η μηχανή, μπορεί να εκτιμηθεί πως η μηχανή θα επιταχύνει στην μέγιστη χωρητικότητα για 20-30% του συνολικού χρόνου, με τον χρόνο επιτάχυνσης να εκτιμάται όπως στην Εξίσωση 4.5.

$$t_a = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} \quad (4.5)$$

Ο αριθμός των κύκλων ανά ώρα είναι:

$$\frac{\text{cycles}}{\text{hour}} = \frac{20}{100} \cdot \frac{3600}{t_a} \quad (4.6)$$

### 4.3.3 Δυναμικά Μοντέλα των Κινήσεων

Όπως στην περίπτωση των περιστροφικών κοχλιών κίνησης, έτσι και στην κίνηση μέσω ράβδου και τροχού, η πιθανότητα εκτίμησης των δυναμικών χαρακτηριστικών της κίνησης στην φάση σχεδιασμού είναι ιδιαίτερης σημασίας. Τα δυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για αυτό είναι παρόμοια με εκείνα που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.2.1.

## 4.4 Γραμμικές Κινήσεις από Γραμμικούς Κινητήρες

Σήμερα, ακόμη ένας σημαντικός τύπος κίνησης για την ολίσθηση εργαλειομηχανών είναι ο γραμμικός κινητήρας (Σχήμα 4.13). Ο τύπος του γραμμικού κινητήρα ο οποίος επιβάλλεται στις εφαρμογές εργαλειομηχανών, είναι ο σύγχρονος γραμμικός κινητήρας με πυρήνα σιδήρου.

Αυτός αποτελείται από ένα πηνίο ολίσθησης ή αλλιώς πρωτεύον και μαγνητικές πλάκες ή δευτερεύον, και τα δύο σε μία γραμμική βάση. Το ένα από αυτά είναι σταθερό στο κινητό μέρος και το άλλο στο σταθερό μέρος.



Σχήμα 4. 13 – Γραμμικός κινητήρας σειράς 1FN από τη Siemens.

Το κύριο χαρακτηριστικό του γραμμικού κινητήρα είναι η απουσία μηχανικών στοιχείων μετάδοσης της κίνησης και/ή της ισχύος. Για να εξαλειφθούν αυτά τα μηχανικά στοιχεία, η φθορά, τα κενά, οι απαιτήσεις λίπανσης και θορύβου εξαλείφονται επίσης. Ακόμη ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η απουσία ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος κίνησης. Ωστόσο, ταυτόχρονα, χάνεται το μηχανικό πλεονέκτημα, όπως η ισχύς που παράγεται από τον κινητήρα είναι άμεσα η ισχύς που ασκείται στην ολίσθηση, και δεν υπάρχουν ειδικές συνθήκες που να μπορεί να γίνει υψηλότερη.

Στην πράξη, ο γραμμικός κινητήρας αποτελεί μία ενδιαφέρουσα επιλογή δεδομένου ότι οι δυνάμεις της διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας δεν είναι αξιοσημείωτες, και απαιτούνται υψηλά δυναμικά. Δηλαδή, όταν μία υψηλή επιτάχυνση ουσιαστικά αυξάνει την παραγωγικότητα της μηχανής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ακονιστηριού.

Όπως έχει δηλωθεί, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των γραμμικών κινητήρων είναι η αδυναμία πολλαπλασιασμού της παραγόμενης δύναμης. Συνεπώς, απαιτείται μία μεγάλη ποσότητα μαγνητικού υλικού και περιέλιξης για να παρέχει επαρκή δύναμη για να τα χρησιμοποιήσει ως συστήματα κίνησης ολίσθησης των εργαλειομηχανών. Από τη μία, αυτή η ποσότητα μαγνητικού υλικού αυξάνει σημαντικά την τιμή του συστήματος κίνησης, και από την άλλη, ο γραμμικός κινητήρας είναι λιγότερο αποδοτικός από έναν συμβατικό κινητήρα που χρησιμοποιείται με οποιοδήποτε είδος μειωτήρα, συγκεκριμένα λόγω των απωλειών Joule.

Από την άλλη πλευρά, όπως έχει αναφερθεί, οι γραμμικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές, παρέχονται με σιδηροπύρνα πηνία. Συνεπώς, οι μαγνητικές πλάκες ασκούν μία δύναμη έλξης επί του πηνίου σε συνεχόμενη βάση. Αυτή η δύναμη έλξης είναι λίγο ή πολύ σταθερή και εξαρτάται λίγο από την δύναμη που παράγει ο κινητήρας σε μία στιγμιαία βάση. Η δύναμη της έλξης είναι περίπου τρεις φορές η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παρέχει ο κινητήρας, δηλαδή, για έναν κινητήρα 6,000N της μέγιστης δύναμης; η δύναμη της έλξης είναι στα 2Τn. Αυτό το σημείο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την κατάλληλη διαστασιολόγηση της οδήγησης της ολίσθησης οδηγείται από τον γραμμικό κινητήρα.

Όταν χρησιμοποιείται ένας γραμμικός κινητήρας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο θερμικός παράγοντας. Η θερμότητα που παράγεται από έναν γραμμικό κινητήρα είναι αξιοσημείωτη, έτσι ώστε να είναι απαραίτητο να διεξάγει μία μελέτη για τον καθορισμό της επίδρασης που η θερμότητα αυτή μπορεί να παράγει, για παράδειγμα, διαστολή, και αποτίμηση της ανάγκης ψύξης του κινητήρα.

Η ονομαστική ισχύς που μπορεί να παρέχει ένας γραμμικός κινητήρας εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στο σύστημα ψύξης που χρησιμοποιείται. Σαν τιμή αναφοράς, μπορεί να θεωρηθεί πως για έναν κινητήρα που ψύχεται υπό τη μορφή φυσικής μεταγωγής, η ονομαστική ισχύς είναι περίπου 20% της μέγιστης ισχύος. Αυτή η τιμή μπορεί να αυξηθεί έως 40% αν το νερό ψυχθεί.

Η τροφοδοσία των γραμμικών κινητήρων για τις εργαλειομηχανές, καλύπτει από 300N μέγιστης ισχύος έως γύρω στα 20 kN.

$$F_m = \sqrt{F_1^2 q_1 \frac{n_1}{n_m} + F_2^2 q_2 \frac{n_2}{n_m} + \dots + F_n^2 q_n \frac{n_n}{n_m}} \text{ (N)} \quad (4.7)$$

Η ταχύτητα που μπορεί να αγγίξει ένα σύστημα κίνησης με έναν γραμμικό κινητήρα, είναι συγκρίσιμη ή υψηλότερη από την ταχύτητα που παρέχεται από τα συστήματα ράβδου και τροχού. Είναι σύνηθες να αγγίζουν τα 300m/min στην περίπτωση κινητήρων μεσαίου μεγέθους, έως 5,000N κορυφή ισχύος, και 150-200m/min στην περίπτωση μεγαλύτερων κινητήρων.

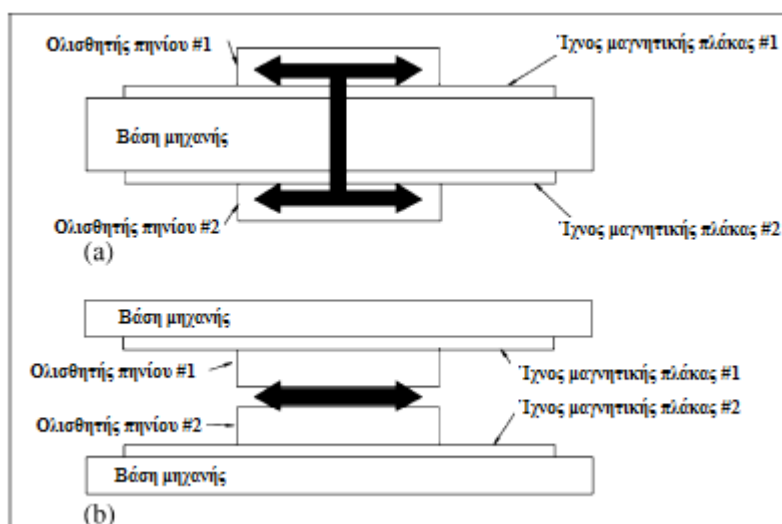
#### 4.4.1 Στήριξη

Οι ανοχές στήριξης των γραμμικών κινητήρων δεν είναι τόσο περιορισμένες όσο εκείνες που είναι απαραίτητες για την σωστή ευθυγράμμιση των κοχλιών ή των ράβδων. Παρ' όλα αυτά, το κενό μεταξύ του πηνίου και των μαγνητών πρέπει να διατηρείται μεταξύ μερικών δεκάτων ενός χιλιοστού. Η επαρκής ακαμψία της ολίσθησης όπως και του συστήματος οδήγησης, πρέπει να εγγυάται, ώστε να μην υπάρχει παραμόρφωση σε περίπτωση ισχυρής δύναμης έλξης μεταξύ των μαγνητών και του πηνίου.

#### 4.4.2 Διαμορφώσεις

Όταν χρησιμοποιείται ένας γραμμικός κινητήρας, το πηνίο μπορεί να χρησιμοποιείται ως ένα κινούμενο εξάρτημα και οι μαγνήτες ως ένα στατικό εξάρτημα ή το αντίθετο (δείτε [Σχήμα 4.14](#)). Κάθε διαμόρφωση έχει τα πλεονεκτήματά της.

Όταν το πηνίο κινείται, πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέθοδος μεταφοράς των καλωδίων τροφοδοσίας και των γραμμών ψύξης μέχρι το πηνίο. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να παρουσιαστεί το πρόβλημα της προσβασιμότητας στο πηνίο κάτω από την κινητή ολίσθηση. Στην περίπτωση κίνησης των μαγνητών, τα καλώδια και οι γραμμές θα είναι στο σταθερό σημείο, διευκολύνοντας την εγκατάστασή τους. Επιπλέον, οι μαγνήτες τείνουν να ζυγίζουν λιγότερο από το πηνίο, συνεπώς κερδίζοντας κάποια επιτάχυνση. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της λύσης είναι πως το μήκος στο οποίο οι μαγνήτες πρέπει να εγκατασταθούν, είναι μεγαλύτερο. Η ολίσθηση πρέπει να έχει αυτό το μήκος για να εγκαταστήσει τους μαγνήτες. Μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική είναι να υπάρχουν δύο γραμμικοί κινητήρες, έτσι ώστε οι δυνάμεις έλξης να ακυρώνονται αμοιβαία. Αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον όταν σχεδιάζεται μία μηχανή η οποία πρέπει να είναι ελαφριά. Δύο πιθανές συμμετρικές ρυθμίσεις οι οποίες ακυρώνουν τις δυνάμεις έλξης φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 4. 14 – Διαμορφώσεις με γραμμικούς κινητήρες. α) Κινητό πηνίο, β) Κινητοί μαγνήτες (από Fanuc).

## 4.5 Περιστροφικά Συστήματα Κίνησης

Η τάση των απαιτήσεων που ορίζονται για τις περιστροφικές τράπεζες είναι παρόμοια με εκείνη που απαιτείται για τις γραμμικές ολισθήσεις. Μία γρήγορη δυναμική είναι επιθυμητή με μία υψηλή ακρίβεια τοποθέτησης και παρεμβολής.

Ανάλογα με την διαδικασία για την οποία σχεδιάζεται η περιστροφική τράπεζα, οι προδιαγραφές ταχύτητας και ισχύος μπορεί να είναι διαφορετικές. Στην περίπτωση τραπεζών για τόνους, η μέγιστη ταχύτητα και τα επιτρεπόμενα ζεύγη παρέχουν μεγαλύτερο βάρος από τα υψηλά δυναμικά και η ακρίβεια. Η περίπτωση διαφέρει όταν υπάρχουν τράπεζες φραιζαρίσματος πέντε αξόνων.

Στην περίπτωση περιστροφικών τραπεζών, διαχωρίζονται δύο μεγάλες ομάδες συστημάτων κίνησης. Από την μία, είναι τα συστήματα κίνησης μηχανικής μετάδοσης και από την άλλη, άμεσα συστήματα κίνησης.

### 4.5.1 Μηχανικές Μεταδόσεις

Δύο από τις πιο συνηθισμένες μηχανικές μεταδόσεις για τα περιστροφικά συστήματα κίνησης είναι ατέρμονου-κοχλία και οδοντοτροχού.

#### 4.5.1.1 Μετάδοση Ατέρμονου Κοχλία

Μία πιθανότητα είναι η μετάδοση ατέρμονου κοχλία. Αυτός ο τύπος μετάδοσης παρέχει πολύ μεγάλη μείωση, υψηλή χωρητικότητα μετάδοσης ισχύος και αρκετά μειωμένη φθορά. Η κύρια δυσκολία, επιπρόσθετη με την κοπή των δοντιών, συνίσταται στην εξάλειψη του κενού. Υπάρχουν διαφορετικές δυνατότητες για αυτό. Είναι δυνατόν να κοπεί ο ατέρμονος κοχλίας έτσι ώστε το βήμα (απόσταση) να είναι μεταβλητή, ώστε μετακινώντας το αξονικά μπορεί να εξαλείψει το κενό μέχρι το επιθυμητό επίπεδο. Η φθορά που προκαλείται από την χρήση μπορεί να εξαλειφθεί με τον ίδιο τρόπο. Μία άλλη επιλογή για την εξάλειψη του κενού συνίσταται στην χρησιμοποίηση ενός διαιρεμένου ατέρμονου κοχλία, προφορτισμένου με ένα ελατήριο ενάντια στα δόντια του κοχλία.

#### 4.5.1.2 Μετάδοση Οδοντοτροχού

Μία άλλη επιλογή οδήγησης των περιστροφικών τραπεζών συνίσταται στην χρησιμοποίηση δύο οδοντωτών τροχών, οι οποίοι ενεργούν πάνω στον κοχλία (γρανάζι). Το κενό

εξαλείφεται κατά έναν παρόμοιο τρόπο με αυτό στην οδήγηση της κίνησης με οδοντωτή ράβδο και τροχό, προφορτίζοντας τους τροχούς μέσω μηχανικών τρόπων ή αλλιώς χρησιμοποιώντας δύο κινητήρες.

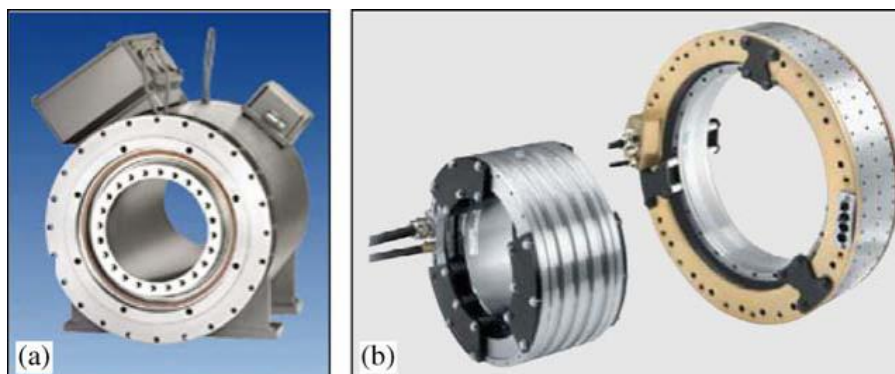
#### 4.5.2 Άμεσα Περιστρεφόμενα Συστήματα Κίνησης

Στις μέρες μας, το σύστημα κίνησης που παρέχει την καλύτερη δυναμική απόδοση για τις περιστροφικές τράπεζες είναι ο άμεσος κινητήρας (απ' ευθείας κίνηση) (Σχήμα 4.15). Επιπλέον, δεν υπάρχουν κενά ή φθορά.

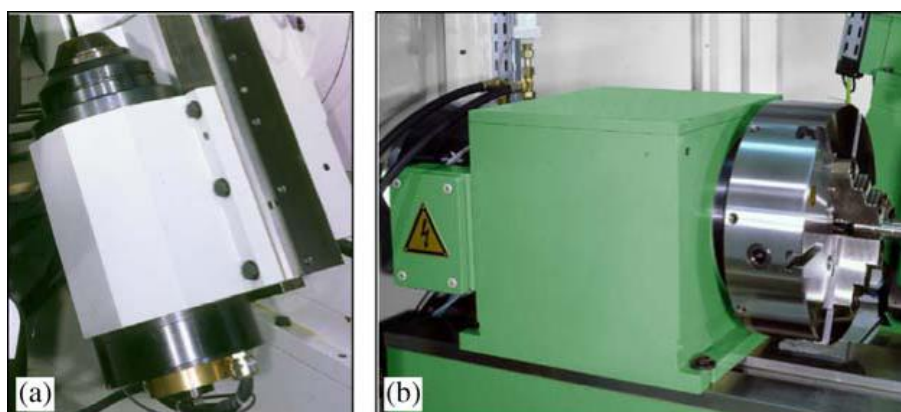
Όπως συμβαίνει και στους γραμμικούς κινητήρες, στην περίπτωση αυτή η προσοχή θα εστιαστεί στον θερμικό παράγοντα. Φυσιολογικά, είναι απαραίτητο να εφοδιαστεί νερό ψύξης στους κινητήρες ροπής.

Οι κινητήρες ροπής τροφοδοτούνται σε δύο μορφές. Από τη μία, υπάρχουν ολοκληρωμένοι κινητήρες, στους οποίους ο άξονας εξόδου τείνει να είναι κοίλος. Από την άλλη, για να μπορεί να παρέχει μία πιο συμπαγή λύση και καλύτερη αναβάθμιση στο προϊόν που είναι σχεδιασμένο από τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής, οι προμηθευτές κινητήρων ροπής προσφέρουν επίσης τον κινητήρα σε δύο μονάδες, τον ρότορα και τον στάτορα.

Η σημερινή τροφοδοσία των κινητήρων ροπής παρέχει βαθμολογημένες ροπές έως περίπου 5,000Nm και ένα φάσμα ταχυτήτων από 200rpm έως 1,000 rpm. Η κορυφή της ροπής τείνει να είναι στην εγγύτητα του 80% πιο υψηλή από την βαθμολογία.



Σχήμα 4. 15 – α) Ολοκληρωμένοι κινητήρες ροπής. β) Ενσωματωμένοι κινητήρες ροπής (Siemens).



Σχήμα 4. 16 – Συστήματα κίνησης άμεσης περιστροφής σε μηχανές λείανσης. α) Λείανση κοχλία (γρاناζιού). β) λείανση σφαιρικού κοχλία (Doimak).

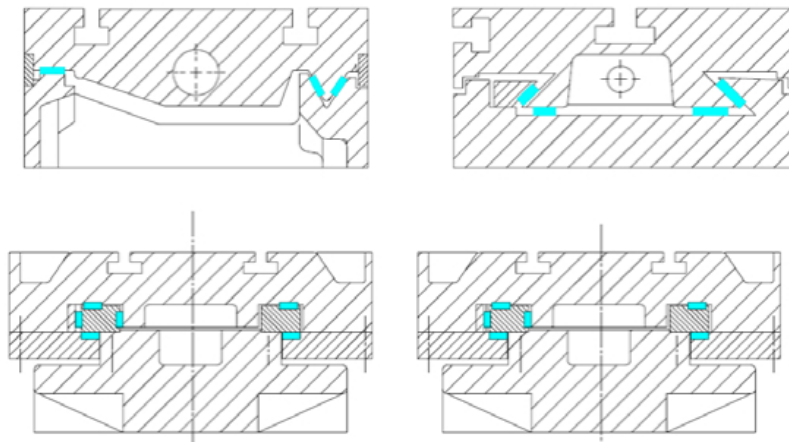
## 4.6 Συστήματα Μετάδοσης της Κίνησης

Τα συστήματα μετάδοσης της κίνησης, καθορίζουν την λειτουργία ολισθήσεων της εργαλειομηχανής. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές εργαλειομηχανών περιγράφονται παρακάτω.

Ιστορικά, ο τύπος οδήγησης που χρησιμοποιούνταν συνήθως ήταν η τριβή. Κανονικά, ο κατασκευαστής της μηχανής κατασκευάζει επίσης το σύστημα κίνησης. Σήμερα, η οδήγηση που βασίζεται στον κύλινδρο έχει γίνει πολύ δημοφιλής, χάρη στην υψηλή ποιότητα και απόδοση που παρέχουν τα εμπορικά στοιχεία, και λόγω του γεγονότος πως ο κατασκευαστής μπορεί να τα αναβαθμίσει μέσα στην μηχανή του. Από την άλλη πλευρά, για πολύ απαιτητικές εφαρμογές όσον αφορά στην ακρίβεια και στην ακαμψία, η υδροστατική οδήγηση ήταν και συνεχίζει να είναι η καλύτερη επιλογή από τεχνικής απόψεως.

### 4.6.1 Οδηγοί Τριβής

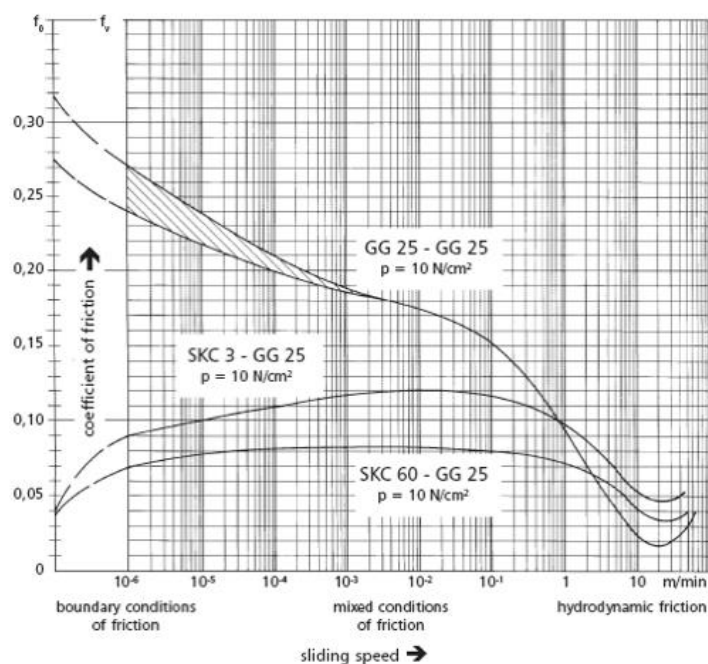
Ο οδηγός τριβής (Σχήμα 4.17) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος οδήγησης της κίνησης στις εφαρμογές εργαλειομηχανών.



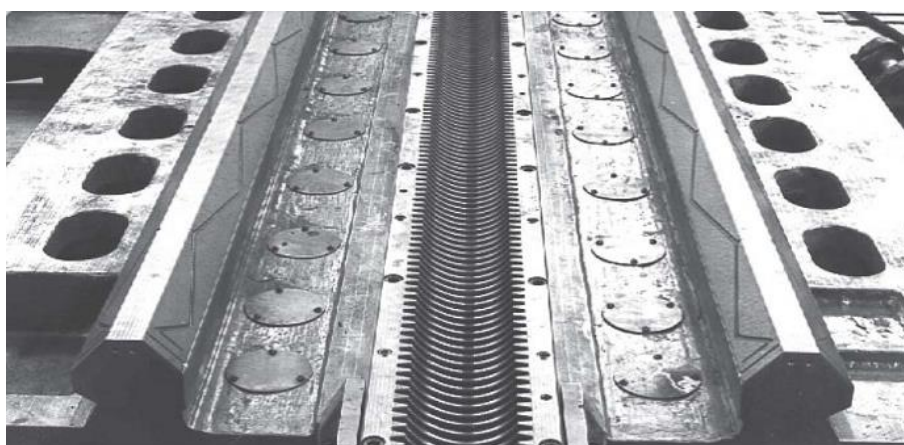
Σχήμα 4. 17 – Διαφορετικές διαμορφώσεις οδηγών τριβής (από BusakShamban).

#### 4.6.1.1 Υλικά

Διαφορετικά ζεύγη υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν οι οδηγοί τριβής. Χύτευση, ατσάλι, χαλκός και συγκεκριμένα πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί ως υλικά ολίσθησης. Ένας παράγοντας κλειδί που εξασφαλίζει τον έλεγχο και την ομαλή λειτουργία της οδήγησης, είναι να αποφευχθεί το φαινόμενο κόλλησης-ολίσθησης (stick-slip), το οποίο εμφανίζεται όταν ο συντελεστής στατικής τριβής είναι υψηλότερος από τον συντελεστή δυναμικής τριβής (δείτε Σχήμα 4.18).



Σχήμα 4. 18 – Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς τριβής, από SKC.



Σχήμα 4. 19 – Επικαλυμμένες διαδρομές και ατέρμονη ράβδος σε μία τράπεζα μηχανής φραιζαρίσματος (από SKC).

Η ανάπτυξη πολυμερών υλικών με πρόσθετα τα οποία χρίζουν λίπανσης, για παράδειγμα τα TurciteSlideway ή SKC (δείτε Σχήμα 4.19), ή Moglice, έχουν επιτρέψει σε ένα μεγάλο ποσοστό την μείωση του φαινομένου κόλλησης-ολίσθησης.

#### 4.6.1.2 Η Ικανότητα Φόρτισης και Απόσβεσης

Μεταξύ των ευνοϊκών χαρακτηριστικών των οδηγών τριβής είναι και η υψηλή ικανότητα φόρτισης που παρέχουν, έως 140MPa, η δύναμη ενάντια στην σύγκρουση και η ικανότητα να παρέχουν αξιοσημείωτη απόσβεση. Από την άλλη πλευρά, η χρήση τους θα είναι περιορισμένη στις ολισθήσεις με σχετικά χαμηλές ταχύτητες, κάτω από 0.5m/s.

#### 4.6.1.3 Η Κατασκευή

Για να επιτευχθεί μία καλή ποιότητα τριβής οδήγησης, είναι απαραίτητο να λειτουργήσουν οι διαδρομές ολίσθησης για να εξασφαλιστεί μία ομοιόμορφη επαφή της πλάκας έδρασης και της ολίσθησης. Αυτή η λειτουργία φινιρίσματος, η απόξεση, απαιτεί υψηλή εμπειρία εργασίας. Επιπρόσθετα στην εγγύηση μίας ομοιόμορφης επαφής, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διεξαγωγή μίας σειράς σημαδιών πάνω στην επιφάνεια, ώστε η επαφή να παράγεται σε πλήθος μικρών προβολών. Κατά αυτό τον τρόπο, τα προβλήματα πρόσφυσης

αποφεύγονται όταν ταιριάζονται κατοπτρικές επιφάνειες, με αυτές να είναι πιο σημαντικές όταν η ολίσθηση είναι σε χαμηλές ταχύτητες.

Είναι απαραίτητο η λίπανση να χρησιμοποιείται για να ευνοήσει μία ομαλή κίνηση. Για αυτό τον σκοπό, προετοιμάζονται οι υποδοχές σε εγγύτητα ενός χιλιομέτρου βάθους σε μία από τις επιφάνειες. Για τον εξαναγκασμό της κίνησης και της κατανομής του λιπαντικού, είναι συνετό οι υποδοχές να είναι στο κινούμενο μέρος.

Η εφαρμογή του υλικού πολυμερούς βάσης, μπορεί να διεξαχθεί με πολλούς τρόπους. Ο πιο κλασικός έγκειται στο δέσιμο μίας επίστρωσης πολυμερούς με πάχος μερικών χιλιοστών πάνω σε ένα από τα μέρη, επεξεργάζοντάς το μόλις ο δεσμός οριστεί, ώστε να διορθωθούν τα ελαττώματα. Η επιφάνεια με τις ολισθήσεις πάνω στο πολυμερές πρέπει να ζεσταθεί ελαφρώς, για παράδειγμα, με επαγωγή, για να ελαχιστοποιηθεί η φθορά. Σήμερα, είναι πιο σύνηθες ο ψεκασμός του πολυμερούς σε μία υγρή κατάσταση, έτσι ώστε όταν βουλκανιστεί να υιοθετεί το σχήμα του συστήματος κίνησης που κατασκευάστηκε. Για αυτό, η επιφάνεια η οποία θα λάβει το πολυμερές, προετοιμάζεται με το φινίρισμα μίας πολύ τραχιάς επιφάνειας για να ευνοήσει την πρόσφυση, και επίσης παρέχεται με οπές ψεκασμού. Η πλάκα έδρασης και η ολίσθηση ταιριάζονται, διατηρώντας τον χώρο που το πολυμερές υλικό θα καταλάβει μεταξύ τους. Όταν το ψεκασμένο υλικό βουλκανιστεί, γενικά μετά από 24 ώρες, η πλάκα έδρασης και η ολίσθηση χωρίζονται και οι επιφάνειες φινιρίζονται.

#### **4.6.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί**

Επί του παρόντος, οι οδηγοί με βάση τους κυλίνδρους είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένοι στις εφαρμογές εργαλειομηχανών. Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία από μοντέλα και μεγέθη, τα οποία προσαρμόζονται στις περισσότερες απαιτήσεις των εργαλειομηχανών.

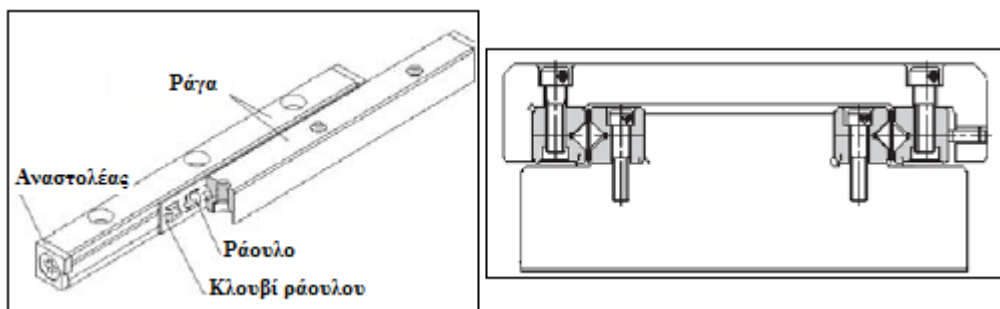
Μπορούν να διακριθούν δύο μεγάλες οικογένειες κυλινδρικών οδηγών. Από τη μία πλευρά, υπάρχουν εκείνοι χωρίς επανακυκλοφορία, και από την άλλη, υπάρχουν οδηγοί με επανακυκλοφορία.

##### **4.6.2.1 Γραμμικά Έδρανα χωρίς Επανακυκλοφορία**

Οι κυλινδρικοί οδηγοί χωρίς επανακυκλοφορία (Εικόνες 4.20 και 4.21) τείνουν να χρησιμοποιούνται όταν η διαδρομή της ολίσθησης είναι σχετικά μικρή. Βασικά αποτελούνται από κυλινδρικά στοιχεία, σφαίρες, κυλίνδρους ή βελόνες, που είναι τοποθετημένα μεταξύ των κινούμενων τμημάτων. Γενικά, χρησιμοποιείται ένα κλουβί για να αποτρέψει την επαφή μεταξύ των διαφορετικών κυλινδρικών στοιχείων και για να χειριστεί την συναρμολόγηση με μεγαλύτερη ευκολία.

Τα δυνατά σημεία αυτού του τύπου οδήγησης είναι η πολύ υψηλή ακαμψία και η χωρητικότητα του φορτίου, λόγω του υψηλού αριθμού των κυλινδρικών στοιχείων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και της υψηλής ακρίβειας στην κίνηση.

Για την οδήγηση μίας ολίσθησης, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση τουλάχιστον δύο οδηγών, ώστε να περιοριστούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας εκτός από εκείνους της κίνησης. Η προφόρτιση επιτυγχάνεται κάνοντας τον έναν οδηγό να λειτουργήσει ενάντια στον άλλο; για παράδειγμα, όσον αφορά στους κοχλίες που στηρίζονται απευθείας πάνω στην ράγα ή πάνω σε έναν ενδιάμεσο βραχίονα, ο οποίος κατανέμει την ισχύ πάνω σε μία πιο ομοιόμορφη βάση, προκαλώντας μικρές παραμορφώσεις της ράγας και βελτιώνοντας την ακρίβεια.



Σχήμα 4. 20 – Γραμμικά κυλινδρικά έδρανα χωρίς επανακυκλοφορία, από THK.



Σχήμα 4. 21 – Γραμμικά κυλινδρικά έδρανα χωρίς επανακυκλοφορία, από INA.

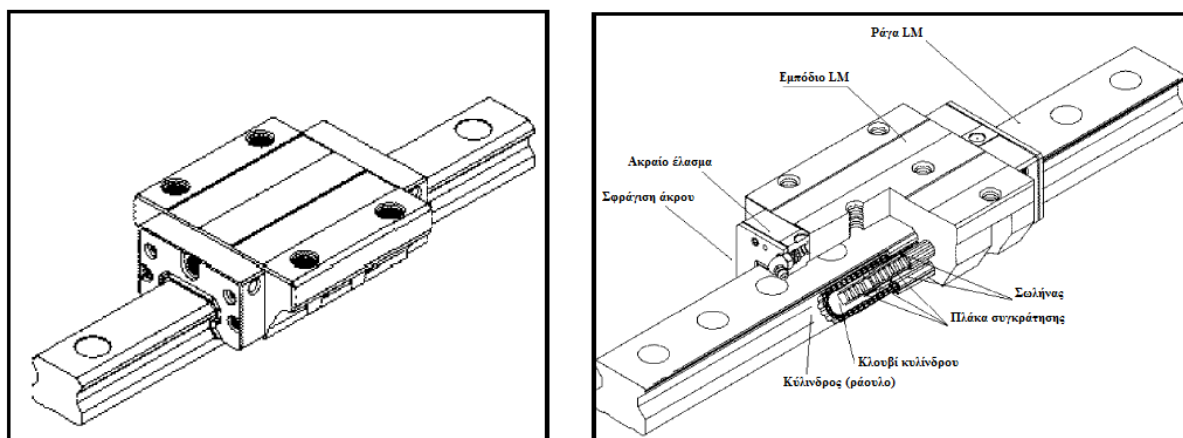
Κανονικά, η τροφοδοσία της οδήγησης αυτού του τύπου συμπεριλαμβάνει τις βέργες οδήγησης. Μερικές φορές, λόγω της έλλειψης διαθεσιμότητας χώρου, για παράδειγμα, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένα στοιχείο της μηχανής σαν κυλινδρομεταφορέας. Στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητο να σκληρύνουμε αυτή την περιοχή για να αποφύγουμε την φθορά.

#### 4.6.2.2 Κυλινδρικοί Οδηγοί Επανακυκλοφορίας

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν τα κυλινδρικά συστήματα επανακυκλοφορίας (Σχήμα 4.22). Αυτά αποτελούνται από ένα πέλμα, μέσα στο οποίο τα κυλινδρικά στοιχεία, οι σφαίρες ή τα ράουλα επανακυκλοφορούν, καθώς κινούνται κατά μήκος μίας ράγας οδήγησης.

Η ράγα οδήγησης έχει τουλάχιστον τέσσερις κυλινδρομεταφορείς, έτσι ώστε κάθε πέλμα να περιορίζει όλους τους βαθμούς ελευθερίας εκτός από εκείνους της κίνησης. Στην περίπτωση αυτή, η προφόρτιση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κυλινδρικά στοιχεία μίας ελαφρώς υπερμεγέθους διαμέτρου. Γενικά, ο κατασκευαστής προσφέρει το ίδιο προϊόν με διαφορετικούς βαθμούς προφόρτισης.

Επί του παρόντος, οι κατασκευαστές κυλινδρικών οδηγών επανακυκλοφορίας έχουν εξασφαλίσει σχεδιασμούς με χωρητικότητες υψηλής φόρτισης ενάντια στις δυνάμεις εγκάρσια στην κίνηση όπως και ενάντια στις ροπές. Για να αναφερθούμε στο μέγεθος του οδηγού, η τάση είναι να χρησιμοποιηθεί το πλάτος της ράγας σε mm, με διαθέσιμες ράγες μεγέθους από 15 έως 65 ή και ακόμη μεγαλύτερες. Οι χωρητικότητες φόρτισης μίας οικογένειας οδηγού από τον κατασκευαστή THK δηλώνονται στον Πίνακα 4.4.



Σχήμα 4. 22 – Μοντέλο κυλινδρικού οδηγού επανακυκλοφορίας, από ΤΗΚ.

**Πίνακας 4.4 – Χωρητικότητα φόρτισης των συστημάτων οδήγησης ΤΗΚ.**

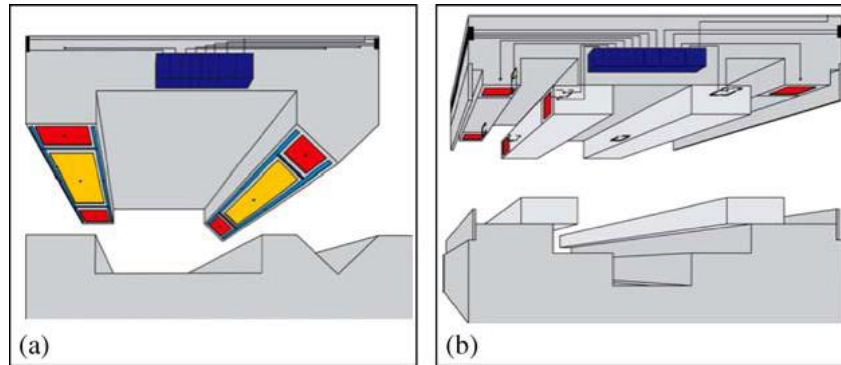
Αρ. Μοντέλου	Εξωτερικές διαμέτροι			Βασικό ποσοστό φόρτισης	
	Υψος	Πλάτος	Μήκος	Αξονική, αντίστροφα αξονική και πλευρική	
	Υ	Π	Μ	Δυναμική αναλογία	Στατική αναλογία
	mm	mm	mm	C kN	C0 kN
SHS 15 V	24.0	34.0	64.4	14.2	24.2
SHS 20 V	30.0	44.0	79.0	22.3	38.4
SHS 25 V	36.0	48.0	92.0	31.7	52.4
SHS 30 V	42.0	60.0	106.0	44.8	66.6
SHS 35 V	48.0	70.0	122.0	62.3	96.6
SHS 45 V	60.0	86.0	140.0	82.8	126.0
SHS 55 V	70.0	100.0	171.0	128.0	197.0
SHS 65 V	90.0	126.0	221.0	205.0	320.0

Η προφόρτιση είναι απαραίτητη για να εξαλείψει τα κενά. Επιπλέον, αυξάνει την ακαμψία των πελμάτων. Μία μέση προφόρτιση μπορεί να αυξήσει την ακαμψία του πέλματος από έναν συντελεστή τριών, όσον αφορά σε ένα πέλμα το οποίο δεν είναι προφορτισμένο, και το κάνει να είναι λιγότερο εξαρτημένο στο εφαρμοζόμενο πεδίο.

Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα μίας υψηλής προφόρτισης, αφορούν στην αύξηση της τριβής και την μείωση της χρήσιμης ζωής του συστήματος οδήγησης.

#### 4.6.3 Υδροστατικοί Οδηγοί

Στην περίπτωση των υδροστατικών εδράνων (Σχήμα 4.23 και Σχήμα 1.16 στο Κεφάλαιο 1), οι επιφάνειες των στοιχείων που ολισθαίνουν διαχωρίζονται από ένα λεπτό έλασμα λαδιού. Η πίεση που διατηρείται από το έλασμα λαδιού παρέχεται από μία εξωτερική αντλία. Με τον τρόπο αυτό, εγγυάται η λειτουργία χωρίς φθορά, και χωρίς την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου κόλλησης-ολίσθησης, χάρη στο γεγονός πως το έδρανο δεν παρουσιάζει καμία στατική τριβή.



Σχήμα 4. 23 – α) Υδροστατικός επίπεδος οδηγός V. β) Υδροστατικός οδηγός με περιτύλιξη (Hydrostatik).

Μία από τις επιφάνειες παρέχεται με τις κοιλότητες ή τα κελιά, και είναι γνωστή ως «κελιά λαδιού», τα οποία παρέχονται με συμπιεσμένο λάδι από εξωτερικά. Γύρω από αυτά τα κελιά υπάρχει η περιοχή μέσω της οποίας απελευθερώνεται το λάδι καθώς χάνει πίεση. Αυτή η περιοχή είναι γνωστή ως «μεταβατική περιοχή» (land). Η απόσταση μεταξύ της μεταβατικής περιοχής και της επιφάνειας στην οποία ολισθαίνει, είναι το «κενό λαδιού». Συνήθως, είναι 10 έως 40 μικρά, και παράγει μία συγκεκριμένη αντίσταση στο πέρασμα του υγρού. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της κοιλότητας και της ατμοσφαιρικής πίεσης, η οποία ενεργεί εξωτερικά, είναι γνωστή ως «πίεση κελιού».

Η αντίσταση της ροής του λαδιού κατά μήκος του κενού μπορεί να εκτιμηθεί ως ακολούθως:

$$R_c = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{12 \cdot \eta \cdot L}{b \cdot h^3} \quad (4.8)$$

Η σταδιακή πίεση κατά μήκος της μεταβατικής περιοχής μπορεί να υποτεθεί πως είναι γραμμική σε μία αρχική προσέγγιση, όπως εκείνη για σκοπούς ισχύος μπορεί να υποτεθεί πως η πίεση ενεργεί στο μισό του μήκους της μεταβατικής περιοχής. Η περιοχή πάνω στην οποία υποτίθεται πως ενεργεί η ολοκληρωμένη πίεση, είναι γνωστή ως αποδοτική περιοχή ( $A_{eff}$ ).

Οι υδροστατικοί οδηγοί σχεδιάζονται με πολλά κελιά, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν έκκεντρες δυνάμεις και ροπές. Κάθε κελί πρέπει να τροφοδοτείται σε διαφορετική πίεση, ώστε να μπορεί να αντέξει μία διαφορετική ισχύ σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας. Για αυτό, χρησιμοποιείται συνήθως μία μονή αντλία, με περιοριστές που επιτρέπουν την τροφοδότηση κάθε κελιού στην κατάλληλη πίεση.

Κατά τον τρόπο αυτό, η πίεση σε ένα κελί θα είναι:

$$P_c = P_p \cdot \frac{R_c}{R_k + R_c} \quad (4.9)$$

Συνήθως, οι περιοριστές δομούνται υπό τη μορφή τριχοειδών αγγείων, έτσι ώστε με τον τρόπο αυτό η αντίσταση να εξαρτάται από το ιξώδες λάδι, όπως συμβαίνει στα κελιά. Η αντίσταση στην ροή του λαδιού ενός τριχοειδούς αγγείου μπορεί να υπολογιστεί όπως παρακάτω:

$$R_k = \frac{8 \cdot \eta \cdot L_k}{\pi \cdot r_k^4} \quad (4.10)$$

Χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι τριχοειδών αγγείων. Οι κοντοί περιοριστές πρέπει να έχουν μία πολύ μικρή διάμετρο για να παρέχουν την απαραίτητη αντίσταση. Αυτή η διάμετρος είναι περιορισμένη από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στο λάδι,

τα οποία μπορούν να μπλοκάρουν τα τριχοειδή αγγεία. Η χρήση των κοντών τριχοειδών περιορίζεται επίσης επειδή ο σχεδιασμός είναι πολύ ευαίσθητος στην διάμετρο τους; η αντίσταση εξαρτάται από την τέταρτη ισχύ της διαμέτρου. Χρησιμοποιούνται επίσης τριχοειδή με μεγαλύτερες διαμέτρους και μακρύτερο μήκος, τα οποία τείνουν να είναι σε σπειροειδή μορφή.

Η κατάσταση του ισοζυγίου ενός κελιού ενάντια σε μία συγκεκριμένη ισχύ μπορεί να καθοριστεί. Από αυτή την κατάσταση ισοζυγίου, μπορούν να προσδιοριστούν η ακαμψία του συστήματος που σχηματίστηκε από την αντλία, ο περιοριστής και το κελί. Στην περίπτωση ενός κελιού που τροφοδοτείται μέσω ενός τριχοειδούς αγγείου υπό τη μορφή μίας αντλίας η οποία λειτουργεί σε συνεχή πίεση, η ακαμψία που δημιουργείται ως αποτέλεσμα είναι:

$$K = 3 \cdot \frac{P_0}{h_0} \cdot \frac{R_k}{R_k + R_{c0}} \quad (4.11)$$

Όπως φάνηκε στην προηγούμενη έκφραση, η ακαμψία εξαρτάται από το φορτίο που υποστηρίζεται από το κελί. Για τον λόγο αυτό, ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση υδροστατικών οδηγών με μία «πλάκα συγκράτησης» έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η υψηλή προφόρτιση. Επιπλέον, ο οδηγός μπορεί να απορροφήσει τα φορτία και στις δύο κατευθύνσεις.

#### 4.6.3.1 Η Απόσβεση

Οι υδροστατικοί οδηγοί παρέχουν πολύ υψηλότερες τιμές απόσβεσης από ότι οι οδηγοί με βάση τους κυλίνδρους ενάντια στις κάθετες κινήσεις στο κελί; Αυτό οφείλεται στην δύναμη τριβής που παρουσιάζει το έλασμα του λαδιού στην ολίσθηση. Στην περίπτωση των παράλληλων κινήσεων στο κελί, η απόσβεση μειώνεται επειδή δεν υπάρχει εκτόπισμα του υγρού.

#### 4.6.3.2 Η Κατανάλωση Ενέργειας

Η ενέργεια που καταναλώνεται από τον υδροστατικό οδηγό εξαρτάται, από την μία, στην εργασία που διεξάγεται λόγω της τριβής στην μεταβατική περιοχή, και από την άλλη, στην εργασία που διεξάγεται από την αντλία. Αυτή η ενέργεια μετασχηματίζεται ακέραια σε θερμότητα, η οποία αυξάνει την θερμοκρασία του λαδιού.

Η εργασία που διεξάγεται για να ξεπεραστεί η υδροδυναμική τριβή, μπορεί να καθοριστεί ως:

$$W_r = F_r \cdot v = A_r \cdot \eta \cdot \frac{v^2}{h} \quad (4.12)$$

Ενώ η εργασία που διεξάγεται από την αντλία είναι:

$$W_p = \frac{Q \cdot p_p}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

Η συνολική εργασία οδηγεί στην :

$$W_p = W_p + W_r = \left( \frac{p_p^2 \cdot b}{12 \cdot \varepsilon} \right) \cdot \frac{h^3}{L \cdot \eta} + (v^2 \cdot b) \cdot \frac{L \cdot \eta}{h} \quad (4.14)$$

Η διαστασιολόγηση ενός υδροστατικού οδηγού είναι σχετικά περίπλοκη λόγω την έντονης εξάρτησης που φαίνεται από τις μεταβλητές, οι οποίες καθορίζουν την κατάσταση για αυτόν. Μία πολύ σημαντική μεταβλητή είναι η αύξηση της θερμοκρασίας από το λάδι, σε ολόκληρο

το υδραυλικό κύκλωμα και η θερμοκρασία στους περιοριστές και στα κελιά ολόκληρου του υδροστατικού οδηγού. Το ιξώδες του λαδιού εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία όπως έτσι ώστε ο υπολογισμός της κατάστασης του ισοζυγίου απαιτεί την επανάληψη του υπολογισμού πολλές φορές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προετοιμασία ενός υπολογιστικού προγράμματος το οποίο βοηθά τον σχεδιαστή στον υπολογισμό της κατάστασης ισοζυγίου για διαφορετικές ταχύτητες ή φορτία, που εφαρμόζεται στην καθοδήγηση.

#### 4.6.3.3 Το Υδραυλικό Κύκλωμα

Οι λειτουργίες του υδραυλικού κυκλώματος είναι να εξασφαλίσουν μία επαρκή τροφοδοσία λαδιού στην υδροστατική καθοδήγηση, όσον αφορά στην πίεση και την ροή, για να τραβήξουν από το λάδι την θερμότητα που παράγεται από τις απώλειες και να αποτρέψουν την επαφή μεταξύ των στοιχείων ολίσθησης σε περίπτωση βλάβης της αντλίας. Γενικά αποτελείται από μία συμπίεσμένη δεξαμενή λαδιού, ένα σύστημα ελέγχου της πίεσης, μία βαλβίδα ασφαλείας, μία αντλία αναρρόφησης, και ένα φίλτρο αντλίας για τη σκόνη. Μερικές φορές, ένα σύστημα ψύξης λαδιού που τοποθετείται μετά την αντλία αναρρόφησης είναι επίσης απαραίτητο για την συλλογή του λαδιού που βγαίνει από την καθοδήγηση. Η λειτουργία της συμπίεσμένης δεξαμενής είναι να παρέχει λάδι στο έδρανο στην περίπτωση βλάβης της αντλίας, όπως και να εξισορροπεί την ροή του λαδιού. Ο πιο κοινός τύπος αντλίας που χρησιμοποιείται είναι η αντλία με γρανάζια. Το κόστος του υδραυλικού συστήματος τείνει να είναι υψηλό συγκρινόμενο με τους άλλους τύπους οδήγησης.

#### 4.6.3.4 Τα Κριτήρια Σχεδιασμού

Γενικά, είναι ενδιαφέρον να διατηρηθεί το κενό όσο το δυνατόν χαμηλότερο. Ωστόσο, η ελάχιστη αξία είναι περιορισμένη από την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής και την ελαστική παραμόρφωση των στοιχείων, ώστε να αποφευχθεί η επαφή μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης.

Για να καθοριστεί η ακαμψία της καθοδήγησης, είναι συνετό να ληφθεί υπόψη η ευελιξία των ίδιων των ολισθήσεων (διαφανειών). Είναι δυνατόν αυτή να συγκριθεί με εκείνη της οδήγησης.

Από την άλλη πλευρά, πρέπει να δοθεί ειδική προσοχή στο σύστημα για την συλλογή λαδιού που έχει απελευθερωθεί μέσω της υδροστατικής οδήγησης και για την επιστροφή του χωρίς νόθευση. Για αυτό, σε κάθε περίπτωση πρέπει να παρέχεται κατάλληλη στεγανοποίηση. Σαν παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά μίας περιστροφικής τράπεζας φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5** – Παράμετροι σχεδιασμού μίας αεροστατικής περιστροφικής τράπεζας από Precitech.

Εξωτερική διάμετρος τράπεζας	380 mm
Αξονική κίνηση σφάλματος	0.035 $\mu\text{m}$
Ακτινική κίνηση σφάλματος	0.079 $\mu\text{m}$
Χωρητικότητα φόρτισης (παράγοντας ασφάλειας 3)	6,670 N
Αξονική ακαμψία (17 bar)	1,315 N/ $\mu\text{m}$
Ακτινική ακαμψία	700 N/ $\mu\text{m}$
Ακαμψία κλίσης	19 Nm/ $\mu\text{rad}$
Αποδοτική ακαμψία 300mm πάνω από το κέντρο του εδράνου	162 N/ $\mu\text{m}$

#### **4.6.4 Αεροστατικοί Οδηγοί**

Στην περίπτωση των αεροστατικών οδηγών, το μέσο που διαχωρίζει τις επιφάνειες ολίσθησης είναι ο αέρας. Δεν υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές όσον αφορά στους υδροστατικούς οδηγούς όταν γίνεται αναφορά στην λειτουργική κατάσταση.

Τα ακόλουθα σημεία τονίζονται μεταξύ των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων αυτής της τεχνολογίας. Οι αεροστατικοί οδηγοί παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές απώλειες λόγω της τριβής, συμπεριλαμβάνοντας τις πολύ υψηλές ταχύτητες, λόγω του χαμηλού ιξώδους του αέρα. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το ιξώδες του αέρα είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερο από εκείνα των ελαίων που χρησιμοποιούνται στους υδροστατικούς οδηγούς. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη πως τα μέσα για την επιστροφή των υγρών και των στεγανοποιήσεων δεν απαιτούνται. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των αεροστατικών οδηγών είναι η επάρκειά τους για εφαρμογές που υπόκεινται σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, λόγω του ότι το ιξώδες του αέρα παρουσιάζει καλή συνοχή σε μία ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών.

Από την άλλη πλευρά, η διαστασιολόγηση ενός αεροστατικού οδηγού είναι πιο περίπλοκη από εκείνη της υδροστατικής περίπτωσης. Η συμπιεστότητα του αέρα, για παράδειγμα, συνεισφέρει σε αυτό. Αυτή η συμπιεστότητα, συνδυασμένη με το γεγονός ότι ο αέρας ίσα που παρέχει απόσβεση, παράγει διαφορετικά δυναμικά φαινόμενα τα οποία, γενικά, είναι προβληματικά. Μπορεί να υπάρχει, για παράδειγμα, αυτό-διεγειρόμενη διέγερση, γνωστή ως «σφυρηλάτηση του αέρα», η οποία μπορεί να γίνει ακουστική και σε περιπτώσεις να επηρεάζει σημαντικά την σωστή λειτουργία της οδήγησης. Αυτή η δόνηση μπορεί να μετριάζεται μέσω της χρήσης ενός υψηλού αριθμού κελιών, το καθένα με τον περιοριστή του. Για το λόγο αυτόν, σήμερα, οι οδηγοί κατασκευάζονται από πορώδη υλικά. Αυτό τείνει να αποτελείται από ένα πορώδες εξάρτημα στο οποίο το πορώδες μιμείται την λειτουργία των πολλαπλών περιοριστών.

Αυτός ο τύπος οδήγησης χρησιμοποιείται σπάνια στις εφαρμογές εργαλειομηχανών, κυρίως λόγω στην δυσκολία επίτευξης φορτίσεων επαρκούς χωρητικότητας σε ένα λογικό κόστος του εξοπλισμού αέρα-τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να κατεργάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σε έναν πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας, όπως και το ότι το κενό μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρό. Σαν παράδειγμα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος μίας ατράκτου ενός τόννου υπέρ-ακρίβειας.

**Πίνακας 4.6** – Παράμετροι σχεδιασμού μίας αεροστατικής ατράκτου από Precitech.

	HSS SP75	HSS SP150
Υλικό	Ατσάλινος άξονας/χάλκινο ακραξόνιο	
Ικανότητα αιώρησης	220 mm διάμετρος	
Χωρητικότητα φορτίου	180 N	680 N
Αξονική ακαμψία	70 N/μm	228 N/μm
Ακτινική ακαμψία	22 N/μm	88 N/μm
Ακρίβεια κίνησης	Αξονική/ακτινική < 50 nm	Αξονική/ακτινική < 25 nm μέσω δυναμικής κλίμακας
Μέγιστη ταχύτητα	15,000 rpm	7,000 rpm

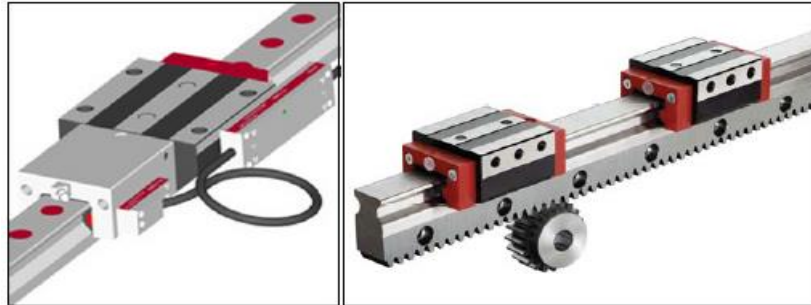
## 4.7 Το Παρόν και το Μέλλον

Αναπτύσσονται μερικές νέες ιδέες, με πρωτότυπα ή ακόμη και σε κυκλοφορία προϊόντα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Μερικά από αυτά εξηγούνται παρακάτω.

### 4.7.1 Κυλινδρικοί Οδηγοί με Ενσωματωμένες Λειτουργίες

Οι κατασκευαστές των κυλινδρικών οδηγών έχουν κάνει μία προσπάθεια να ενσωματώσουν λειτουργίες στα συστήματά τους (Σχήμα 4.24). Για παράδειγμα, επί του παρόντος, υπάρχουν κυλινδρικοί οδηγοί με συστήματα pickup. Το σύστημα pickup προσφέρει παρόμοια απόδοση με εκείνη του μέσου επιπέδου γραμμικού κωδικοποιητή, και είναι

συμβατό με τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιεί. Ένα άλλο προϊόν είναι οι ράβδοι που υποστηρίζουν ένα σύστημα κυλινδρικής καθοδήγησης. Αυτά τα προϊόντα μας επιτρέπουν να μειώσουμε τον χρόνο που απαιτείται για τον σχεδιασμό και την συναρμολόγηση και επιτρέπουν στον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής να προσφέρει περισσότερο συμπαγείς λύσεις.



Σχήμα 4. 24 – Κυλινδρικοί οδηγοί με ενσωματωμένες λειτουργίες, από Schneeberger.

#### 4.7.2 Το Υδροστατικό Πέλημα πάνω στις Ράγες Οδήγησης

Ένα ακόμη ενδιαφέρον προϊόν το οποίο εμφανίστηκε πρόσφατα στην αγορά, είναι το πέλημα που σχεδιάστηκε να λειτουργεί πάνω σε οδηγούς παρόμοιους με εκείνους που χρησιμοποιούνται στα κυλινδρικά συστήματα, και φαίνεται στο σχήμα 1.16b στο Κεφάλαιο 1. Αυτό το προϊόν επιτρέπει στον κατασκευαστή εργαλειομηχανής να αποκτήσει την απόδοση των υδροστατικών οδηγών χωρίς να πρέπει να σχεδιάσει και να κατασκευάσει τους ίδιους τους οδηγούς.

#### 4.7.3 Καθοδήγηση και Κίνηση μέσω Μαγνητικής Μετεώρισης

Η τεχνολογία «stateoftheart» έχει επιτρέψει την ανάπτυξη των διαφανειών των εργαλειομηχανών που οδηγούνται από ενεργά μαγνητικά πεδία. Τα χαρακτηριστικά μίας ανυψωμένης διαφάνειας, που οδηγείται από μαγνητικά πεδία, φαίνεται στο σχήμα 4.25.

	Διαδρομή (X και Y)	100 mm
	Μέγιστη ταχύτητα	60 m/min
	Μέγιστη επιτάχυνση	20 m/s <sup>2</sup>
	Κραδασμός	1,000 m/s <sup>3</sup>
	Kv	10 m/mm.min
	Γραμμική ανάλυση	60 nm
	Γωνιακή ανάλυση	0.046 arcsec
	Γραμμική ακρίβεια	0.2 μm
	Βάρος επεξ κομματιού	120 kg
	Γραμμική ισχύς	2,000 N

Σχήμα 4. 25 – Επίπεδος κινητήρας μαγνητικά ανυψωμένος, από Tekniker.

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτού του τύπου διαφάνειας, είναι το γεγονός πως δεν υπάρχουν δυνάμεις τριβής, τα δυναμικά είναι πολύ υψηλά λόγω του γεγονότος πως δεν υπάρχουν στοιχεία μετάδοσης ισχύος και η ακρίβεια περιορίζεται μόνο από το σύστημα μέτρησης που χρησιμοποιείται. Σήμερα, αυτός ο τύπος οδήγησης είναι ακόμη στην φάση της έρευνας.



## **5° Κεφάλαιο: Έλεγχος για Διαδικασίες Μηχανικής Κατεργασίας**

### **Περίληψη Κεφαλαίου:**

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τα προηγμένα συστήματα CNC για νέες διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας. Ξεκινά με μία περιγραφή μερικών κλασικών ιδεών σχετικά με τον αριθμητικό έλεγχο. Ειδική προσοχή δίνεται στα προβλήματα του αριθμητικού ελέγχου «stateoftheart» στο επίπεδο μηχανής, όπως τα συστήματα σερβο-ελέγχου. Υπάρχει μία περιγραφή νέων εννοιών στα προηγμένα συστήματα CNC που εμπλέκει αρχιτεκτονικές ιεραρχικού ελέγχου πολλαπλών επιπέδων, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν όχι μόνο το επίπεδο μηχανής, αλλά επίσης ένα επίπεδο επεξεργασίας και ένα εποπτικό επίπεδο. Ακολουθείται από μία περιγραφή του συστήματος αισθητήρων για τις διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας, που είναι απαραίτητο για την εφαρμογή της έννοιας της «ιδανικής μονάδας κατεργασίας». Στη συνέχεια το κεφάλαιο προχωρά για να προσφέρει μία εισαγωγή στα συστήματα CNC ανοιχτής αρχιτεκτονικής. Περιγράφει τις επικοινωνίες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και μία αρχιτεκτονική δικτυωμένου ελέγχου και εποπτείας μέσω διαδικτύου. Τέλος, υπάρχει μία περίληψη των συστημάτων που είναι διαθέσιμα να βοηθήσουν στον προγραμματισμό και την αρχιτεκτονική των σύγχρονων συστημάτων CNC. Υπάρχει επίσης μία περιγραφή των πιο πρόσφατων εξελίξεων στον χειρωνακτικό προγραμματισμό των σύγχρονων συστημάτων CNC και πιθανές αρχιτεκτονικές για τα συστήματα αυτά, με τις διαφορετικές χρήσεις H/Y και ποικίλων λειτουργικών συστημάτων.

### **5.1 Εισαγωγή και Ιστορία**

Ένας αριθμητικός έλεγχος είναι κάθε συσκευή (συνήθως ηλεκτρονική) που μπορεί να κατευθύνει τον τρόπο που τοποθετούνται ένα ή περισσότερα μηχανικά στοιχεία, έτσι ώστε οι σειρές κίνησης να τοποθετούνται μαζί εντελώς αυτόματα, μέσω της χρήσης αριθμητικών και συμβολικών πληροφοριών που καθορίζονται σε ένα πρόγραμμα.

Η πρώτη προσπάθεια παροχής μίας μηχανικής συσκευής με ένα είδος ελέγχου, αποδίδεται στον JosephMarieJacquard, ο οποίος το 1801 σχεδίασε έναν αργαλειό που θα μπορούσε να παράγει διαφορετικά είδη υφασμάτων, απλά τροποποιώντας ένα πρόγραμμα που είχε εισαχθεί στην μηχανή υπό τη μορφή διάτρητης κάρτας. Μεταγενέστερα παραδείγματα συμπεριλάμβαναν ένα αυτόματο πιάνο, το οποίο χρησιμοποιούσε διάτρητα ρολά χαρτιού ως τρόπο εισαγωγής ενός μουσικού προγράμματος. Ενώ αυτές οι συσκευές ήταν στην πραγματικότητα αυτόματοι έλεγχοι, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως πραγματικά συστήματα αριθμητικού ελέγχου.

Το μεγάλο άλμα της εξέλιξης στον αριθμητικό έλεγχο, ήρθε όταν ο αριθμητικός έλεγχος εφαρμόστηκε στην μηχανική κατεργασία πολύπλοκων εξαρτημάτων. Η εισαγωγή της αυτοκίνησης γενικά, και ο αριθμητικός έλεγχος συγκεκριμένα, εμφανίστηκε σαν το αποτέλεσμα των πολλών διαφορετικών περιστάσεων: 1) η ανάγκη κατασκευής προϊόντων που δεν μπορούσαν να επιτευχθούν σε μεγάλες ποσότητες σε αρκετά υψηλά επίπεδα ποιότητας χωρίς να καταφεύγουν στην αυτοματοποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας; 2) η ανάγκη παραγωγής στοιχείων που ήταν δύσκολο ή ακόμη και αδύνατο να κατασκευαστούν επειδή απαιτούσαν διαδικασίες που ήταν πολύ πολύπλοκες για να ελεγχθούν από χειρισμούς ανθρώπων; και 3) η ανάγκη παραγωγής στοιχείων σε ικανοποιητικά χαμηλές τιμές.

Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα, οι εφευρέτες βρήκαν έναν αριθμό αυτόματων συσκευών χρησιμοποιώντας μηχανικά, ηλεκτρομηχανικά, πνευματικά, υδραυλικά, ηλεκτρονικά και

πολλά άλλα είδη συστημάτων. Στην αρχή, ο βασικός παράγοντας που οδήγησε ολόκληρη την διαδικασία αυτοματοποίησης, ήταν η ανάγκη αύξησης της παραγωγικότητας. Άλλοι παράγοντες ανέδειξαν μετέπειτα πως, και ξεχωριστά και ως σύνολο, ήταν ιδιαίτερα σημαντικά στον βιομηχανικό τομέα, όπως η ανάγκη για ακρίβεια, ταχύτητα και ευελιξία. Η βιωσιμότητα δεν συμπεριλαμβάνεται εδώ, καθώς ήταν μικρής σημασίας από ποσοτική άποψη, αλλά χάρη στις συσκευές αυτές, ήταν δυνατή η κατασκευή εξαρτημάτων με υψηλά πολύπλοκες ιδιότητες που αλλιώς δεν θα γινόταν ποτέ.

Μία πρώιμη προσπάθεια εφαρμογής των τεχνικών αριθμητικού ελέγχου ως βοήθεια στην κατεργασία εξαρτημάτων, έγινε το 1942, σε απάντηση της ζήτησης από την αεροναυτική βιομηχανία. Ωστόσο, η εξέλιξη κλειδί στην αυτοκίνηση των διαδικασιών μηχανικής κατεργασίας συνέβη στα 1950, όταν η Parsons, μία εταιρία σε σύμβαση με την USAirForce, ζήτησε από το Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) να αναπτύξει μία μηχανή φραιζαρίσματος τριών αξόνων με αριθμητικό έλεγχο. Αυτός ο ελεγκτής ήταν η τελευταία λέξη της τεχνικής το 1960. Μέχρι τότε, η χρήση των υπολογιστών και συγκεκριμένα οι πρώτοι μικροϋπολογιστές που αναδύθηκαν στις αρχές του 1970, οδήγησαν σε θεαματικές εξελίξεις, καθώς πιο ισχυροί, αξιόπιστοι, και οικονομικοί υπολογιστές έγιναν διαθέσιμοι.

### **5.1.1 Υπολογιστικός Αριθμητικός Έλεγχος και Άμεσος Αριθμητικός Έλεγχος**

Μέχρι την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών στις αρχές του 1970, τα συστήματα αριθμητικού ελέγχου ήταν διαιρεμένα σε δύο βασικές ομάδες: 1) στα συστήματα που σχεδιάστηκαν για να ελέγχουν τις δαπανηρές, εξεζητημένες εργαλειομηχανές, στις οποίες θα μπορούσε να συμπεριληφθεί ένας μικροϋπολογιστής ως το βασικό σύστημα ελέγχου χωρίς να αυξάνει υπερβολικά το κόστος και του ελέγχου αλλά και της μηχανής; και 2) στα μικρά και μεσαίου μεγέθους συστήματα ελέγχου, που σχεδιάστηκαν για πιο απλές μηχανές και κατά κανόνα για εφαρμογές ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αφού οι υπολογιστές άρχισαν να συμπεριλαμβάνονται σαν βασικό στοιχείο, ο αριθμητικός έλεγχος έγινε γνωστός ως CNC (Computerized Numerical Control).

Σχεδόν αμέσως, ωστόσο, στα μέσα του 1970, ο μικροεπεξεργαστής άρχισε να χρησιμοποιείται ως βασική μονάδα. Αυτό τοποθέτησε πολύ αυστηρές συνθήκες στην οργάνωση του συστήματος, στην επιλογή του μικροεπεξεργαστή και στον σχεδιασμό του συστήματος με διαφορετικές λειτουργικές μονάδες. Στην περίπτωση οργάνωσης του συστήματος, με βάση τον τύπο του χρησιμοποιούμενου αριθμητικού ελέγχου, αυτό σήμαινε την χρήση παράλληλων τεχνικών επεξεργασίας στην ευρύτερη έννοια του όρου. Στον εξοπλισμό υψηλής κλίμακας, η παράλληλη επεξεργασία επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονικές πολλαπλού-μικροεπεξεργαστή, με μερικές συγκεκριμένες λειτουργίες υποστηριζόμενες από περιφερειακά μικροϋπολογιστή LSI. Αυτοί οι περιφερειακοί μικροϋπολογιστές εμπλούτισαν σημαντικά την απόδοση του αριθμητικού ελέγχου, καθώς απαιτούσαν ελάχιστη προσοχή, αφού λειτουργούσαν παράλληλα με τους κεντρικούς μικροεπεξεργαστές.

Στην δημιουργία συστημάτων πολλαπλών-μικροεπεξεργαστών και συγκεκριμένα συστημάτων μονού επεξεργαστή, υπήρχαν συγκεκριμένες βασικές συνθήκες που το σύστημα έπρεπε να συναντά. Η πιο σημαντική από αυτές ήταν ο καθορισμός χειρισμού του μεγέθους των αριθμητικών τιμών, πάντα σε αριθμητική ακεραίων. Η χρήση μικροεπεξεργαστών των 32-bit προσέφερε ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην εκτέλεση λειτουργιών στην αριθμητική ακεραίων.

Επιπλέον, όπως θα παρατηρηθεί παρακάτω, αυτά τα συστήματα CNC απαιτούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στην μονάδα παρεμβολών και στην τοποθέτηση σερβομηχανισμών ελέγχου. Οι αλγόριθμοι που είναι να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία παρεμβολών πρέπει να έχει σαν αναφορά αλγορίθμους λέξεων, ενώ τα συστήματα σερβο

ελέγχου πρέπει να είναι συστήματα δειγμάτων, με μία περίοδο δείγματος  $T_s$ . Η τιμή που προσδιορίζεται στην περίοδο δείγματος  $T_s$  είναι ζωτικής σημασίας όσον αφορά στα λάθη που παράγονται από την εργαλειομηχανή.

Ενώ χρησιμοποιούνταν τα πρώτα CNC που βασίζονταν σε μικροϋπολογιστή, τα πρώτα βήματα έγιναν σε κάποιο βαθμό, στον δρόμο προς την βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατεργασίας. Η βελτιστοποίηση των διαδικασιών αυτών βασίστηκε παραδοσιακά σε τμηματικά προγράμματα που βασίζονταν σε μη-αξιόπιστα προ-επεξεργασμένα δεδομένα. Σύντομα βρέθηκε πως θα ήταν αδύνατο να βελτιστοποιηθούν τέτοιες διαδικασίες, και συγκεκριμένα να εφαρμοστεί η έννοια της αντικειμενικής λειτουργίας που βασίζεται μόνο στην χρήση τμημάτων προγραμμάτων που ήδη υπάρχουν.

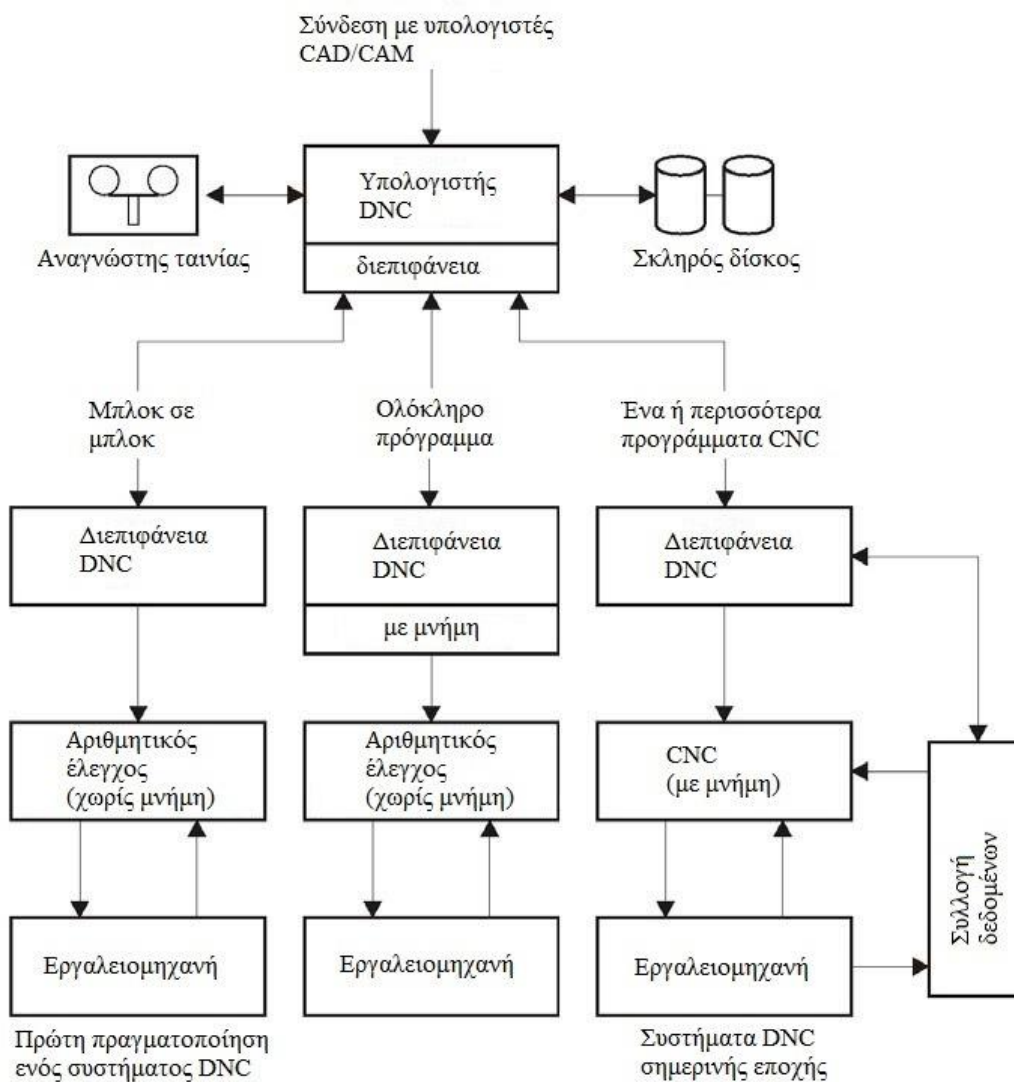
Η πρώτη σοβαρή προσπάθεια στην βελτιστοποίηση έγινε το 1960 κατά τη διάρκεια μίας USAirForce συμφωνίας με την BendixCorporation. Το σύστημα που σχεδιάστηκε, στο οποίο δόθηκε το όνομα AdaptiveControlOptimization (ACO), συμπεριλάμβανε βελτιστοποίηση online και προσαρμοζόμενους ελέγχους που ήταν πολύ προηγμένοι για την εποχή. Ωστόσο, αυτό το σύστημα δεν είχε πρακτική χρήση στο βιομηχανικό περιβάλλον, καθώς η λειτουργία του βασιζόταν στην ύπαρξη αισθητήρων που δεν ήταν ακόμη διαθέσιμοι, όπως οι αισθητήρες κατάστασης των εργαλείων.

Αυτό έδειξε πως τα υπό-βέλτιστα συστήματα ελέγχου θα μπορούσαν να είναι πιο κατάλληλα και ευκολότερα στη χρήση στα βιομηχανικά περιβάλλοντα, οδηγώντας στην εμφάνιση συστημάτων προσαρμοζόμενου ελέγχου με περιορισμούς (ACC) και στους γεωμετρικούς προσαρμοζόμενους ελέγχους (GAC). Αυτά τα συστήματα, τα οποία αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια το 1980, απέτυχαν επίσης να κερδίσουν την πλήρη βιομηχανική αποδοχή λόγω των υψηλά περιορισμένων ιδιοτήτων τους.

Μία άλλη βελτίωση στα συστήματα CNC ήρθε με την δημιουργία των αρχιτεκτονικών κατανομμένου αριθμητικού ελέγχου (DNC), νέων κατασκευαστικών αρχιτεκτονικών στις οποίες πολλές εργαλειομηχανές με ελέγχους CNC εκτελούνται από έναν κεντρικό υπολογιστή μέσω μίας άμεσης, πραγματικού χρόνου σύνδεσης. Τα συστήματα CNC, συνδέουν μία ομάδα μηχανών σε ένα κεντρικό υπολογιστή που χρησιμοποιείται για να προγραμματίσει και να καταγράψει τμηματικά προγράμματα, να μεταδώσει τα προγράμματα αυτά κατόπιν ζήτησης και, γενικά, να διαχειριστεί τις ενέργειες των εν λόγω μηχανών.

Οι γενικοί στόχοι που αναζητούνται από τα συστήματα CNC είναι: 1) η αύξηση της απόδοσης του προγραμματιστή, του χειριστή και της ίδιας της μηχανής; 2) η παροχή ευέλικτης δομής που μπορεί να επεκταθεί σε και να αναβαθμιστεί με άλλα συστήματα; και 3) να επιτρέπουν την ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, που προσφέρει πληροφορίες για οτιδήποτε συμβαίνει στην γενική διαδικασία κατεργασίας.

Αυτός ο νέος τύπος αρχιτεκτονικής μπορεί να χρονολογείται πίσω στα τέλη του 1960, αν και δεν ήταν ξεκάθαρα ενοποιημένη μέχρι τις αρχές του 1980, με την χρήση τοπικών δικτύων επικοινωνίας χρησιμοποιώντας τοπολογίες αστέρα πολλαπλών σημείων, δακτυλίου και διαύλου. Το σχήμα 5.1 απεικονίζει την ιστορική εξέλιξη της έννοιας DNC.



Σχήμα 5. 1 – Ιστορική εξέλιξη της έννοιας DNC.

Ωστόσο, η ανάπτυξη των τοπικών δικτύων (LAN), άλλαξε τον κόσμο των DNC, και η ιδέα των CNC-DNC προχώρησε προς τον διαδικτυακό έλεγχο και την εποπτεία όλων των διαδικασιών κατεργασίας. Από τα μέσα του 1990, μία τεράστια ποσότητα εργασιών διεξήχθη στον δικτυακό έλεγχο και στα συστήματα εποπτείας, από τα τοπικά δίκτυα LAN έως τα δίκτυα ευρείας περιοχής WAN και το ίδιο το διαδίκτυο.

### 5.1.2 Διαδικτυακός Έλεγχος και Εποπτεία

Τα CNC και οι εργαλειομηχανές υπάρχουν και λειτουργούν σε μία αρχιτεκτονική βασισμένου επιπέδου, ξεκινώντας με την εταιρία στο μακρο-επίπεδο και μετακινούμενοι μέσω του μεμονωμένου εργοστασίου, το οποίο από μόνο του περιέχει μονάδες επιχειρήσεων υπεύθυνες για την εποπτεία ομάδων μηχανών. Τέλος, στο μικρο-επίπεδο, υπάρχει η ίδια η μηχανή, η οποία συμπεριλαμβάνει την εργαλειομηχανή και τα συστήματα ελέγχου της. Οι βελτιώσεις στα CNC, στις πλατφόρμες ελέγχου που βασίζονται σε Η/Υ, και στα νέα μετρητικά και λειτουργικά συστήματα, οδήγησαν σε μία αύξηση και του χρόνου και της ακρίβειας του χρήστη, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και των επισκευών και την αύξηση της ποιότητας και της ποσότητας των εξαρτημάτων που παράγονται ανά μετρήσιμη μονάδα του χρόνου.

Υπάρχει τέτοιο πράγμα σαν ένα ανοιχτό, ευφυές, κατανεμημένο CNC? Τα συστήματα ανοιχτού ελέγχου έχουν πράγματι υπάρξει απαραίτητα στον να καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη και εφαρμογή των λειτουργικών και των αναδιευθετήσιμων κατασκευαστικών συστημάτων. Η ανάπτυξη των ανοιχτών πλατφορμών συνοδεύεται από την κατασκευή περιβαλλόντων ανοιχτής ανάπτυξης και εφαρμογής, που συμπεριλαμβάνουν πρότυπα διαλειτουργικότητας και αναβάθμισης. Ταυτόχρονα, τα συστήματα μεσολάβησης βασισμένα σε πρότυπα, τα οποία ανοίγουν νέες δυνατότητες όπως διαύλους επικοινωνίας για την παρακολούθηση και τον έλεγχο πολύπλοκων διαδικασιών, έχουν ακόμη μακρύ δρόμο από τα τρέχοντα κατασκευαστικά συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζουν ένα ευρύ φάσμα κατασκευαστών CNC και τελικών χρηστών. Η ενοποίηση και τυποποίηση των τρεχουσών χαρακτηριστικών μέσω ευφυούς, κατανεμημένης λήψης αποφάσεων, είναι ακόμη στα πρώιμα στάδια. Παρ' όλα αυτά, ο απευθείας αριθμητικός έλεγχος έχει εξελιχθεί προς τις αρχιτεκτονικές νέου διαδικτυακού ελέγχου και εποπτείας. Χρησιμοποιώντας βιομηχανικά δίκτυα (π.χ. Profibus), τοπικά δίκτυα (π.χ. Ethernet) και μεγαλύτερα δίκτυα όπως το διαδίκτυο (Internet), καθίσταται δυνατή η διεξαγωγή διαδικτυακού ελέγχου και λειτουργιών εποπτείας. Οι τεχνολογίες επικοινωνιών και οι βελτιωμένοι υπολογιστικοί αλγόριθμοι, αυξάνουν σε σπουδαιότητα.

Μέχρι πριν λίγα χρόνια, οι επικοινωνίες είχαν γίνει μόνο σε μία βάση σημείου προς σημείο (point-to-point), αλλά οι νέες εφαρμογές έχουν βελτιώσει την επικοινωνία με τη συνεχή πρόσβαση στις πληροφορίες από όλες τις συσκευές ελέγχου που συνδέονται στο δίκτυο. Παρ' όλες αυτές τις βελτιώσεις, υπάρχουν μεγάλα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την νέα αυτή προσέγγιση, που επηρεάζει σοβαρά την απόδοση και την σταθερότητα των συστημάτων κλειστού βρόχου, όπως είναι η δειγματοληψία συχνότητας και οι απαιτήσεις ανατροφοδότησης πραγματικού χρόνου των συστημάτων ελέγχου. Η καθυστέρηση που παράγεται στα κανάλια διαμοιρασμού πληροφορίας, συνεπάγεται υποβάθμιση και αστάθεια για ένα σύστημα διαδικτυακού ελέγχου και εποπτείας. Πολλές μελέτες βρίσκονται σήμερα σε εξέλιξη όσον αφορά στους περιορισμούς αναβάθμισης των συστημάτων ελέγχου και επικοινωνίας, όπως ο περιορισμός του εύρους ζώνης, των καθυστερήσεων της επικοινωνίας, απωλειών πληροφορίας, σφαλμάτων μετάδοσης και μη-συγχρονισμού.

Σε μία ιδανική περίπτωση, αν η καθυστέρηση είναι συνεχής και είναι διαθέσιμο ένα γραμμικό μοντέλο του συστήματος, ο σχεδιασμός και η ανάλυση θα απλοποιούνταν σημαντικά. Τα πρωτόκολλα «Tokenring» θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, τα οποία επιτρέπουν μία συνεχή καθυστέρηση, αλλά πρέπει να είναι γνωστή η μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να ανεχτεί το σύστημα. Μία άλλη επιλογή μπορεί να είναι η χρήση προβλέψεων πραγματικού χρόνου, που βασίζονται πάνω σε ελεγκτές πρόβλεψης και αντισταθμίζουν κάθε καθυστέρηση που συμβαίνει στην προηγούμενη δειγματοληψία. Για να γίνει αυτό, πρέπει να πραγματοποιηθεί μία περίοδος δειγματοληψίας, που θα ήταν ανεκτή από τις καθυστερήσεις που διαδραματίζονται στο δίκτυο και θα εξασφάλιζαν ταυτόχρονα πως το σύστημα θα μπορούσε να φτάσει τους επιθυμητούς στόχους απόδοσης.

Διεξήχθησαν μελέτες όσον αφορά στους περιορισμούς στην επικοινωνία από την θεώρηση του συστήματος ελέγχου. Μερικές προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν μία ανάλυση των καθυστερήσεων σε ένα σύστημα ενεργοποιημένου διαδικτυακού ελέγχου, με έναν καθορισμένο χρόνο αδράνειας, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο μετάδοσης TCP/IP. Γενικά, οι καθυστερήσεις αυτές μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές, όπως συναρτήσεις αρνητικής εκθετικής κατανομής, και αλυσίδες Poisson και Markov.

## **5.2 Νέες Διαδικασίες Μηχανικής Κατεργασίας**

Η δυσκολία ανάπτυξης ανώτερων ποιοτικά επιπέδων διαδικασιών μηχανικής κατεργασίας, έχει αυξηθεί ακόμη περισσότερο με την εμφάνιση νέων παραδειγμάτων. Η υψηλή ταχύτητα, η υψηλή απόδοση μηχανικής κατεργασίας και η μικρό/νανό-μηχανική, με την συμπερίληψη

των αντικειμενικών λειτουργιών και των μεταβλητών αξιών, έφεραν νέα υπολογιστικά εμπόδια.

Η σύγχρονη αγορά, δεν απαιτεί μόνο την κατάλληλη κατεργασία των εξαρτημάτων, αλλά επιβάλλει επίσης πολύ αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά στην παραγωγικότητα, την ακρίβεια των διαστάσεων και την ποιότητα της επιφάνειας, όλα στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Θα μπορούσε να ειπωθεί πως ένα από τα νέα παραδείγματα κατεργασίας, ένα του οποίου η επίτευξη θα περιελάμβανε επιπλέον επίπεδα κατεργασίας, πέρα από το φάσμα των CNC, θα μπορούσαν να αποτελέσουν μία πρόκληση για την μεγιστοποίηση του ποσοστού απομάκρυνσης υλικού (MRR), την ελαχιστοποίηση φθοράς και ζημιάς των εργαλείων (TCM), και την διατήρηση της ποιότητας μεταξύ των δεδομένων προδιαγραφών, υπό τη μορφή διάστασης και φινιρίσματος των κατεργασμένων εξαρτημάτων, από το πρώτο κίονας παραγόμενο εξάρτημα. Η βασική αιτία μπορεί να βρεθεί στις νέες στρατηγικές που εφαρμόζονται στην αγορά εργαλειομηχανών. Κανένας δεν αγοράζει πια μηχανές ή ακόμη και διαδικασίες κατεργασίας. Τώρα αγοράζουν παραγωγή, π.χ. εξαρτήματα, έτσι ώστε οι εργαλειομηχανές να αξιολογούνται και να αγοράζονται υπό τη μορφή παραγωγής.

### **5.2.1 Μηχανική Κατεργασία Υψηλής Ταχύτητας**

Η κατεργασία υψηλής απόδοσης δεν περιλαμβάνει τέτοιες υψηλές ταχύτητες κοπής, αλλά καθώς το βάθος κοπής είναι πολλές φορές πιο μεγάλο, μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης υλικού. Οι επιδράσεις αύξησης της ταχύτητας κοπής είναι ως ακολούθως: 1) μειώνεται ο συντελεστής τριβής του υλικού/εργαλείου; 2) το υλικό που εκτοπίζεται από την κοπή εξαφανίζεται, δίνοντας μία σημαντική βελτίωση στην ποιότητα της επιφάνειας; 3) μειώνονται οι δυνάμεις κοπής; 4) σχεδόν όλη η θερμότητα εκκενώνεται με το τσιπ; και 5) η πιο σημαντική επίδραση φθοράς είναι η διάχυση, καθιστώντας απαραίτητη την προστασία των εργαλείων με ειδικά περιβλήματα. Οι διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας υψηλής ταχύτητας προσφέρουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα: 1) αυξημένη παραγωγικότητα, 2) μειωμένες δυνάμεις κοπής, 3) μειωμένοι χρόνοι κοπής, 4) βελτιωμένη ακεραιότητα επιφάνειας, 5) μία πιο σταθερή διαδικασία με λιγότερους κραδασμούς, 6) βελτιωμένη υφή επιφάνειας, 7) δυνατότητα κατεργασίας λεπτών τειχών, και 8) μειωμένο πάχος θραυσμάτων και μικρότερο ξύσιμο των σπειρών.

Γενικά μιλώντας, η κατεργασία υψηλής ταχύτητας αποτελεί μία έννοια που περιλαμβάνει πολλά περισσότερα από την απλή κατεργασία σε υψηλές ταχύτητες κοπής. Είναι στην πραγματικότητα μία διαφορετική διαδικασία μηχανικής κατεργασίας μαζί με πιο ακριβό, πιο προηγμένο εξοπλισμό και εργαλεία που απαιτούν από τον χειριστή να έχει μεγαλύτερη προστασία και περισσότερη εκπαίδευση. Αυτό επειδή οι χειριστές πρέπει να χρησιμοποιούν περισσότερα συστήματα CAD/CAM και να ξοδεύουν λιγότερο χρόνο προγραμματισμού στην ίδια την μηχανή, αν και παρ' όλες τις βελτιώσεις κάποιος χρόνος προγραμματισμού παραμένει απαραίτητος.

Η κατεργασίες υψηλής ταχύτητας απαιτούν πολύ αυστηρές συνθήκες, και από τις ίδιες τις εργαλειομηχανές και από τα συστήματα ελέγχου τους, τα οποία περιλαμβάνουν επίσης τα συστήματα κίνησης των μηχανών. Γενικά, θα μπορούσε να ειπωθεί πως αυτά τα νέα χαρακτηριστικά οδηγούν πιο κοντά στην έννοια της «ιδανικής μονάδας κατεργασίας», όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5. 2 – Η Ιδανική Μονάδα Κατεργασίας.

Οι συμβατικοί αριθμητικοί έλεγχοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να πετύχουν μία ιδανική μονάδα κατεργασίας, έτσι πρέπει να δημιουργούνται τα συστήματα ιεραρχικού ελέγχου πολλαπλών επιπέδων, στα οποία το φυσιολογικό επίπεδο μηχανής θα πρέπει να ενσωματώνεται με τουλάχιστον δύο υψηλότερα επίπεδα, δηλαδή ένα επίπεδο επεξεργασίας και ένα επίπεδο εποπτείας. Αν πρόκειται να εισαχθούν αυτά τα υψηλότερα επίπεδα, θα είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν κάποια πολύ ισχυρά συστήματα αισθητήρων, για να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, σχετικά με το τι συμβαίνει στην μηχανή, στην διαδικασία και στο εργαλείο κοπής. Το θέμα αυτό θα συνεχιστεί στην Ενότητα 5.4.

### 5.2.2 Μικρο-μηχανική Κατεργασία

Ομοίως, υπάρχει τώρα μία απαίτηση στην αγορά για στοιχεία μινιατούρες υπέρ-ακρίβειας, π.χ. κατασκευή μικροστοιχείων. Ένα προϊόν ταξινομείται για το αν ανήκει στην κατηγορία των μικροστοιχείων, όταν τουλάχιστον ένα από τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά μετρείται σε μικρά. Γενικά μιλώντας, η αγορά απαιτεί την παραγωγή των στοιχείων μινιατούρας με μικρομετρικές (και ακόμα και υπό-μικρομετρικές) λεπτομέρειες.

Υπάρχουν θεμελιακά δύο τύποι τεχνικών για την κατασκευή μικροστοιχείων: τα MST (τεχνολογίες μικρο-συστημάτων), τα οποία καλύπτουν τις τεχνολογίες για την σμίκρυνση των στοιχείων που βασίζονται στην σιλικόνη, και τα MET (τεχνολογίες μικρο-μηχανικής), τα οποία καλύπτουν τεχνολογίες για την κατασκευή προϊόντων με υψηλής ακρίβειας γεωμετρίες 3D σε μία ευρεία ποικιλία υλικών. Οι τεχνολογίες MEMS (μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα), είναι υποδιαίρεση των MST και αναφέρονται σε προϊόντα με ηλεκτρικά και μηχανικά στοιχεία.

Σαν αποτέλεσμα, οι τεχνολογίες MET τείνουν να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συσκευών μινιατούρας και στοιχείων με λεπτομέρειες που κυμαίνονται σε μήκος από δέκατα μικρών έως μερικά χιλιοστά. Αν και αυτές οι μικρο-μηχανικές τεχνικές κατεργασίας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουν υπό-μικρομετρικές λεπτομέρειες, παίζουν ωστόσο έναν απαραίτητο ρόλο στην μεσοκλίμακα, σαν μία γέφυρα μεταξύ της περιοχής των μακρο και των περιοχών των νάνο και μικρο, στην παραγωγή των λειτουργικών στοιχείων.

Ωστόσο, η τεχνογνωσία που συσσωρεύεται στην περιοχή της μακρο-κατεργασίας δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στις διαδικασίες μικρο-κατασκευής. Υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ της κατεργασίας υψηλής ταχύτητας και της μικρο-μηχανικής κατεργασίας: 1) η ακτινική αναλογία βάθος κοπής/εργαλείου. Η ελάχιστη πυκνότητα που απαιτείται για να απομακρυνθεί το υλικό δεν είναι γνωστή; 2) εργαλεία. Απαιτούνται πολύπλοκες γεωμετρίες. Λόγω επίδρασης του μεγέθους του κόκκου του υλικού και του περιβλήματός του, η αιχμή κοπής είναι στρογγυλεμένη αντί να είναι αιχμηρή, επηρεάζοντας συνεπώς την ελάχιστη πυκνότητα του απομακρυσμένου υλικού. Η στρογγυλοποίηση του εργαλείου θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη από την τροφοδοσία ανά δόντι, προκαλώντας μεγάλες διαφορές στην φόρτιση των δοντιών του εργαλείου; 3) συνθήκες κοπής. Οι ταχύτητες της ατράκτου είναι πολύ υψηλότερες, έως 120,000rpm, με βάθος κοπής, ακτινικό και αξονικό, μόλις μερικών μικρών; 4) ισχύεις κοπής. Είναι της τάξης των 100 φορές μικρότερου από εκείνες στην κατεργασία υψηλής ταχύτητας – μόλις μερικά Newton. Η τροφοδοσία ανά δόντι είναι μόλις μερικά μικρά; 5) ξαφνική, απρόβλεπτη θραύση του εργαλείου. Είναι απαραίτητο να υπάρχουν αισθητήρες για να ανιχνεύουν την θραύση του εργαλείου; 6) γρέζια δύσκολο στην απομάκρυνση. Χρειάζονται πιο πολύπλοκες διαδικασίες κατεργασίας, με επιπρόσθετες λειτουργίες ώστε να απομακρύνουν τα γρέζια; 7) χρήση υλικού. Στην μικρο-κατεργασία, το μέγεθος του κόκκου του υλικού που πρόκειται να κοπεί, μπορεί να βρίσκεται στην ίδια τάξη με την ακτίνα της αιχμής κοπής και της πυκνότητας του απομακρυσμένου θραύσματος. Το υλικό δεν μπορεί να θεωρηθεί ομογενές; 8) ακρίβεια. Στην μικρο-μηχανική, οι βαθμοί ανοχής που απαιτούνται είναι οι IT3 και IT3, ενώ στην μακρο-κλίμακα είναι οι IT7 και IT8. Οι θερμικές διαστολές ή οι ακρίβειες σφαλμάτων κατά τη διάρκεια κατεργασίας μπορεί να είναι τόσο μεγάλες όσο και οι ίδιες οι παράμετροι κοπής ή το αξονικό ή ακτινικό βάθος κοπής, συνεπώς οδηγούν σε σφάλματα ποσοστού 100%.

### 5.2.3 Μία Εισαγωγή στις Διαδικασίες Νάνο-κατεργασίας

Βελτιώσεις στα επιστημονικά και τεχνολογικά πεδία, μας έχουν φέρει πιο κοντά στην μοριακή κατεργασία ή την νάνο-κατεργασία, η οποία μπορεί να περιγραφεί ως η κατασκευή των αντικειμένων κόβοντας, δημιουργώντας προφίλ ή σχηματίζοντας σε ένα ατομικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας μία σειρά από λειτουργίες (π.χ. έξτρα-γρήγορα λείζερ ή χημικές αντιδράσεις) που διεξάγονται από μη-συμβατικά μηχανήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, η απουσία μηχανικών διαδικασιών κατά τη διάρκεια των επιδράσεων κοπής επηρεάζει την αξιοπιστία του ορισμού της νάνο-κατεργασίας.

Το σχήμα 5.3 δείχνει μερικές λειτουργίες κοπής νάνο-κατεργασίας. Ωστόσο, δεν υπάρχει αμφιβολία πως, βραχυχρόνια, οι βασικές ιδιότητες μερικών εργαλειομηχανών (σε πολλές περιπτώσεις μη-συμβατικά εργαλεία) κινούνται προς την προγραμματιζόμενη τοποθέτηση των μορίων με μία ανοχή του 0.1nm, μηχανοσύνθεση στα  $10^6$  λειτουργίες/συσκευή, λειτουργία στα  $10^9$ Hz, μεταποίηση ήλεκτρο-μηχανικού δυναμικού στα  $10^{15}$ W/m<sup>3</sup> και, γενικά, συστήματα παραγωγής που μπορούν να διπλασιάσουν την παραγωγή σε  $10^4$  δευτερόλεπτα.

Από επιστημονικής απόψεως, η απομάκρυνση του υλικού εμφανίζεται στην παρουσία δυναμικών που καθορίζονται από τις δυνάμεις τριβής, τραβήγματος και σπείρας, ενώ παράγονται μη γραμμικές, εξωτερικής έλξης και απώθησης νάνο-δυνάμεις, που σέρνουν ή πιέζουν ένα σωματίδιο με μικρής ή μεγάλης εμβέλειας επιδράσεις. Αυτές οι νάνο-δυνάμεις είναι δια-μοριακές δυνάμεις, όπως η δύναμη «VanderWaals», η δύναμη «Casimir», τριχοειδείς δυνάμεις, δεσμού υδρογόνου, ομοιοπολικού δεσμού, η κίνηση «Brownian», η στερεοχημική επίδραση και οι υδροφοβικές δυνάμεις, δυνάμεις οι οποίες δεν είναι σημαντικές σε μακρο-κλίμακα.



Σχήμα 5. 3 – Λειτουργίες κοπής στην νάνο-κατεργασία.

Αυτές οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά οδηγούν στα παρακάτω:

- Μία εκθετική αύξηση στην ειδικότητα εργασίας σε νάνο-κλίμακα, με βάση τις δεσπόμενες δια-μοριακές δυνάμεις, τις φυσικές, γεωμετρικές και χημικές ιδιότητες της επιφάνειας και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα ραδιοκύματα.
- Μία αύξηση στην λειτουργική πολυπλοκότητα της κατασκευής λόγω της μη-γραμμικότητας.
- Μία αύξηση στις απαιτήσεις λειτουργίας και ακρίβειας των αισθητήρων, των ενεργοποιητών και στον υπολογισμό των μέσων ενημέρωσης.

### 5.3 Τα Σημερινά CNC: Επίπεδο Ελέγχου της Μηχανής

Οι σημερινές διαδικασίες κατεργασίας, συγκεκριμένα οι διαδικασίες κατεργασίας υψηλής ταχύτητας, παρουσιάζουν έναν αριθμό χαρακτηριστικών που έχουν καταστήσει αναγκαία την εύρεση νέων εννοιών και στρατηγικών για τον μηχανικό σχεδιασμό μερικών στοιχείων της μηχανής, και έχουν επιβάλει ένα δραστικό επανασχεδιασμό όλων των μοντέλων που σχετίζονται με την διαδικασία παρακολούθησης, τον έλεγχο και την εποπτεία. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Εξαιρετικά περίπλοκες διαδικασίες κοπής. Στην περιοχή της επεξεργασίας, σχεδόν δεν υπάρχουν καθόλου μοντέλα. Η αβεβαιότητα και οι ατελείς πληροφορίες είναι εγγενή στοιχεία σε αυτές τις διαδικασίες κατεργασίας.
- Οι μεγάλες αβεβαιότητες των εντός διαδικασίας μετρήσεων. Η ανάγκη χρήσης μοντέλων εμπειρικών προβλέψεων. Θόρυβος στις μετρήσεις.
- Το γεγονός ότι υπάρχουν διαταραχές που επηρεάζουν τις μηχανές, τα υλικά, τις συνθήκες κοπής, κλπ.
- Επί του παρόντος, πολύ λίγοι κατασκευαστές, και, πάνω απ' όλα, πολύ λίγοι τελικοί χρήστες εργαλειομηχανών, έχουν αποδεχτεί τις συσκευές παρακολούθησης, ελέγχου και εποπτείας, και οι λύσεις είναι λίγες. Η φτωχή απόδοση αυτών των συστημάτων στις λειτουργίες συμβατικής κατεργασίας, σε υψηλές ταχύτητες, με τους σημαντικούς περιορισμούς στον χρόνο επεξεργασίας, και με ανεπαρκή γνώση των πραγματικών φυσικών διαδικασιών λαμβάνουν χώρα.

Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προκλήσεων και για την επίτευξη της έννοιας «ιδανικής μονάδας κατεργασίας» (δείτε Σχήμα 5.2) θα γίνει απαραίτητη η υιοθέτηση νέων αρχιτεκτονικών ελέγχου και εποπτείας. Τα μοντέλα ιεραρχικού ελέγχου πολλαπλών επιπέδων, που υποστηρίζονται από συστήματα αισθητήρων ισχυρής κατεργασίας, θα έκανα την διαδικασία πιο προβλέψιμη στα επίπεδα χαμηλότερου ελέγχου και συνεπώς θα μείωναν την πολυπλοκότητα του απαιτούμενου σχήματος ελέγχου. Θα φαινόταν ξεκάθαρο πως έπρεπε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο επίπεδα ελέγχου: το επίπεδο μηχανής και το επίπεδο διαδικασίας/εποπτείας.

Ο έλεγχος στο επίπεδο μηχανής, το επίπεδο στο οποίο τα CNC λειτουργούν σήμερα, επρόκειτο να βελτιώσει την δυναμική συμπεριφορά της εργαλειομηχανής. Πρέπει έτσι να έχει δύο βασικές, ισχυρές λειτουργικές μονάδες: την μονάδα τροχιακής γενιάς και τα

συστήματα σερβο-ελέγχου, μία για τον κάθε άξονα της μηχανής. Στα σημερινά CNC, αυτές οι μονάδες πρέπει να εκθέτουν πολύ ειδικά χαρακτηριστικά και να είναι εξοπλισμένες με αλγόριθμους πολύ ισχυρής παρεμβολής και τοποθέτησης ελέγχου, ώστε να μπορούν να συναντηθούν οι υψηλές ταχύτητες και η ακρίβεια.

### 5.3.1 Η Διαδικασία Παρεμβολής

Η παρεμβολή είναι μία μέθοδος που επιτρέπει στα ενδιάμεσα σημεία να βρεθούν κατά μήκος μίας συγκεκριμένης καμπύλης μεταξύ ενός σημείου εκκίνησης και ενός σημείου τερματισμού, δεδομένου ότι η παραγόμενη παρεμβολή προσφέρει μία ικανοποιητική προσέγγιση στην επιθυμητή προγραμματισμένη καμπύλη. Αυτά τα σημεία είναι συνήθως μεταγενέστερα ενωμένα χρησιμοποιώντας γραμμικά στοιχεία, κάνοντας δυνατό το σχεδιασμό μίας πιο περίπλοκης καμπύλης, απλώς χρησιμοποιώντας έναν επαρκή αριθμό στοιχείων. Γενικά, αν απαιτείται ένα υψηλό επίπεδο ακρίβειας, εκατοντάδες μικρά γραμμικά στοιχεία θα πρέπει να υπολογιστούν και να προγραμματιστούν. Πολύπλοκες καμπύλες θα απαιτούσαν χιλιάδες ξεχωριστά σημεία που συνδέονται με ευθείες γραμμές.

Υπάρχουν βασικά δύο κύριες οικογένειες μεθόδων παρεμβολών: 1) παρεμβολή αναφοράς παλμού, επίσης γνωστή και ως παρεμβολή σταθερής εκτόπισης, και 2) παρεμβολή αναφοράς λέξης, επίσης γνωστή και ως παρεμβολή σταθερού χρονικού διαστήματος. Στην παρεμβολή αναφοράς παλμού, ο υπολογιστής παράγει μία σειρά από παλμούς, και κάθε παλμός προκαλεί μία βασική κίνηση (1 BLU, μονάδα βασικού μήκους). Αυτοί οι αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι γενικού είδους, κάνουν δυνατή τη παραγωγή καμπυλών υψηλής ακρίβειας. Η ταχύτητα παρεμβολής είναι, ωστόσο, αρκετά περιορισμένη, και αυτό το σύστημα δεν είναι συνεπώς σε χρήση στα σύγχρονα CNC.

Στην παρεμβολή αναφοράς λέξης, για κάθε περίοδο δειγματοληψίας, ο υπολογιστής δίνει μία νέα τοποθέτηση αναφοράς για καθέναν από τους άξονες. Γενικά, όλες οι μέθοδοι παρεμβολών αναφοράς λέξης βασίζονται στην ανάλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων του ακόλουθου τύπου:

$$\begin{aligned} X(i+1) &= f[X(i), Y(i)] \\ Y(i+1) &= g[X(i), Y(i)] \end{aligned} \quad (5.1)$$

τις οποίες λύνει ο υπολογιστής με επαναληπτικές διαδικασίες. Όπως αναμένεται, αυτές δεν είναι γενικευμένες εξισώσεις, αλλά είναι αντιθέτως διαφορετικές για κάθε είδος καμπύλης που υφίσταται παρεμβολή. Για την κυκλική παρεμβολή, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος διαφορικής εξίσωσης:

$$\begin{aligned} X(i+1) &= \cos \alpha X(i) - \sin \alpha Y(i) \\ Y(i+1) &= \cos \alpha Y(i) + \sin \alpha X(i) \end{aligned} \quad (5.2)$$

όπου  $\alpha$  είναι η γωνία που περιγράφηκε μεταξύ δύο σημείων. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για τις τιμές ημιτόνου και συνημίτονου του  $\alpha$ : προσεγγίσεις Euler, Taylor, Tustin κλπ. Ως αποτέλεσμα, υπάρχουν γεωμετρικά σφάλματα, το ακτινικό σφάλμα ER, λόγω του σφάλματος αποκοπής, και το σφάλμα χορδής EH. Το ακτινικό σφάλμα είναι:

$$ER(i) = \sqrt{X^2(i) + Y^2(i)} - R \quad (5.3)$$

όπου R είναι η επιθυμητή ακτίνα. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι:

$$ER(i) = i(\sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} - 1)R \quad (5.4)$$

και, έτσι, το ακτινικό σφάλμα αυξάνεται με τον αριθμό των επαναλήψεων. Το σφάλμα χορδής EH δεν είναι αθροιστικό, και είναι εύκολο να αποδείξουμε ότι:

$$EH(i) = R - R(i) \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}} \quad (5.5)$$

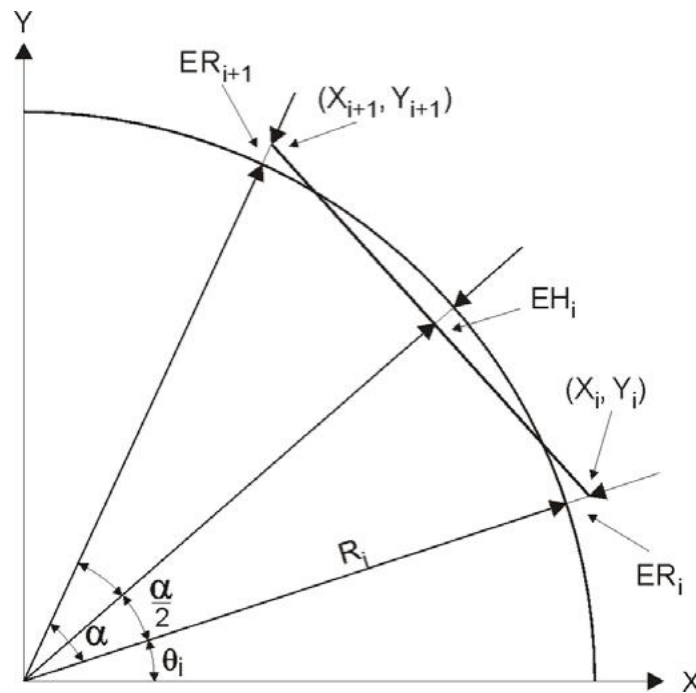
Πρέπει επίσης πάντα να ελέγχεται πως:

$$\begin{aligned} (ER)_{max} &\leq 1 \text{ BLU} \\ EH(i) &\leq 1 \text{ BLU} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Στο σχήμα 5.4, αυτά τα σφάλματα μπορούν να παρατηρηθούν στην παραγωγή των κυκλικών τόξων.

Στα σύγχρονα CNC, η κυκλική διαδικασία παρεμβολής δεν τείνει να χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις του τύπου που είδαμε, αλλά αντί για εκείνες, χρησιμοποιεί του παρακάτω τύπου:

$$\begin{aligned} X(i+2) &= F[X(i+1), X(i), Y(i+1), Y(i)] \\ Y(i+2) &= G[X(i+1), X(i), Y(i+1), Y(i)] \end{aligned} \quad (5.7)$$



Σχήμα 5. 4 – Σφάλματα περιγράμματος.

οι οποίες κάνουν απαραίτητο τον υπολογισμό ενός αρχικού σημείου, χρησιμοποιώντας μία από τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις, π.χ. μία προσέγγιση Taylor, αν και τα εναπομείναντα σημεία υπολογίζονται χρησιμοποιώντας αυτές τις νέες διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες είναι απλούστερες από τις προηγούμενες.

#### 5.3.1.1 Παραγωγή Τροχιάς

Οι τροχίες στα σύγχρονα CNC προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας το σύστημα CAD/CAM, το οποίο γενικά σπάει την καμπύλη 2D ή 3D σε μία σειρά από γραμμικά τμήματα που προσεγγίζουν την καμπύλη που είναι να περιγραφεί με την επιθυμητή ακρίβεια. Κάθε τμήμα παράγεται έπειτα από τον γραμμικό παρεισάγοντα του CNC.

Ωστόσο, υπάρχει μία διαμάχη στην σύνδεση με τον αριθμό των τμημάτων στα οποία το σύστημα CAD πρόκειται να διαιρέσει την καμπύλη. Είναι καλή ιδέα να μεγιστοποιήσουμε τον αριθμό των τμημάτων όσο περισσότερο γίνεται, και για να μειώσουμε τα σφάλματα περιγράμματος και για να ελαχιστοποιήσουμε την επίδραση της τμηματοποίησης που προκαλεί ασυνέχειες στα πρώτα παράγωγα, και οδηγεί σε μία μείωση στην ομαλότητα της καμπύλης.

Η αναπαράσταση μίας καμπύλης στα τμήματα εμφανίζει έναν αριθμό προβλημάτων:

Η μέση τιμή της τροφοδοσίας δεν επιτυγχάνει την επιθυμητή ταχύτητα, λόγω της αθροιστικής επίδρασης της μείωσης στο ποσοστό αναλογίας κατά την τελική επανάληψη του κάθε τμήματος.

Όταν κατεργαζόμαστε μικρά τμήματα, το εργαλείο δεν φτάνει ποτέ την επιθυμητή ταχύτητα, λόγω των φάσεων επιτάχυνσης/επιβράδυνσης, που εφαρμόζονται αυτόματα στην αρχή και στο τέλος του κάθε τμήματος από τους σερβομηχανισμούς ελέγχου της τοποθεσίας. Σαν αποτέλεσμα, η τροφοδοσία δεν είναι συνεχής σε ολόκληρη την καμπύλη, οδηγώντας σε μία φτωχή επιφάνεια φινιρίσματος. Επιπλέον, οι χρόνοι κατεργασίας γίνονται μακρύτεροι, επειδή η μέση ταχύτητα είναι πιο χαμηλή από την επιθυμητή.

Όταν ο αριθμός των τμημάτων είναι πολύ υψηλός, ένας μεγάλος αριθμός σημείων πρέπει να αποθηκευτούν στην μνήμη του CNC, και η CNC μνήμη είναι αρκετά ακριβή. Επιπλέον, η μνήμη αυτή θα μπορούσε να αποδειχτεί πολύ μικρή για να αποθηκεύσει τα πολλά τμήματα που απαιτούνται για να περιγραφεί ένα εξάρτημα με περίπλοκα περιγράμματα.

Το φορτίο επικοινωνίας μεταξύ του συστήματος CAD, όπου περιγράφονται τα τμήματα, και του συστήματος CNC, πρέπει να είναι μειωμένο. Αν αυξάνεται, μπορούν εύκολα να συμβούν σφάλματα μετάδοσης, όπως για παράδειγμα, ένα αποτέλεσμα διαταραχής θορύβου.

Για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν, θα ήταν πολύ χρήσιμο αν το CNC μπορούσε παρεισάγει γενικές καμπύλες σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στο σύστημα CAD να μεταφέρει μόνο την καμπύλη πληροφορίας στο CNC. Το CNC θα μπορούσε μετά να παράγει εσωτερικά την τροχιά, σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, έναν μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων που χρησιμοποιούν καμπύλες και επιφάνειες. Παραδείγματα συμπεριλαμβάνουν κύβους, μοντέλα αεροσκαφών, μοντέλα αμαξιών και πτερύγια.

Κανονικά, υπάρχει ένα σύνολο  $P_i$  σημείων εκκίνησης, τα οποία είναι να παρεμβληθούν με τέτοιο τρόπο, όπως να βρεθεί η μαθηματική έκφραση της συνάρτησης που περνάει μέσα από τα σημεία και ακόμη να συναντήσει συγκεκριμένες συνθήκες συνέχειας στις κλίσεις και στις καμπύλες (ομαλή καμπύλη). Ξεκάθαρα, μία λύση θα ήταν να παραχθεί ο απαιτούμενος βαθμός πολυωνύμου (Καρτεσιανή αναπαράσταση). Αυτό οδηγεί σε πολλά προβλήματα: παράγει πολλές ταλαντώσεις, η καμπύλη δεν έχει κάθετη εφαπτομένη, το σχήμα της καμπύλης αλλάζει αν η περιστροφή βρίσκεται στο σύνολο των σημείων και των κλίσεων, και επιπλέον, είναι δύσκολο να παραχθεί σε πραγματικό χρόνο.

Η τάση είναι συνεπώς να επεκταθεί το παραμετρικό διάνυσμα αναπαράστασης. Μία πολυωνυμική συνάρτηση τοποθετείται μεταξύ δύο σημείων, και τα τμήματα συνενώνονται, με την απαίτηση πως συγκεκριμένες συνθήκες συνέχειας πρέπει να είναι προσκολλημένες. Η γενική έκφραση αυτής της στοιχειώδους καμπύλης είναι:

$$\bar{P}(u) = \sum_{i=0}^n \bar{R}_i \varphi(u) \quad (5.8)$$

όπου  $\varphi(u)$  είναι μία παραμετρική, φυσιολογικά πολυωνυμική συνάρτηση.

Σημαντική έρευνα γίνεται όσον αφορά στις παραμετρικές παρεμβολές για την παραγωγή των καμπύλων που χρησιμοποιούν Bezier ή non-uniform rational β-spline, η τελευταία είναι γνωστή ως NURBS παρεμβολή. Γενικά, η καμπύλη που είναι να παραχθεί προσδιορίζεται από διαδοχικές σειρές σημείων ελέγχου, που συνδέονται από ομαλές καμπύλες που διασταυρώνονται με τα σημεία. Στην περίπτωση των β-splines, προσδιορίζονται από τελικά σημεία και σημεία ελέγχου που δεν διασταυρώνονται απαραίτητα με την καμπύλη αλλά αντίθετα ενεργούν για να «πιέσουν» την καμπύλη στην κατεύθυνση του σημείου. Ο όρος «λογική» αναφέρεται στο γεγονός ότι το βάρος της πίεσης για κάθε σημείο ελέγχου μπορεί να προσδιοριστεί. Ο όρος «ανομοιόμορφη» σημαίνει πως το διάνυσμα του κόμβου, το οποίο υποδηλώνει την ποσότητα της καμπύλης που επηρεάζεται από ένα συγκεκριμένο σημείο ελέγχου, δεν είναι απαραίτητα ομοιόμορφο. Συνεπώς, μία μονή καμπύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει έναν σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό περίπλοκων τύπων. Με τον χειρισμό των τιμών βάρους, των διανυσμάτων κόμβου και των σημείων ελέγχου, μία μεγάλη ποικιλία περίπλοκων σχηματισμών μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τους NURBS.

Οι παρεμβολείς NURBS, βασίζονται γενικά στην παραγωγή καμπυλών σε μία συνεχή ταχύτητα, εκτός από τις φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Οι πρώτοι αλγόριθμοι που είχαν παραχθεί, διατήρησαν ένα σταθερό μήκος χορδής. Το εργαλείο μετακινείται στην ίδια απόσταση για κάθε περίοδο δειγματοληψίας. Σαν αποτέλεσμα, τα σφάλματα χορδής εμφανίζονται σε τμήματα όπου η καμπυλότητα είναι πολύ μικρή, και θα μπορούσαν να υπάρχουν πολλά τέτοια τμήματα σε μία λειτουργία υψηλής ταχύτητας. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν με ένα ποσοστό τροφοδοσίας προσαρμογής, που εγγυάται πως το σφάλμα χορδής παραμένει μέσα στα μέγιστα όρια, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας παρεμβολής. Ο αλγόριθμος πρέπει να αναγνωρίζει πάντα την αναλογία μεταξύ του σφάλματος χορδής, του ποσοστού τροφοδοσίας και της ακτινικής καμπύλης.

Ωστόσο, οι επιδράσεις καμπυλότητας οδηγούν επίσης σε μεταβολές του ποσοστού στο οποίο απομακρύνεται το υλικό. Το ποσοστό απομάκρυνσης του υλικού είναι πιο υψηλό στις κοίλες περιοχές και χαμηλότερο στις κυρτές. Σαν αποτέλεσμα, μερικοί αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη την καμπυλότητα σε όλες τις στιγμές και πρέπει επομένως για το σκοπό αυτό, να μετατρέψουν το ποσοστό τροφοδοσίας. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο στην προστασία του εργαλείου και της μηχανής από τις εξαιρετικά υψηλές δυνάμεις κοπής, εξασφαλίζοντας ακρίβεια τμήματος. Σαν αποτέλεσμα, η πιο πρόσφατη έρευνα στο πεδίο αυτό στόχευε προς τον σχεδιασμό των υβριδικών παρεμβολών NURBS, π.χ. παρεμβολείς που όχι μόνο ελέγχουν και περιορίζουν το σφάλμα χορδής, αλλά επίσης εξασφαλίζουν ένα σταθερό ποσοστό απομάκρυνσης υλικού, βασιζόμενοι στους περιορισμούς και του εργαλείου και της μηχανής.

Οι παρεμβολείς NURBS προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς παρεμβολείς. Το πρώτο είναι το μέγεθος της μνήμης που απαιτείται στα CNC. Με έναν γραμμικό παρεμβολέα, η ποσότητα των δεδομένων που αποθηκεύονται στο CNC είναι πολύ υψηλή, αλλά με έναν παρεμβολέα NURBS το μόνο που χρειάζεται να αποθηκευτεί είναι οι κόμβοι, τα βάρη και τα σημεία ελέγχου, χρησιμοποιώντας προτάσεις όπως:

*NURBS (KNOT ΔXXX, ..., XXX, ΔWEIGHT ΔXXX, ...,XXX*

*ΔCONTROL POINT ΔXXX, YYY, ZZZ,.....,XXX, YYY, ZZZ)*

Το θέμα αυτό θα συνεχιστεί στην Ενότητα 5.7. Στους γραμμικούς παρεμβολείς, τα σφάλματα ελέγχου σχετίζονται με διακυμάνσεις στο ποσοστό τροφοδοσίας. Τα σφάλματα περικοπής και στρογγυλοποίησης, μπορεί να είναι σημαντικά αν αναζητούνται και τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας και οι υψηλές ταχύτητες. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις στο ποσοστό τροφοδοσίας ενός παραμετρικού παρεμβολέα είναι εξολοκλήρου λόγω των σφαλμάτων περικοπής, τα οποία είναι αρκετά μικρά όταν χρησιμοποιούνται υπολογισμοί κινητής υποδιαστολής. Οι χρόνοι

υπολογισμού είναι ξεκάθαρα πιο μικροί στην γραμμική παρεμβολή. Ωστόσο, αυτό συνήθιζε να είναι πιο σημαντικό στο παρελθόν, όταν οι υπολογιστές έχριζαν μικρότερης ισχύος επεξεργασίας.

Ένας ελεγκτής που είναι εξοπλισμένος με έναν γραμμικό παρεμβολέα, καθοδηγεί το σέρβο σύστημα να ανιχνεύσει μία σειρά από τμήματα. Σε κάθε σημείο σύνδεσης, υπάρχει μία ξαφνική αλλαγή στην κατεύθυνση της ανιχνεύσιμης ταχύτητας, εξαναγκάζοντας την επιτάχυνση σε ένα πεπερασμένο ποσοστό. Δεδομένων των φυσικών περιορισμών των κινητήρων, υπάρχουν πάντα σημαντικά σφάλματα ανίχνευσης στα σημεία συνένωσης μεταξύ των τμημάτων. Κανονικά, η επιτάχυνση σε αυτά τα σημεία δεν αγγίζει πεπερασμένα ποσοστά εξαιτίας των περιορισμών των ίδιων των κινητήρων. Παρ' όλα αυτά, είναι συνήθως υψηλή, η οποία οδηγεί σε έναν υψηλό βαθμό κραδασμού. Το πρόβλημα κραδασμού δεν συμβαίνει με τους παραμετρικούς παρεμβολείς, καθώς αλλαγές στην κατεύθυνση συμβαίνουν αργά, σε ολόκληρο το τόξο της καμπύλης. Σαν αποτέλεσμα, η επιτάχυνση και το πλάτος των κραδασμών είναι υψηλότερα για τους γραμμικούς παρεμβολείς.

Παρ' όλα τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα, οι παρεμβολείς NURBS δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στην τελευταία γενιά των CNC. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι μερικά προβλήματα που περιγράφηκαν νωρίτερα έχουν τώρα μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, μία τροχιά εργαλείου που παρουσιάστηκε χρησιμοποιώντας NURBS, βασισμένη σε μία επίπεδη διασταύρωση με μία επιφάνεια NURBS, δεν είναι ακριβής και απαιτεί τη χρήση ενός παράγοντα ανοχής παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιόταν στην απόκλιση χορδής, η οποία οδηγεί επίσης σε έλλειψη ακρίβειας. Επιπλέον, ο μεγάλος αριθμός τμημάτων που πρέπει να φτιάξει ένα CNC σε μία αναπαράσταση σημείου προς σημείο (point to point), δεν αποτελεί πλέον σοβαρό πρόβλημα για την τελευταία γενιά των CNC, αφού οι ταχύτητες επεξεργασίας των τμημάτων έχουν αυξηθεί σημαντικά (από 20ms, χιλιοστά του δευτερολέπτου, σε λιγότερο από 1ms). Το μειωμένο μέγεθος μνήμης που απαιτείται για μία αναπαράσταση NURBS δεν αποτελεί πλέον θέμα κλειδί, δεδομένου του μεγάλου μεγέθους φθηνής μνήμης που είναι τώρα διαθέσιμη στα CNC, μαζί με την δυνατότητα χρήσης δικτυωμένων συνδέσεων, με υψηλές δυνατότητες μετάδοσης. Ένα σημαντικό και ουσιαστικό πρόβλημα με μία αναπαράσταση καμπυλών και επιφανειών NURBS, είναι πως δεν είναι εύκολο να ερμηνευτεί, κάνοντας το πρακτικά αδύνατο για τον χειριστή να εισάγει ένα τμήμα προγράμματος απευθείας στην ίδια την μηχανή.

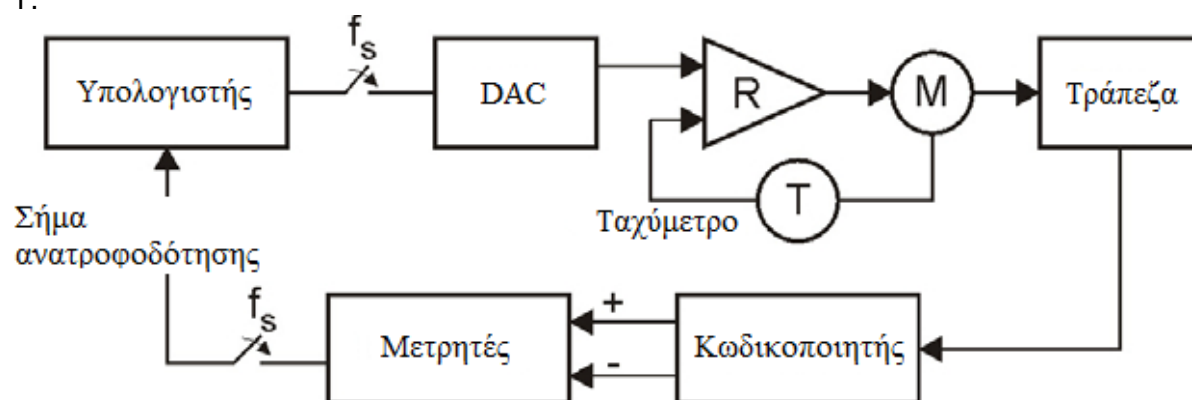
### 5.3.2 Ο Σερβομηχανισμός Ελέγχου της Θέσης

Αυτό θα είναι ένα δύσκολο σκιαγράφημα της τρέχουσας κατάστασης των σερβομηχανισμών για τον έλεγχο της θέσης των μηχανικών αξόνων, συγκεκριμένα στην κατεργασίας υψηλής ταχύτητας. Η λειτουργία ενός ελεγκτή αξόνων είναι να παρέχει τα κατάλληλα σήματα οδήγησης στους ενεργοποιητές (κινητήρες), ώστε η πραγματική θέση του άξονα ανιχνεύει με ακρίβεια την απαιτούμενη εντολή αναφοράς του απαιτούμενου άξονα που παρέχεται από την μονάδα παρεμβολών, με στόχο την εξάλειψη κάθε σφάλματος ανίχνευσης (σφάλμα θέσης) για κάθε οδηγούμενο άξονα. Γενικά, κάθε άξονας στην μηχανή οδηγείται από τον δικό του ελεγκτή, και θεωρείται πως υπακούει στο σήμα εντολής που παράγεται από τον αντίστοιχο παρεμβολέα. Υπάρχουν στην ουσία δύο τύποι ελεγκτών, ο ανοιχτού-βρόχου και ο κλειστού βρόχου. Οι ελεγκτές ανοιχτού-βρόχου χρησιμοποιούν βηματικούς κινητήρες, ενώ οι κλειστού-βρόχου χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα θέσης (ανάδραση), για να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την πραγματική θέση του άξονα σε κάθε σημείο κατά τη διάρκεια κίνησής του.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο βασικοί εναλλακτικοί τύποι ελεγκτή θέσης κλειστού-βρόχου. Στον πρώτο, ο οποίος είναι προσεγγιστικά συνεχόμενος, υπάρχει ένας εξωτερικός μετρητής που εργάζεται ως ένας καταχωρητής σφάλματος θέσης. Αν και, λόγω της ποσοτικοποίησης των αναφορών θέσης και της ανατροφοδότησης της θέσης όλα τα εσωτερικά σήματα είναι διακριτά, το θέμα είναι πως το σύστημα είναι οιονεί-συνεχές.

Η δεύτερη εναλλακτική περιλαμβάνει την χρήση ενός συστήματος ελέγχου δειγματοληπτούμενων δεδομένων. Αν και υπάρχει ένας αριθμός πιθανών εναλλακτικών, όλες εργάζονται σε μία βάση δειγματοληψίας με μία σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$ . Στις περιπτώσεις αυτές, όλες οι διαδικασίες πληροφορίας διεξάγονται κάθε  $T_s ms$ , ώστε αυτές οι αναφορές θέσης να αναβαθμιστούν για καθένα από τους άξονες κάθε  $T_s ms$ . Στο ενδιάμεσο, διατηρείται μία συνεχής τιμή. Εδώ η τιμή  $f_s$  της συχνότητας δειγματοληψίας παίζει σημαντικό ρόλο, όπως θα φανεί σε επόμενο σημείο, στην ποσοτικοποίηση σφαλμάτων περιγράμματος, και ακόμη στην βοήθεια καθιέρωσης του συστήματος, το οποίο θα μπορούσε να γίνει ασταθές σε υψηλές τιμές του  $K$ , στο κέρδος του συστήματος ανοιχτού-βρόχου.

Σε ένα CNCσύστημα δειγματοληπτούμενων δεδομένων, κάθε άξονας ελέγχεται ανεξάρτητα μέσω υπολογιστή σε ένα κλειστό σύστημα. Ένα τυπικό σύστημα φαίνεται στο σχήμα 5.5, όπου  $f_s$  είναι η συχνότητα δειγματοληψίας. Σε ένα σύστημα διαμόρφωσης περιγράμματος με δύο άξονες, αυτή η δομή πρέπει να διπλή, μία για τον άξονα  $X$  και μία ακόμη για τον άξονα  $Y$ .



Σχήμα 5. 5 – Τυπικός βρόχος ελέγχου ενός συστήματος δειγματοληπτούμενων δεδομένων.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στην απόδοση των συστημάτων διαμόρφωσης περιγράμματος είναι η ακρίβεια του γενικού συστήματος, ή το σφάλμα του συστήματος περιγράμματος. Το σφάλμα αυτό προσδιορίζεται ως η απόσταση σε κάθε στιγμή, μεταξύ του προγραμματισμένου μονοπατιού και του πραγματικού μονοπατιού που παράγεται από την μηχανή. Το πρόβλημα του σφάλματος περιγράμματος μπορεί να φανεί στην γραμμική κίνηση, στην κυκλική κίνηση, στην κοπή των γωνιών και, γενικά, στην κοπή κάθε περιγράμματος.

Για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος σερβο-ελέγχου πολλαπλών αξόνων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δύο ακόλουθες προσεγγίσεις:

Έλεγχος σφάλματος ανίχνευσης

Έλεγχος σφάλματος διαμόρφωσης περιγράμματος

### 5.3.2.1 Συστήματα Ελέγχου Σφάλματος Ανίχνευσης

Με τον έλεγχο του σφάλματος ανίχνευσης, το σύστημα επιχειρεί να μειώσει τα σφάλματα τοποθέτησης (σφάλμα ανίχνευσης) σε κάθε άξονα, αν και θα συμβεί επίσης μία έμμεση μείωση του σφάλματος διαμόρφωσης περιγράμματος. Με τον έλεγχο του σφάλματος διαμόρφωσης περιγράμματος, ο στόχος είναι η μείωση του σφάλματος διαμόρφωσης περιγράμματος, εκτιμώντας το σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιώντας αυτή την εκτίμηση στον έλεγχο ανατροφοδότησης.

Για να μειωθεί το σφάλμα περιγράμματος σε κινήσεις ευθείας γραμμής, είναι απαραίτητο για τα κέρδη ανοιχτού βρόχου και για τους δύο άξονες να είναι ίσα, και επίσης να κατανέμονται

οι υψηλότερες δυνατές τιμές. Το σφάλμα περιγράμματος στην γενιά των ευθειών γραμμών με έναν τρόπο σταθερής κατάστασης για έναν κλασικό βρόχο ελέγχου είναι:

$$e_e(t) = \frac{V \sin(2\sigma)}{2} \left[ \frac{1}{K_y} - \frac{1}{K_x} \right] \quad (5.9)$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα,  $\sigma$  είναι η γωνία και  $K$  είναι τα κέρδη ανοιχτού βρόχου για τους άξονες.

Έτσι:

$$e_{emax} = \frac{V}{2K} \frac{\Delta K}{K} \quad (5.10)$$

όπου:

$$\Delta K = K_x - K_y, K = \frac{K_x + K_y}{2} \quad (5.11)$$

και:

$$K_x K_y \cong K^2, \text{ with } \frac{\Delta K}{K} \text{ small} \quad (5.12)$$

Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως το σφάλμα περιγράμματος εξαρτάται κυρίως στον βαθμό ανισοροπίας  $\Delta K$  στα κέρδη ανοιχτού βρόχου για τους άξονες. Ο βαθμός ανισοροπίας είναι ανάλογος με την ταχύτητα, που μειώνεται σε όλες τις περιπτώσεις σε υψηλές τιμές  $K$  (μέση τιμή κέρδους). Αυτό είναι αλήθεια ακόμη και εκεί που υπάρχουν ξεχωριστά σφάλματα αξόνων όσον αφορά στον χρόνο.

Θεωρητικά, αν  $K_x = K_y$ , το σφάλμα διαμόρφωσης περιγράμματος είναι μηδέν, αν και μόνο κατά τη διάρκεια της μεθόδου σταθερής κατάστασης. Ωστόσο, στην πράξη υπάρχουν ένας αριθμός θεμάτων κλειδιά που δεν λαμβάνονται υπόψη εδώ: τριβή στις διαδρομές οδήγησης της κίνησης, δυνάμεις κοπής, κλπ. Πρέπει επίσης να γεννηθεί στο μυαλό το ότι ένα οιονεί συνεχές σύστημα έχει υποθεθεί μία συνεχής διατύπωση, π.χ.,  $T_s \cong 0$ .

Στην περίπτωση των οιονεί συνεχών συστημάτων, μπορεί να παρουσιαστεί πως το ακτινικό σφάλμα παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{e_r(t)}{R} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5.13)$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα,  $\omega_n$  είναι η φυσική συχνότητα και  $\zeta$  είναι ο παράγοντας απόσβεσης.

Στην περίπτωση των συστημάτων τύπου δειγματοληπτούμενων δεδομένων:

$$\frac{e_r(t)}{R} = 1 - |M| \quad (5.14)$$

όπου  $|M|$  είναι η μονάδα πλάτους του συστήματος απόκρισης ή κέρδους.

Συνεχίζοντας, μετά από πολλές προσεγγίσεις, λαμβάνεται η ακόλουθη έκφραση:

$$\frac{e_r}{R} = \left( \frac{T_s + 2\tau}{2K} - \frac{1}{2K^2} \right) \omega^2 \quad (5.15)$$

όπου  $\omega$ ,  $T_x = T_y = T_s$  τα (σταθερή χρόνου για τους κινητήρες),  $K_x = K_y = K$  και  $T_s$ , είναι η περίοδος δειγματοληψίας.

Όπως φαίνεται, το ακτινικό σφάλμα στον τρόπο σταθερής κατάστασης εξαρτάται έντονα από την γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Μπορεί επίσης να μελετηθεί το φαινόμενο της «περιόδου δειγματοληψίας». Η τιμή του έχει μία αρνητική επίδραση στα σφάλματα περιγράμματος. Οι τιμές  $K$  χρειάζεται να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερες. Παρ' όλα αυτά, λόγω των προβλημάτων έλλειψης ισορροπίας στην δυναμική των αξόνων, το σφάλμα περιγράμματος δεν εξαλείφεται, και παράγονται ελλειπτικά προφίλ. Στην λειτουργία κοπής μίας γωνίας, αν το κέρδος  $K$  είναι πολύ χαμηλό, το σύστημα είναι βραδύ, οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές. Αν το κέρδος είναι πολύ υψηλό, ο άξονας υπερβαίνει το επιθυμητό προφίλ, προκαλώντας υψηλότερες τιμές. Για να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια διαμόρφωσης περιγράμματος, το κύκλωμα πρέπει να είναι κρίσιμα σε αποκοπή, και τα κέρδη του συστήματος ταιριάζουν απόλυτα. Επιπλέον, μειώνοντας το ποσοστό τροφοδοσίας θα μειωθεί και το σφάλμα περιγράμματος, περιορίζοντας την κεντρομόλο επιτάχυνση.

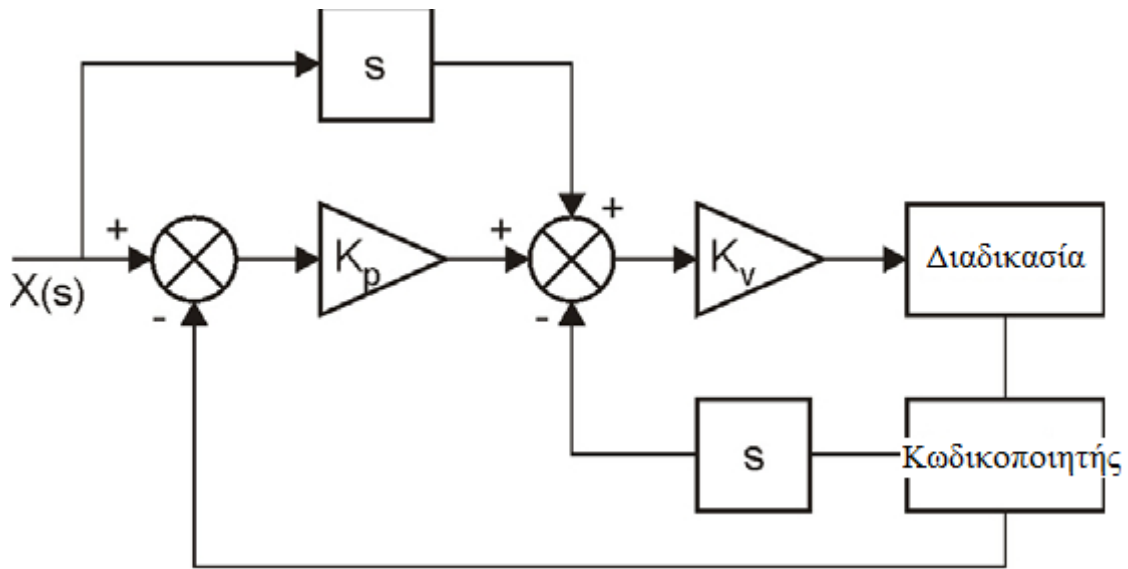
Ωστόσο, οι τιμές  $K$  δεν μπορούν να αυξηθούν αρκετά ώστε να προσπαθήσουν και να βελτιώσουν την δυναμική συμπεριφορά του σερβο-συστήματος. Η έρευνα έχει προχωρήσει για πολλές δεκαετίες προς άλλες μη-συμβατικές δομές για τους σερβο-ελεγκτές. Ο κύριος στόχος ήταν να βελτιωθούν οι αλγόριθμοι ελέγχου που αναζητούν να βελτιώσουν την ακρίβεια ανίχνευσης για κάθε ξεχωριστό άξονα.

Η πρώτη λύση που προτάθηκε ήταν οι ελεγκτές προσωτροφοδότησης. Σαν γενικός κανόνας, οι ελεγκτές αυτοί εστιάζουν στις διαταραχές που είναι γνωστό να επηρεάζουν την διαδικασία και μπορούν να μετρηθούν εξ αρχής, και χρησιμοποιούν ένα μοντέλο για να καθορίζουν το σήμα εντολής που απαιτείται για να μειωθεί το σφάλμα. Μία πρωτοπόρα συμβολή ήρθε από τον Tomizuka, ο οποίος ανέπτυξε το σύστημα του ελεγκτή ανίχνευσης σφάλματος μηδενικής φάσης (ZPETC), για να μειώσει τα σφάλματα ανίχνευσης στο μηδέν. Για να το κάνει αυτό, χρησιμοποίησε τις επιθυμητές μελλοντικές εξόδους για να αντισταθμίσει την καθυστέρηση στην συνάρτηση μεταφοράς κλειστού-βρόχου. Το ZPETC χρησιμοποίησε  $(d+1)$  βήματα μπροστά προς την επιθυμητή έξοδο  $Y_d(k + d + s)$ , όπου  $d$  ήταν ο αριθμός των βημάτων καθυστέρησης στην συνάρτηση μεταφοράς κλειστού-βρόχου και  $s$  ήταν ο αριθμός των μηδενικών στον κλειστό βρόχο, που δεν ήταν αποδεκτά για μία ακύρωση πόλου/μηδενικού. Ως μία τεχνική ακύρωσης μηδενικών/πόλων, αυτή η στρατηγική απέτυχε να εξαλείψει το σφάλμα πλάτους, ούτε έλαβε υπόψη τα προβλήματα κορεσμού, που είναι τυπικά στους ελεγκτές προσωτροφοδότησης. Σε μελέτη, παρουσιάστηκε ένας βελτιωμένος αλγόριθμος που ονομαζόταν «ZPETC επεκταμένου εύρους ζώνης». Αυτός ο αλγόριθμος υπολογίζει το σήμα προσωτροφοδότησης σε δύο στάδια. Στο πρώτο, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ZPETC, και στη συνέχεια αντισταθμίζει για το εναπομείναν ποσοστό σφάλματος, προσθέτοντας σήματα προσωτροφοδότησης, που επαναλαμβάνονται και βαθμιαία μειώνουν το σφάλμα ανίχνευσης.

Για να μειωθεί το πρόβλημα κορεσμού, σχεδιάστηκε μία μέθοδος αντιστάθμισης για τα σφάλματα ανίχνευσης χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο, το οποίο μείωνε το πρόβλημα αλλά αποτύγχανε να λάβει υπόψη την συντεταγμένη κίνηση των αξόνων.

Η προσωτροφοδότηση είναι μία μέθοδος αντιστάθμισης ανοιχτού βρόχου, και έτσι δεν λαμβάνει υπόψη τα σφάλματα διαμόρφωσης περιγράμματος όταν υπολογίζει τα σήματα ελέγχου. Μελέτη πρότεινε ένα νέο σχεδιασμό για έναν ελεγκτή PD που συμπεριλαμβάνει έναν βρόχο ταχύτητας προσωτροφοδότησης και λαμβάνει πλεονέκτημα πληροφορίας στα

όρια ρεύματος και τάσης, στο μοντέλο επεξεργασίας και τις πληροφορίες μελλοντικών μονοπατιών. Παρουσίασαν πως η μεγαλύτερη πηγή σφάλματος μονοπατιού στα τέλεια συντονισμένα συστήματα είναι τα σήματα ελέγχου που υπερβαίνουν τις ικανότητες ταχύτητας ή την επιτάχυνσης ενός ή περισσότερων αξόνων. Αυτές οι πηγές σφάλματος μπορούν να ελαχιστοποιηθούν υπολογίζοντας τις ικανότητες των αξόνων και τροποποιώντας την ταχύτητα τροφοδοσίας του εργαλείου, έτσι ώστε αυτά τα όρια να μην ξεπερνιούνται ποτέ. Η ίδια μελέτη ανέφερε επίσης πως τα όρια της ταχύτητας και της επιτάχυνσης δεν έπρεπε να είναι ποτέ σταθερά, αλλά έπρεπε να υιοθετηθούν σε όλες τις ικανότητες του συστήματος ως ένα σύνολο, όταν σχεδιάζονται οι τροχιές. Το σχήμα 5.6 δείχνει ένα διάγραμμα από αυτόν τον ελεγκτή προσωποτροφοδότησης για ένα άξονα X.



Σχήμα 5. 6 – Ελεγκτής προσωποτροφοδότησης.

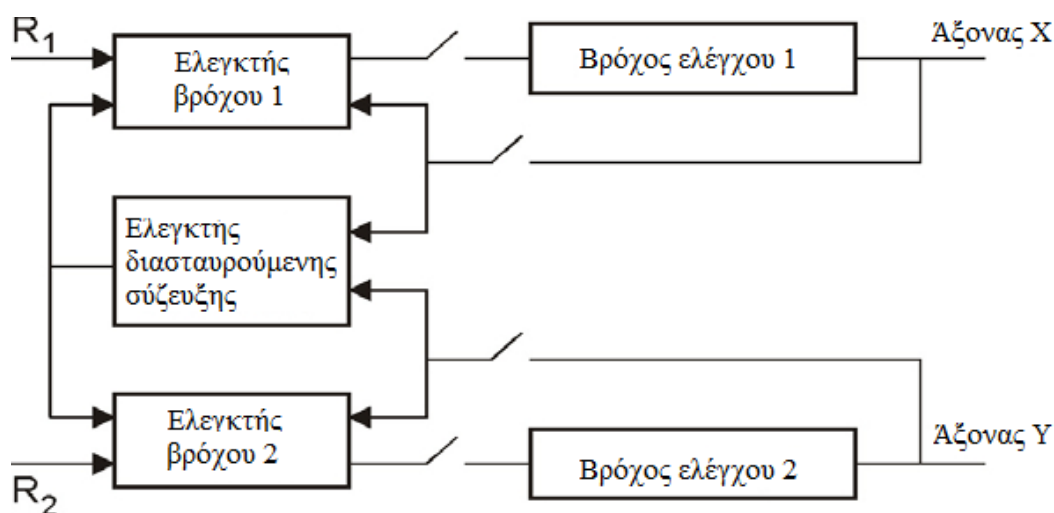
Για να εφαρμοστούν αυτές οι στρατηγικές, είναι απαραίτητο για τα CNC να χρησιμοποιούν την τεχνική «look-ahead», αξιολογώντας κάθε αλλαγή κίνησης στους άξονες εκ των προτέρων. Όταν επιβεβαιώνονται οι αλλαγές στην τροχιά, ο έλεγχος προσαρμόζει την τιμή της ταχύτητας τροφοδοσίας, δίνοντας επαρκή χρόνο στους σέρβο να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν ώστε να διατηρήσουν την τροχιά. Η μηχανή μπορεί μετά να κάνει κινήσεις ευθείας γραμμής, να ανιχνεύσει γωνίες ή να κάνει ευρείες καμπύλες στην υψηλότερη απαιτούμενη ταχύτητα τροφοδοσίας, και η ταχύτητα τροφοδοσίας θα μειωθεί αυτόματα, όταν η καμπυλότητα της τροχιάς το απαιτεί. Χωρίς την συνάρτηση look-ahead, η τιμή της ταχύτητας τροφοδοσίας θα έπρεπε να προγραμματιστεί για την χειρότερη δυνατή περίπτωση, όπως μία απότομη αλλαγή της κατεύθυνσης. Ο αριθμός των τμημάτων που πρόκειται να αναλυθούν εκ των προτέρων, είναι μία δυναμική σχήμα, καθώς θα ποικίλει ανάλογα με τα περιγράμματα του υλικού, τις απαιτήσεις ακριβείας και τα χαρακτηριστικά της ίδιας της μηχανής. Όσο πιο αργή είναι η μηχανή και όσο πιο μικρή η επιτάχυνσή της, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των τμημάτων look-ahead που απαιτείται.

Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης της ακριβείας του συστήματος σέρβο-ελέγχου, είναι εκτιμώντας την πραγματική θέση του εργαλείου (κεντρικό σημείο εργαλείου). Η ανατροφοδότηση πληροφοριών στο κεντρικό σημείο του εργαλείου, θα αποτρέψει τα σφάλματα λόγω της ευκαμψίας των μηχανικών στοιχείων μεταξύ της δομής της μηχανής και του εργαλείου. Ωστόσο, τα στοιχεία της μέτρησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν την ακριβή θέση του σημείου του εργαλείου, είναι πολύ περίπλοκα και ακριβά, χωρίς να αναφερθεί η δυσκολία εφαρμογής, κάνοντας την πρακτική τους χρήση ακόμη πιο αδύνατη.

Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, εργασίες βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη για τον σχεδιασμό στρατηγικών για την εκτίμηση της θέσης που είναι κατειλημμένη από το κεντρικό σημείο του εργαλείου, αντί για την μέτρηση της χρησιμοποιώντας την προσαρμογή του χάρακα στην δομή της μηχανής. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα της δυναμικής μεταξύ των δύο σημείων, και η θέση του κεντρικού σημείου του εργαλείου εκτιμάται χρησιμοποιώντας έναν καθιερωμένο παρατηρητή που βασίζεται σε ένα προηγούμενα αναγνωρισμένο μοντέλο. Σκοπός αυτής της πρόβλεψης θα είναι να εκτιμηθούν οι εσωτερικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατεργασίας. Η προαναφερθείσα εργασία συμπεριλαμβάνει ένα παράδειγμα αυτού του σχεδιασμού πρόβλεψης που παράγει τις επιδράσεις των διαταραχών όπως είναι οι δυνάμεις κοπής και τριβής.

### 5.3.2.2 Συστήματα Ελέγχου Σφάλματος Διαμόρφωσης Περιγράμματος

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις σε κάθε ξεχωριστό άξονα απόδοσης, αν και δεν εγγυώνται καλό γενικό έλεγχο όλων των μηχανικών αξόνων, και ότι είναι εκείνοι που τελικά θα παρέχουν πραγματική ακρίβεια στην μηχανή σαν σύνολο. Για πραγματική γενική ακρίβεια, όπως αναφέρθηκε, το σφάλμα περιγράμματος πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο. Η πρώτη λύση παρουσιάστηκε από τον Koren, ο οποίος πρότεινε μία νέα αρχιτεκτονική γνωστή και ως αρχιτεκτονική ελεγκτή διασταυρούμενης σύζευξης (CCC), η οποία κατασκευάστηκε μεταξύ και παράλληλα με τους αξονικούς βρόχους ελέγχου. Η αρχιτεκτονική CCC υπολογίζει το σφάλμα περιγράμματος σε πραγματικό χρόνο και ενεργοποιεί μία εντολή ελέγχου να εξαλείψει το σφάλμα. Το σύστημα CCC εκτιμά το σημείο στην επιθυμητή τροχιά που είναι πιο κοντά στην θέση της εγκατάστασης, και χρησιμοποιεί την πληροφορία αυτή για να καθορίσει το σφάλμα για κάθε άξονα. Αυτό το σήμα σφάλματος χρησιμοποιείται έπειτα, σε συνδυασμό με τα άλλα, για να ελέγξει την συντονισμένη θέση. Η λειτουργία ενός CCC, βασίζεται στην παροχή διορθώσεων ανάλογες όχι μόνο με τα ξεχωριστά αξονικά σφάλματα αλλά επίσης και με το σφάλμα περιγράμματος. Ένα πρόβλημα των CCC είναι ότι δεν εργάζονται για να αντισταθμίσουν μελλοντικές αλλαγές τροχιάς. Δεν παρέχουν ενέργειες μείωσης της ταχύτητας, για παράδειγμα, σε γωνίες ή σε οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο που θα απαιτούσε περισσότερη επιβράδυνση από ότι θα μπορούσε να παρέχει ένας από τους άξονες. Η σύσταση, συνεπώς, είναι η χρήση στρατηγικών CCC σε συνδυασμό με κάποιου είδους σχεδιασμού του ποσοστού τροφοδοσίας. Το [σχήμα 5.7](#) δείχνει την βασική δομή ενός ελεγκτή CCC.



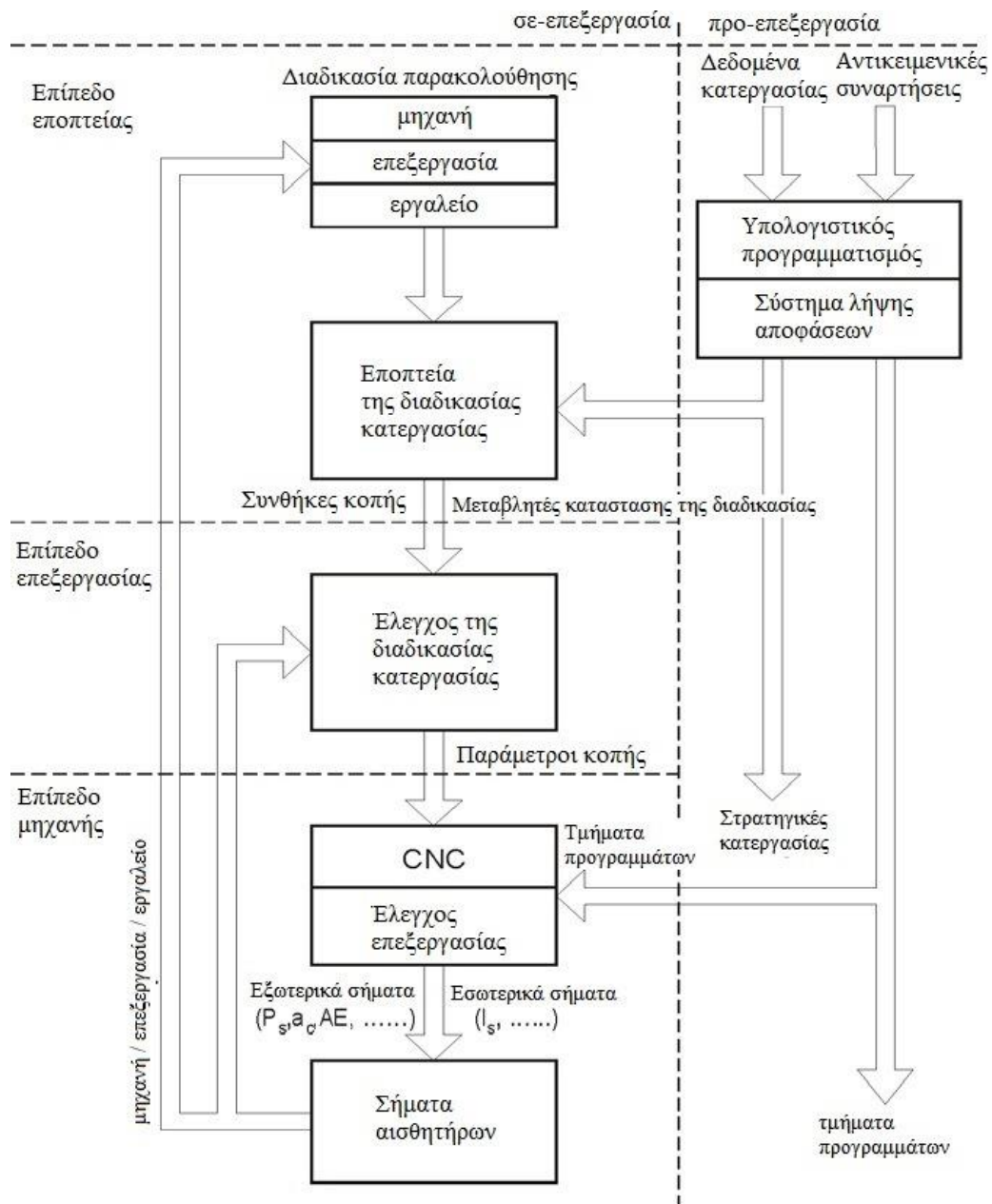
Σχήμα 5. 7 – Βασική δομή ενός ελεγκτή CCC.

Επιπλέον, άλλοι αλγόριθμοι ελέγχου, όπως ο επαναληπτικός έλεγχος, ο έλεγχος πρόβλεψης, ο έλεγχος υιοθέτησης και ο βέλτιστος έλεγχος, έχει αναπτυχθεί με στόχο την βελτίωση της απόδοσης διαμόρφωσης του περιγράμματος στις νέες εργαλειομηχανές,

συγκεκριμένα στις νέες διαδικασίες κατεργασίας υψηλής ταχύτητας. Η χρήση των βασισμένων σε Η/Υ συστημάτων CNC έχει προμηθεύσει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ. Ο τελικός στόχος θα είναι η κατεργασία των εξαρτημάτων με τα μέγιστα επίπεδα και στην ακρίβεια της επιφάνειας και στην ακρίβεια των διαστάσεων.

#### **5.4 Προηγμένα CNC: Ιεραρχικός Έλεγχος Πολλαπλών Επιπέδων**

Όταν σχεδιάζονται συστήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη μίας ιδανικής μονάδας κατεργασίας, θα φαινόταν ξεκάθαρο πως το είδος της απόδοσης που αναζητείται δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την δομή ελέγχου των επιπέδων που περιγράφηκε παραπάνω. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα ιεραρχικό σύστημα ελέγχου θα έκανε την διαδικασία πιο προβλέψιμη στα χαμηλότερα επίπεδα ελέγχου και συνεπώς θα μείωνε την πολυπλοκότητα του απαιτούμενου σχήματος ελέγχου. Διαισθητικά, θα φαινόταν χρήσιμο να διαχωριστεί μεταξύ τριών τουλάχιστον ιεραρχικών επιπέδων: το επίπεδο μηχανής, το επίπεδο επεξεργασίας και το επίπεδο εποπτείας. Ο έλεγχος του μηχανικού επιπέδου αποσκοπεί στην βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της ίδιας της εργαλειομηχανής. Ο έλεγχος του επιπέδου-διαδικασίας στοχεύει στην αύξηση της παραγωγικότητας μεγιστοποιώντας τις τεχνολογικές παραμέτρους που υπόκεινται σε περιορισμούς (επιτρεπτός χώρος εργασίας). Ο στόχος ελέγχου του επιπέδου εποπτείας είναι να διαχειριστεί την διαδικασία κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο, υπό τη μορφή μίας αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό, φυσικά, δεν είναι το μόνο πιθανό σχήμα για ένα σύστημα ιεραρχικού ελέγχου, αλλά είναι ένα που αισθανόμαστε πως είναι το πιο διαισθητικό. Αυτή η νέα ιεραρχική αρχιτεκτονική πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα ισχυρό σύστημα παρακολούθησης που μπορεί να παρακολουθεί την διαδικασία της κατεργασίας, την κατάσταση της μηχανής και την κατάσταση του εργαλείου κοπής.



Σχήμα 5. 8 – Ιεραρχικό σύστημα πολλαπλών επιπέδων για την αυτοκίνηση των διαδικασιών κατεργασίας.

Αυτή η προτεινόμενη αρχιτεκτονική θα δούλευε σαν ένα σύστημα σε επεξεργασία «in-process» (on-line). Θα ήταν επίσης απαραίτητο να παρέχει ολόκληρο το σύστημα με μία ισχυρή μονάδα υποστήριξης, που θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνει και γεωμετρικούς και, συγκεκριμένα, διαδικαστικούς προσομοιωτές. Αυτή η μονάδα θα λειτουργούσε πριν την επεξεργασία «pre-process» (off-line) και θα ήταν υπεύθυνη για την τροφοδότηση κάθε μονάδας κατεργασίας με τα σχετικά βελτιωμένα τμήματα προγραμμάτων (G-code) και με τις στρατηγικές κατεργασίας που σχεδιάστηκαν για τα διαφορετικά στάδια στην κατεργασία κάθε εξαρτήματος.

Επομένως, μία πιθανή δομή για ένα σύστημα προηγμένου ελέγχου υψηλής ταχύτητας, και υψηλής απόδοσης διαδικασία κατεργασίας, απεικονίζεται στο σχήμα 5.8. Δείχνει τα τρία οριζόντια επίπεδα ελέγχου που περιγράφηκαν παραπάνω, και τα δύο κάθετα επίπεδα, το ένα από αυτά πριν την επεξεργασία, και το άλλο στην επεξεργασία.

### 5.4.1 Ο Έλεγχος της Διαδικασίας Κατεργασίας

Ο στόχος είναι να αυξηθεί η παραγωγικότητα μεγιστοποιώντας τις τεχνολογικές παραμέτρους, συγκεκριμένα τις ταχύτητες τροφοδοσίας και τις ταχύτητες κοπής, που υπόκεινται στους πραγματικούς περιορισμούς της ίδιας της μηχανής. Σε αυτό το επίπεδο επεξεργασίας, η έρευνα εστιάζει στον έλεγχο των μεταβλητών που επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα της μηχανής, συγκεκριμένα των δυνάμεων κοπής και της ροπής. Ο σχεδιασμός συστημάτων για τον έλεγχο αυτών των μεταβλητών δεν είναι εύκολη εργασία λόγω των μεταβολών της διαδικασίας, οι οποίες είναι πάντα τύπου μεταβλητού-κέρδους, και προκαλούν μείωση της απόδοσης, και ακόμη και προβλήματα σταθερότητας. Οι σταθερού κέρδους ελεγκτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, έτσι πρέπει να εφαρμόζονται τεχνικές προσαρμοστικού ελέγχου. Διαφορετικές τεχνικές προσαρμοστικού ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια, όπως είναι οι μέθοδοι μεταβλητού ελέγχου με σαφή εκτίμηση παραμέτρων. Ενώ οι τεχνικές αυτές δεν έχουν εγκαταλειφθεί, η κύρια ώθηση στις σημερινές έρευνες κατευθύνεται προς τη χρήση μοντέλων αναφοράς και αυστηρών τεχνικών ελέγχου. Αυτές οι στρατηγικές ενσωματώνουν πάντα, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, ένα μοντέλο ισχύος κοπής/ροπής που, μόλις υπολογιστεί, χρησιμοποιείται για να σχεδιάσει έναν προσαρμοστικό ελεγκτή. Στην πράξη, ωστόσο, χρησιμοποιούνται ακόμη οι τεχνικές teach-in, συγκεκριμένα στην εφαρμογή της συνάρτησης AFC (έλεγχος προσαρμοστικού ποσοστού τροφοδοσίας) σε μερικά σύγχρονα CNC.

Η βιβλιογραφία των ειδικών περιέχει διαφορετικά μοντέλα αναφοράς επιπρόσθετα με το κλασικό μοντέλο μεταβλητού κέρδους. Τα είδη των ελεγκτών που χρησιμοποιούν ένα μοντέλο αναφοράς μπορούν να χωριστούν σε πέντε διαφορετικές τεχνικές: τους ελεγκτές γραμμικοποίησης, τους ελεγκτές λογαριθμικού μετασχηματισμού, τους μη-γραμμικούς ελεγκτές, τους προσαρμοστικούς ελεγκτές και τους εύρωστους ελεγκτές. Η αναφορά περιλαμβάνει μία ολοκληρωμένη μελέτη όλων αυτών, με μία ανάλυση της παροδικής (transient) ανάλυσης και της ευρωστίας της σταθερότητας όλων αυτών των συστημάτων. Οι ελεγκτές κοπής ισχύος, οι οποίοι είναι μία συχνότητα AFC σε κάποια τρέχοντα CNC, ξεκινούν με την συνήθη αναπαράσταση της κοπής ισχύος F:

$$F = k d^{\beta} s^{\gamma} f^{\alpha} \quad (5.16)$$

όπου k είναι το κέρδος επεξεργασίας, d είναι το βάθος κοπής, s είναι η ταχύτητα κοπής, f είναι η τροφοδοσία και α, β και γ είναι οι συντελεστές που περιγράφουν τις μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ F και των παραμέτρων κοπής d, s και f. Τυπικά, η μεταβλητή ελέγχου είναι η τροφοδοσία, έτσι το κέρδος της διαδικασίας ισχύος είναι συνεπώς:

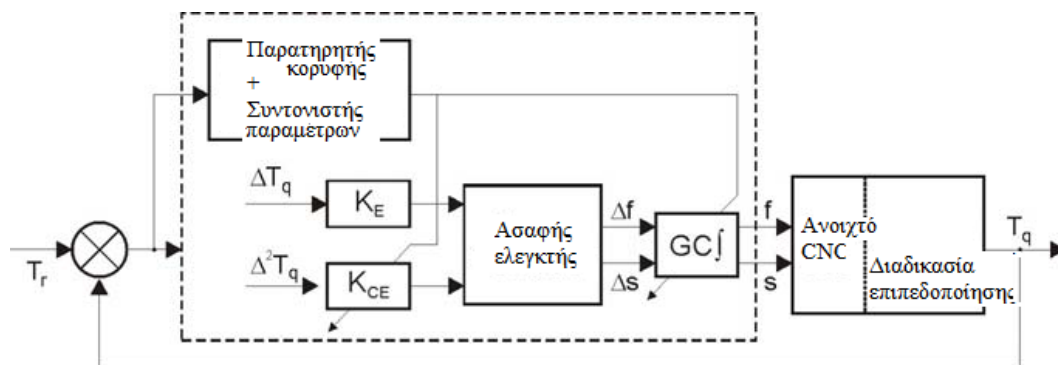
$$\theta = k d^{\beta} s^{\gamma} \quad (5.17)$$

το οποίο, είναι όπως φαίνεται, μεταβλητό και εξαρτώμενο απευθείας από το s και d.

Αν και αυτές οι στρατηγικές προσαρμοστικού ελέγχου δεν είναι ακόμη πλήρως αναβαθμισμένες μέσα στην διαδικασία ελέγχου, τουλάχιστον φαίνεται δίνουν μερικές ιδέες για χρήση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η παραγωγή μεμονωμένων εξαρτημάτων, τα εργαλεία κοπής, τα εξαρτήματα και τα υγρά αλλάζουν συνεχώς, που σημαίνει πως δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να εφαρμοστούν μοντέλα αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, η καλύτερη λύση μπορεί να είναι οι ελεγκτές μεταβλητού κέρδους με σαφή εκτίμηση παραμέτρων. Στα περιβάλλοντα μαζικής παραγωγής, όπου τα λειτουργικά χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά, ένας ελεγκτής λογαριθμικού μετασχηματισμού θα μπορούσε να είναι καλή λύση, καθώς είναι ο λιγότερο ευαίσθητος στις μεταβολές των παραμέτρων και των αβεβαιοτήτων του μοντέλου. Στην μαζική παραγωγή, όπου η εργασία γίνεται με ένα συγκεκριμένο φάσμα λειτουργικών χαρακτηριστικών, ο εύρωστος ελεγκτής προσφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα, καθώς εγγυάται συγκεκριμένες ιδιότητες γύρω από ένα συγκεκριμένο φάσμα

λειτουργικών συνθηκών. Η ευρωστία αυτών των ελεγκτών αποτελούν ένα χαρακτηριστικό υψηλής αξίας σε τέτοιες διαδικασίες παραγωγής.

Δεδομένου ότι η αβεβαιότητα και οι ανολοκλήρωτες πληροφορίες αποτελούν εγγενή χαρακτηριστικά της διαδικασίας κατεργασίας, η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) θα μπορούσε να προσφέρει μερικές αξιόπιστες λύσεις, με τον σχεδιασμό των ελεγκτών να βασίζεται σε τεχνικές AI (ασταθής λογική, ουδέτερα δίκτυα και γενετικοί αλγόριθμοι). Σήμερα, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και η ασταθής λογική (FL) είναι πιθανών οι πιο διαδεδομένες τεχνικές AI στην αναγνώριση και στον σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου. Τα δίκτυα προσωτροφοδότησης και συγκεκριμένα τα δίκτυα αντίληψης (perceptron) πολλαπλών επιπέδων, είναι τα πιο πολυχρησιμοποιημένα στον μη-γραμμικό έλεγχο. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας FL, η ανθρώπινη γνώση μπορεί να ενσωματώνεται μέσα στο σύστημα ελέγχου, εκφραζόμενη με ποιοτικούς όρους.



Σχήμα 5. 9 – Σχήμα αυτοδιαμορφώμενου ελεγκτή που εφαρμόζεται στην διαδικασία φραιζαρίσματος.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση των ασαφών ελεγκτών, οι μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως το σφάλμα κοπής ισχύος,  $\Delta F$ , και η αλλαγή στο σφάλμα κοπής ισχύος,  $\Delta^2 F$ . Η χειραγωγημένη μεταβλητή είναι συνήθως το ποσοστό τροφοδοσίας της μηχανής,  $f$ , ενώ η ταχύτητα κοπής αναφέρεται γενικά σταθερή (MISO, πολλαπλών εισόδων – μονής εξόδου). Ωστόσο, έρευνες γίνονται όσον αφορά στις άλλες μεταβλητές εισόδου που είναι πιο εύκολο να μετρηθούν, συμπεριλαμβάνοντας την ροπή κοπής και την στιγμιαία ισχύ που καταναλώνεται από την ταχύτητα της ατράκτου του κινητήρα. Ένα διάγραμμα ενός ασαφούς ελεγκτή προσωπικού συγχρονισμού για μία διαδικασία φραιζαρίσματος φαίνεται στο σχήμα 5.9, όπου  $T_r$  είναι η τιμή αναφοράς της ροπής και  $T_q$  είναι η μετρήσιμη ροπή μίας ανοιχτής αρχιτεκτονικής CNC. Όπως μπορεί να φανεί, μία αρχιτεκτονική MIMO (πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων) έχει υιοθετηθεί εδώ, με δύο χειραγωγημένες μεταβλητές,  $\Delta s$  και  $\Delta f$  (ποσοστά των τιμών που προγραμματίστηκαν στο CNC). Ολόκληρο το σχήμα ελέγχου, συμπεριλαμβάνοντας έναν μηχανισμό αυτό-διαμορφούμενο και έναν ασαφή ελεγκτή, φαίνεται στο σχήμα 5.9. Ο παράγοντας κλιμάκωσης της εξόδου (GC), παρέχει τις τελικές ενέργειες που θα εφαρμοστούν στο CNC.

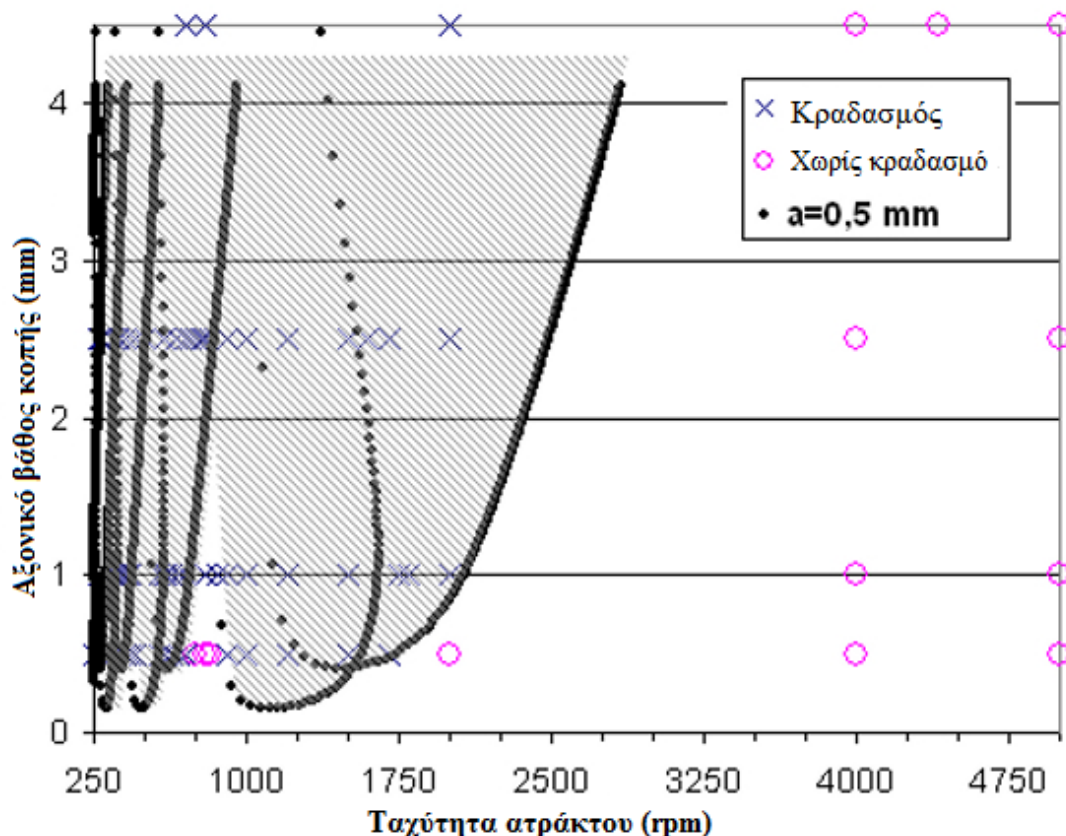
$$\begin{aligned} f(k) &= f(k-1) + GC \Delta f(k) \\ s(k) &= s(k-1) + GC \Delta s(k) \end{aligned} \quad (5.18)$$

#### 5.4.2 Ο Εποπτικός Έλεγχος της Διαδικασίας Κατεργασίας: Μεταβλητές Αξίες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο στόχος του εποπτικού ελέγχου είναι να εξασφαλίσει την βέλτιστη λειτουργική διαχείριση της διαδικασίας που βασίζεται σε μία ή περισσότερες μεταβλητές αξίες και στην αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση. Στο επίπεδο αυτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που δεν έχουν αντιμετωπιστεί και δεν έχουν αντισταθμιστεί στο σχεδιασμό των δύο χαμηλότερων επιπέδων. Στο επίπεδο αυτό, πρέπει επίσης να χρησιμοποιηθούν οι μεταβλητές αξίες που προγραμματίζονται για κάθε ξεχωριστή

περίπτωση. Οι στρατηγικές κατεργασίας μπορούν ακόμη να προγραμματιστούν, που μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της μηχανικής κατεργασίας για κάποιο συγκεκριμένο εξάρτημα. Μία βέλτιστη λειτουργία όπως αυτή, μπορεί να εξαρτάται από τις εργασίες που πρόκειται να ολοκληρωθούν, όπως, για παράδειγμα, ακατέργαστο, μερικώς κατεργασμένο ή τελικό φινίρισμα. Σε κάθε περίπτωση, αυτό το υψηλότερο επίπεδο πρέπει να τροφοδοτεί τα χαμηλότερα επίπεδα, σε πραγματικό χρόνο, με τις συνθήκες κοπής και τις μεταβλητές της κατάσταση επεξεργασίας, όπως είναι οι δυνάμεις κοπής ή οι τιμές ροπής, που θα καθιερώσουν με τη σειρά τους τις αναφορές των σχετικών ελεγκτών που είναι τοποθετημένοι στο επίπεδο επεξεργασίας. Τα παρακάτω μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές αξίας: 1) μεγιστοποιώντας την παραγωγικότητα; 2) ελαχιστοποιώντας τα ποσοστά φθοράς του εργαλείου; 3) αποφεύγοντας τους αναπαραγωγικούς κραδασμούς; 4) ελαχιστοποιώντας το κόστος; 5) εξασφαλίζοντας την ποιότητα της επιφάνειας; 6) διασφαλίζοντας την ποιότητα των διαστάσεων. Με βάση την χρησιμοποιούμενη στρατηγική, όπως αναπαριστάται από μία συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, κάθε μία από αυτές τις μεταβλητές πρέπει να ζυγίζονται κατά έναν μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.

Αφού λήφθηκε υπόψη η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας στο επίπεδο επεξεργασίας, οι πιο σημαντικές λειτουργίες συμπεριλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση των ποσοστών φθοράς του εργαλείου, την αποφυγή αναδημιουργίας κραδασμών και την εγγύηση ποιότητας της επιφάνειας. Θυμηθείτε, στις μέρες μας οι άνθρωποι δεν αγοράζουν απλά μηχανές, ή ακόμη βελτιωμένες διαδικασίες. αγοράζουν παραγωγή, δηλαδή, εξαρτήματα; και συγκεκριμένες ιδέες γίνονται θεμελιωδώς σημαντικές.



Σχήμα 5. 10 – Διάγραμμα σταθερότητα λοβών: βάθος κοπής / ταχύτητα ατράκτου (λευκό: σταθερή ζώνη, γκρι: ζώνη κραδασμών). Παράδειγμα κατεργασίας λεπτού δαπέδου (1mm πάχος) χρησιμοποιώντας ένα αξονικό βάθος κοπής 0.5mm, εκτέλεση ελέγχων και διαγραμμάτων στο University of Basque Country.

Οι μεταβλητές αξίες πρέπει να ελέγχονται σε αυτό το εποπτικό επίπεδο, αν και η σημασία της εκτίμησης και της πρόβλεψης μερικών μεταβλητών πρέπει πάντα να υπάρχει στο μυαλό

μας. Η μέτρηση και η πρόβλεψη αυτών των μεταβλητών θα συζητηθεί στην Ενότητα 5.5. Αυτή η ενότητα θα ασχοληθεί μόνο με μερικές από τις ιδέες που αφορούν στα συστήματα αυτόματου ελέγχου.

Η τρέχουσα βιβλιογραφία των ειδικών χρησιμοποιεί δύο είδη μεθόδων για να διευθύνει το ζήτημα της αποφυγής κραδασμών; αυτό το πρόβλημα κατεργασίας περιγράφεται στην Ενότητα 3.5.3. Η πρώτη βασίζεται στο διάγραμμα σταθερότητας λοβών (off-line) και η δεύτερη στην τροποποίηση της ταχύτητας κοπής (on-line).

Τα διαγράμματα σταθερότητας λοβού προτείνουν δύο περιοχές στο επίπεδο που σχηματίζεται από το βάθος κοπής ενάντια την ταχύτητα της ατράκτου (Σχήμα 5.10). Η επάνω περιοχή είναι ασταθής, ενώ η πιο χαμηλή περιοχή είναι σταθερή. Ένας αριθμός μεθόδων έχουν ερευνηθεί για να αναγνωριστεί η σταθερότητα των διαγραμμάτων λοβού για μία συγκεκριμένη μηχανή και ένα συγκεκριμένο εργαλείο. Γενικά, οι ερευνώμενες μέθοδοι εμφανίζουν μία έλλειψη ακρίβειας. Υπάρχει συνεπώς μία τάση ανάπτυξης των αναλυτικών και πειραματικών μεθόδων, στις οποίες οι συναρτήσεις μεταφοράς των υπαρχόντων συστημάτων με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας, αναγνωρίζονται από μη καταστροφικά, δυναμικής δόμησης τεστ. Με τον τρόπο αυτό, η φυσική συχνότητα, η ακαμψία του δυναμικού συστήματος και ο συντελεστής απόσβεσης για κάθε μέθοδο κραδασμού μπορεί να βρεθεί μέσω πειρατισμού.

Η πιο κοινώς χρησιμοποιούμενη μέθοδος καταστολής των κραδασμών αυτόματα, είναι η ρύθμιση της ταχύτητας της ατράκτου. Μία έντονα χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι να κυμαίνεται η ταχύτητα της ατράκτου, συνήθως κατά έναν ημιτονοειδή τρόπο. Ενώ τέτοιες μεθοδολογίες μπορεί να είναι υποσχόμενες, το βασικό τους μειονέκτημα είναι πως δεν υπάρχει θεωρία που να τις υποστηρίζει. Κανείς δεν ξέρει τον τρόπο παραγωγής της προσαρμοστικής διαμόρφωσης.

Μία άλλη σημαντική λειτουργία προς εφαρμογή σε αυτό το εποπτικό επίπεδο, είναι η παρακολούθηση της διαδικασίας τραχύτητας της επιφάνειας (συμπεριλαμβάνοντας την ακεραιότητα της επιφάνειας, με την επιβολή των συνθηκών κοπής που εξασφαλίζουν την επιθυμητή τραχύτητα της επιφάνειας στο τελικό κατεργασμένο εξάρτημα. Ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου της τραχύτητας της επιφάνειας θα μπορούσε να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας μία μονάδα αισθητήρων, που μπορεί να προβλέψει την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Για να γίνει αυτό, θα ήταν απαραίτητο να αναλυθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την τραχύτητα της επιφάνειας  $R_a$  και να τροποποιηθούν εκείνες οι τιμές κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ώστε να ληφθούν οι επιθυμητές τιμές  $R_a$ . Όπως δηλώθηκε στην Ενότητα 5.5.3, υπάρχει μία εκτεταμένη σειρά παραγόντων που επηρεάζουν την  $R_a$ . Από τους παράγοντες, η τροφοδοσία και ο έλεγχος της ταχύτητας κοπής, φαίνεται να είναι η πιο βιώσιμη βιομηχανική λύση. Άλλες μεταβλητές, για παράδειγμα, το βάθος κοπής, απαιτούν το τμήμα του προγράμματος να ξαναγραφτεί, ώστε να αποκλειστεί ο αυτόματος έλεγχος  $R_a$ . Ελέγχοντας την εμφάνιση αναπαραγωγικού κραδασμού, ποσοστού τροφοδοσίας και ταχύτητας κοπής, μπορεί να αναπτυχθεί μία αποτελεσματική διαδικασία αυτόματου ελέγχου, για την τραχύτητα της επιφάνειας των κατεργασμένων εξαρτημάτων.

## 5.5 Το Σύστημα Αισθητήρων για την Διαδικασία Κατεργασίας

Όπως αναφέρθηκε ήδη, αν ποτέ επιτευχθεί μία «ιδανική μονάδα κατεργασίας», ένα σύστημα κατεργασίας αισθητήρων, θα είναι ένα στοιχείο κλειδί στην αναγνώριση του τρόπου συμπεριφοράς της μηχανής, της επεξεργασίας και του εργαλείου κοπής. Τέτοιοι αισθητήρες μαζί με τις μονάδες μεταπαραγωγής, σχηματίζουν αυτό που προσδιορίζεται στο σχήμα 5.8 όπως οι μονάδες παρακολούθησης της μηχανής, η επεξεργασία και το εργαλείο.

Οι ποικίλες στρατηγικές παρακολούθησης ταξινομούνται ως «προπαραγωγικές», «σε παραγωγή» και «μεταπαραγωγικές», ανάλογα με την κλίμακα του χρόνου στην οποία εκτελείται η παρακολούθηση, και διαιρούνται σε μεθοδολογίες απευθείας σύνδεσης (online) και εκτός γραμμής (offline). Μερικές στρατηγικές ταξινομούνται στην βάση του τελικού σκοπού της διαδικασίας παρακολούθησης; αυτές συμπεριλαμβάνουν παρακολούθηση φθοράς του εργαλείου (TWM), παρακολούθηση κατάστασης του εργαλείου (TCM), παρακολούθηση και έλεγχο της κατεργασίας, πρόβλεψη ποιότητας της επιφάνειας, ανίχνευση φθοράς του εργαλείου (TWD), ανίχνευση βλάβης του εργαλείου (TFD), πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθηση της διάρκειας ζωής της μηχανής, πρόβλεψη σταθερότητας των κραδασμών, πρόβλεψη της παραγωγής θερμότητας και της θερμοκρασίας.

Τα παρακάτω σημεία μπορεί να γίνουν και για τις μεθοδολογίες offline αλλά και για τις online:

#### Παρακολούθηση offline

Προ-επεξεργασία. Αυτός ο τύπος παρακολούθησης βασίζεται περισσότερο σε μία αναλυτική μελέτη που επιχειρεί να προβλέψει τις διαφορετικούς παραμέτρους που θα επηρεάσουν την διαδικασία. Μπορεί να υποστηρίζεται από μία ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρακολουθήθηκαν νωρίτερα. Βασικά, αυτό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση αυτού του είδους είναι τα κατάλληλα εργαλεία IT για να εκτελούνται προσομοιώσεις της επεξεργασίας. Ωστόσο, η αρχική εγκατάσταση απαιτεί προηγούμενη μέτρηση όλων των στοιχείων ή των εξαρτημάτων, των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται. Η άμεση μέτρηση αυτών των στοιχείων ή εξαρτημάτων αυτών εκτελείται συνήθως χρησιμοποιώντας όργανα όπως ηλεκτρονικά ή οπτικά μικροσκόπια, οπτικές κάμερες, μετρητές τραχύτητας, μετρητές σκληρότητας, μικρόμετρα, κλίμακες Vernier, κλπ.

Μετεπεξεργασία. Ακριβώς όπως οι μετρήσεις πρέπει να ληφθούν πριν από την επεξεργασία για να ληφθούν οι αρχικές συνθήκες, η τελική συνθήκη των στοιχείων που μελετώνται, (κυρίως το εξάρτημα και το εργαλείο κοπής), πρέπει επίσης να ελεγχθούν αφού ολοκληρωθεί η κατεργασία.

#### Παρακολούθηση online

Η κατάσταση παρακολούθησης της μηχανής φαίνεται σαν μία εργασία συντήρησης, που είναι ανεξάρτητη από την πραγματική διαδικασία κατεργασίας και προετοιμάζει την μηχανή για το ξεκίνημα ή την συνέχεια της διαδικασίας της μηχανικής κατεργασίας. Στην περίπτωση αυτή, η επεξεργασία παρακολούθησης θα λάβει υπόψη παράγοντες όπως την κατάσταση των εδράνων και των γραναζιών (τροχών), την εμφάνιση κραδασμών στα κινούμενα εξαρτήματα, την καταλληλότητα θερμοκρασίας των στοιχείων της μηχανής και της κατανάλωσης των συστημάτων μετάδοσης κίνησης.

Πίνακας 5.1 – Μέτρηση τύπου οργάνου που ταξινομείται από σήματα κατεργασίας.

Τύπος σήματος	Φυσική ποσότητα (τύπος αισθητήρα)	Τοποθεσία	Παράμετρος προς επεξεργασία	Μέτρηση
Δύναμη	Ισχύς	Άξονας κινητήρα	Ισχύς ατράκτου Ισχύς τροφοδοσίας άξονα	Ράγισμα και φθορά εργαλείου Ισχύς κοπής/ αναλ. ισχύος οδηγ.
	Ροπή (στατική, δυναμική)	Τράπεζα, εργαλείο	Ροπή εργαλείου	Φθορά εργαλείου Θραύσμα εργαλ. Μή συνθήκη θραυσμ. κοπής Βάθος σπειρομ.
	Απόσταση	Στοιχείο μεταδ. ισχύος	Εμμεση μέτρηση ισχύος	Αναγν. ραγίσμα- τος
	1-3άξονική ισχύς αισθ.	Περιοχή υπό ισχύεις παράλληλη στον άξονα εκτοπισής	Μονή ή πολ/πλή ισχύς άξονα	Αναγνώριση επεξεργασίας
Ακουστική εκτομπή	Ακουστική εκτομπή (ΑΕ)	Διασυνδ. με το κομμάτι εργασίας. Κοντά στην πηγή σήματος	Ανάλογα σήματα ισχύος κοπής	Σήματα υψ. συχν. της διαδικασίας κοπής και θραύση εργαλείου
	Ακουστική εκτομπή (ΑΕ) αισθ. υγρών	Κοντά σε θορυβώδη περιοχή	Ανάλογα σήματα ισχύος κοπής	Κύματα υψ. συχν. των επεξ. κομμα- τιών στα κινητά ή περιστροφικά στοι- χεία, ή υλικά με πο- λύ τραχιές επιφα- νίες
	Αισθητ. (ΑΕ) περιστροφικής ακουστικής εκτομπής	Κοντά σε πηγή σήματος	Ανάλογα σήματα ισχύος κοπής	Σήματα υψ. συχν. της διαδικασίας κοπής και θραύση εργαλείου

Τύπος σήματος	Φυσική ποσότητα (τύπος αισθητήρα)	Τοποθεσία	Παράμετρος προς επεξεργασία	Μέτρηση
Δόνηση	Επιταχυνσιό- μετρα	Κοντινή πηγή σήματος: ατράκτου ή επεξ. κομ/τιου	Μηχανική δόνηση της δομής της μηχανής στην διαδικασία κατεργασίας	Φθορά εργαλείου Αύξηση Συγκρούσεις Υπερβ. δονησεις στα σφαιρικά εδρανα και στις ατράκτους
	Υπερηχητικός αισθητήρας	Κοντινή πηγή σήματος	Δονήσεις υπερηχητικού φάσματος	Φθορά εργαλείου Αύξηση Συγκρούσεις Υπερβ. δονησεις στα σφαιρικά εδρανα και στις ατράκτους
	Φράγμα λείζερ	Ανάλογη με την επιφάνεια μέτρησης	Ράγισμα και φθορά εργαλείου	Θερμικές παραμορφ. Σκληρότητα επεξ. κομματιού Σημάδια κραδασμών Σημαδ. τροφ/σίας
Θερμο- κρασία	Θερμο- ζεύγος	Σε επαφή με το επεξ. κομ/τι	Επίδραση θερμοκρ. στην φθορά και στην διαδ. κατεργασίας	Βαθμιαία θερμοκρασία
	Θερμό- γραφική κάμερα	Κοντά σε πηγή σήματος	Επίδραση θερμοκρ. στην φθορά και στην διαδ. κατεργασίας	Κατανομή βαθμ. θερμοκρασίας στην διαδ/σία κοπής

Αν και έχει γίνει κάποια εις βάθος έρευνα στην περιοχή αυτή, δεν εφαρμόζεται ακόμη ευρέως, και χρησιμοποιούνται μόνο πολύ απλοί αισθητήρες, βασιζόμενοι γενικά στην εφαρμογή σταθερής αξίας των υψηλότερων και χαμηλότερων ορίων, σε ολόκληρη την διαδικασία κατεργασίας.

Ο στόχος παρακολούθησης της διαδικασίας κατεργασίας είναι να ανιχνευτούν οι τύποι διαταραχών ή λειτουργίας, που έχουν μία αρνητική επίδραση στην επεξεργασία και στην ποιότητα των εξαρτημάτων. Η διαδικασία της παρακολούθησης μπορεί να συμπεριλαμβάνει όλα τα φαινόμενα που αντέχουν κάθε συσχέτιση με την ποιότητα επιφάνειας του υλικού που κατεργάζεται (π.χ. κραδασμός), τους παράγοντες που οδηγούν σε σφάλματα σχεδιασμού της διαδικασίας κατεργασίας (π.χ. ακρίβεια όσον αφορά στις διαστάσεις) και τις αναμενόμενες συνθήκες κατεργασίας (π.χ. συγκρούσεις).

Τα πιο κατάλληλα όργανα μέτρησης που επιλέγονται εξαρτώνται από την διαδικασία και τους περιορισμούς υπολογιστικής ισχύος, όπως και από την μεταβλητή που πρόκειται να παρακολουθηθεί, και αυτά με την σειρά τους εξαρτώνται από τις παραμέτρους που πρόκειται να εκτιμηθούν. Η βιβλιογραφία που έχει εκδοθεί στον τομέα αυτό προτείνει τα όργανα μέτρησης που αναφέρονται στον Πίνακα 5.1, με βάση τους στόχους και τους περιορισμούς.

### 5.5.1 Σωστές Συνθήκες Παρακολούθησης

Προσπάθειες ανάπτυξης της κατάλληλης χρήσης οργάνων παρακολούθησης, αποκαλύπτουν πως και η διαδικασία κοπής, αλλά και η εργαλειομηχανή έχουν περιορισμούς. Οι πιο σημαντικοί είναι οι ακόλουθοι:

- Ταχύτητα ατράκτου.
- Συχνότητες υψηλής τάξης που προκαλείται από μηχανικούς κραδασμούς.
- Εμφάνιση αρμονικών υψηλής τάξης.
- Εύρος ζώνης, ευαισθησία, όριο επίδρασης και συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα.
- Εύρος ζώνης. Ένα υψηλό εύρος ζώνης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αν υπάρχει υποψία παρουσίας υψηλών κύριων συχνοτήτων και υψηλών αρμονικών.
- Ευαισθησία. Κρίσιμη όταν μετρώνται οι τιμές σημάτων που είναι πολύ μικρές αλλά πολύ σημαντικές.
- Όριο επίδρασης. Μπορεί να μην είναι τόσο ευαίσθητο αν ο εξοπλισμός δεν εμπλέκει στοιχεία που υπόκεινται στην άμεση επίδραση.
- Συχνότητα συντονισμού. Μπορεί να επηρεάζεται σημαντικά, ανάλογα με τον εξοπλισμό. Θα μπορούσε να γίνει κορεσμένη απρόσμενα νωρίς. Η πιθανότητα εμφάνισης αρμονικών πάνω από την κύρια συχνότητα αυξάνει με τον αριθμό των κινούμενων εξαρτημάτων που έρχονται σε επαφή το ένα με το άλλο σε σχετικά υψηλές ταχύτητες.
- Συχνότητα δειγματοληψίας: Οι υψηλές κύριες συχνότητες απαιτούν υψηλές συχνότητες δειγματοληψίας, για την απόκτηση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας δεδομένων για κάθε κύκλο εργαλείου.
- Απόκτηση ανάλυσης: Προσδιορίζει την ακρίβεια με την οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις. Όσο μεγαλύτερη η ανάλυση, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια.
- Ταχύτητα λήψης: Σε υψηλές ταχύτητες απόκτησης, η κάρτα πρέπει να μπορεί να κατεβάσει τα δεδομένα μέσα στην μνήμη γρήγορα. Η εσωτερική μνήμη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα από το δείγμα.
- Απαιτήσεις Η/Υ: Στην παρακολούθηση και τον έλεγχο πραγματικού χρόνου, κάθε αποκτημένο δεδομένο πρέπει να επεξεργάζεται όσο πιο γρήγορα γίνεται. Η χωρητικότητα επεξεργασίας του Η/Υ πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να αποθηκεύει την πληροφορία που λαμβάνει στον σκληρό του δίσκο πριν να γεμίσει ολόκληρη η μνήμη.
- Πλατφόρμα επικοινωνίας με το PLC: Αυτό πρέπει να επιτρέπει την ροή των δεδομένων μεταξύ του Η/Υ και του PLC (ProgrammableLogicController) για συμβεί σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει πως το πρωτόκολλο πρέπει να επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας; η επικοινωνία με το PLC πρέπει να είναι όσο πιο άμεση γίνεται, και κάθε ενδιάμεση καθυστέρηση πρέπει να αποφεύγεται; και τέλος, το λειτουργικό σύστημα πρέπει να είναι σε πραγματικό χρόνο , ώστε να εγγυάται την μικρότερη δυνατή απώλεια χρόνου κατά τη λήψη και αποστολή των δεδομένων μεταξύ των απομακρυσμένων εφαρμογών και του συστήματος παρακολούθησης. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου λειτουργικού συστήματος βασίζεται στον τρόπο που διαχειρίζεται τις προτεραιότητες. Σε αντίθεση με τα άλλα συστήματα όπως τα Windows και τα Linux, αυτά τα συστήματα αποδίδουν μεγαλύτερη προτεραιότητα στην εκτέλεση των εφαρμογών που την απαιτούν.

### 5.5.2 Χαρακτηριστικά Κατεργασίας και η Μέτρησή τους

Αναφορές έχουν αναγνωρίσει και ταξινομήσει τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να παρακολουθηθούν κατά τη διάρκεια κατεργασίας. Κάθε χαρακτηριστικό που πρόκειται να παρακολουθηθεί μπορεί να αναγνωριστεί με έναν ή περισσότερες παραμέτρους μέτρησης. Ο Πίνακας 5.2 δείχνει αυτά τα χαρακτηριστικά κατεργασίας και τους πιθανούς παράγοντες

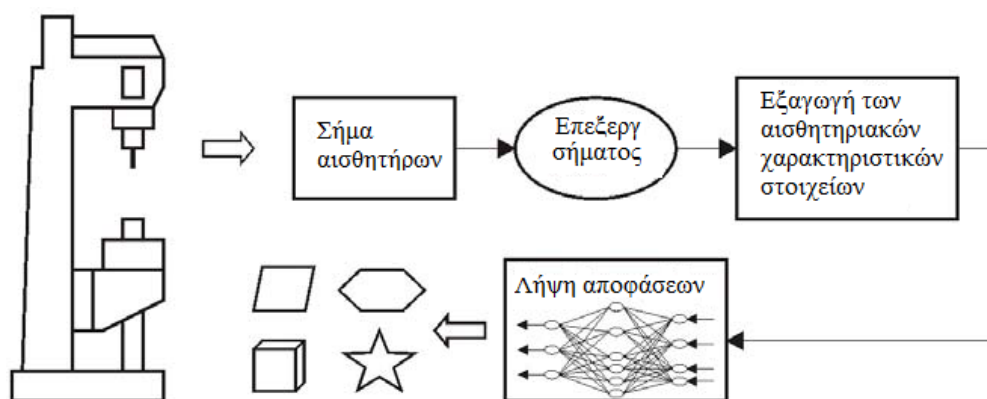
μέτρησής τους, προσφέροντας μία ιδέα της ευελιξίας με την οποία μπορούν να παρακολουθηθούν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά.

Η συνάρτηση που εκτελείται από την παρακολούθηση κάθε χαρακτηριστικού φαίνεται στον Πίνακα 5.3. Κάθε συνάρτηση που φαίνεται στον πίνακα αυτό μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας στρατηγικές online και offline.

Η γενική δομή ενός συστήματος κατάστασης της παρακολούθησης (CMS) φαίνεται στο σχήμα 5.11 και περιλαμβάνει τις επόμενες λειτουργικές μονάδες: 1) σήματα αισθητήρων, 2) επεξεργασία σήματος, 3) εξαγωγή των χαρακτηριστικών στοιχείων των αισθητήρων, 4) λήψη αποφάσεων και ταξινόμηση, 5) διορθωτικές ενέργειες. Ο στόχος στην πράξη, αποτελείται από την επιλογή ενός συστήματος πολλαπλών αισθητήρων και από τρόπους επεξεργασίας των σημάτων που θα επιτρέψουν την λήψη αποφάσεων και την λειτουργία ταξινόμησης με τα ελάχιστα επίπεδα σφάλματος όσον αφορά στις πιθανές αποτυχίες της διαδικασίας. Όπως δείχνει και ο Πίνακας 5.3, ποικίλες παράμετροι μέτρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά κατεργασίας.

**Πίνακας 5. 2 – Χαρακτηρισμός παραγόντων κατεργασίας και μετρήσεων**

Παράμετροι μέτρησης	Χαρακτηριστικό προς παρακολούθηση						
	Κραδασμός	Δυνάμεις κοπής	Σχημ. θραύσματος	Θερμοκρ. κοπής	Φθορά εργαλείου	Βλάβη εργαλείου	Σφάλματα επιφάνειας
Βάθος κοπής	x	x	x		x		
Ταχύτητα ατράκτου	x	x	x				
Ακουστική εκτομμή	x	x			x	x	
Δύναμη κοπής	x	x	x		x	x	x
Κραδασμοί τροφοδοσίας	x	x					
Τροφοδοσία			x	x	x		x
Φθορά εργαλείου			x				
Υπέρυθρη εικόνα				x			
Μήκος επαφής θραύσματος				x			
Φινίρισμα επιφάνειας					x		
Διάσταση εξαρτήματος					x		
Γεωμετρία εργαλείου					x		
Κραδασμοί εργαλείου					x	x	
Ισχύς ατράκτου					x		
Απόκλιση εργαλείου							x
Ταχύτητα κοπής							x
Θερμοκρασία κοπής							x



Σχήμα 5. 11 – Η γενική δομή ενός συστήματος κατάστασης της παρακολούθησης.

**Πίνακας 5. 3 – Λειτουργίες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά παρακολούθησης.**

Χαρακτηριστικό	Λειτουργία
Κραδασμός	Εκτίμηση κραδασμού Αποφυγή κραδασμού Καταστολή κραδασμού
Δυνάμεις κοπής	Εκτίμηση δυνάμεων κοπής Διατήρηση προδιαγραφών
Σχηματισμός θραυσμάτων	Εκτίμηση σχηματισμού Διατήρηση προδιαγραφών
Θερμοκρασία κοπής	Εκτίμηση θερμοκρασίας Διατήρηση προδιαγραφών
Φθορά Εργαλείου	Εκτίμηση φθοράς Διατήρηση προκαθορισμένου ποσοστού φθοράς Αποξήμωση φθοράς
Βλάβη εργαλείου	Εκτίμηση, αποφυγή και ανίχνευση βλάβης
Σφάλματα επιφάνειας	Εκτίμηση φινιρίσματος και ανοχών επιφάνειας Διατήρηση προδιαγραφών

Μία λεπτομερής ανάλυση της παρακολούθησης της κατάστασης του εργαλείου (TCM) και της πρόβλεψης της ποιότητας της επιφάνειας δίνεται στο σχήμα 5.11, στην θεώρηση της συγκεκριμένης σημασίας των δύο αυτών διαδικασιών.

### 5.5.3 Δύο Περιπτώσεις Μελέτης

Για πολλά χρόνια, μεγάλο κομμάτι έρευνας έχει εστιάσει στην περιοχή των συνθηκών παρακολούθησης εργαλείων, δεδομένου ότι η βλάβη του εργαλείου είναι η αιτία περίπου 20% της μείωσης του χρόνου κατεργασίας και η φθορά του εργαλείου έχει μία καθαρή επίδραση στην ποιότητα των παραγόμενων εξαρτημάτων, στην ακρίβεια των διαστάσεών τους, στην ποιότητα της επιφάνειάς τους, και στην ακεραιότητα της επιφάνειάς του. Οι τεχνικές τεχνητής όρασης έχουν υπάρξει επιτυχημένες στο εργαστήριο και έχουν δώσει πολύ ακριβή αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, έχουν δουλευτεί μόνο στο εργαστήριο και πάντα σε ένα περιεχόμενο μετεπεξεργασίας, π.χ., όταν το εργαλείο δεν είναι πια σε επαφή με το εξάρτημα. Ο φωτισμός, έχει καταλήξει να είναι ένα υψηλά κρίσιμο στοιχείο. Η πλειοψηφία των βελτιώσεων που έγιναν στο εργαστήριο, περιορίστηκαν σε μετρήσεις 2D. Λίγα αποτελέσματα έχουν παραχθεί σε 3D, και αυτά μόνο για την φθορά κρατήρα.

Οι δυνάμεις, και οι στατικές και οι δυναμικές, που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια κατεργασίας, επηρεάζονται από την φθορά του εργαλείου. Το στοιχείο ακτινικής ισχύος θα φαινόταν να είναι το πιο ευαίσθητο στην φθορά. Μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιούνται

οι σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων. Η σχέση μεταξύ της ισχύος τροφοδοσίας και της ισχύος κοπής, θα φαινόταν να είναι υψηλά ευαίσθητη στην φθορά στην πλευρά του εργαλείου.

Παρόμοια, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής, το εξάρτημα υφίσταται σημαντική πλαστική παραμόρφωση, η οποία παράγει ακουστικά σήματα (ακουστικές εκπομπές). Αυτά τα υψηλής συχνότητας ακουστικά σήματα (50KHz έως 1MHz) έχουν υψηλή ευαισθησία στην φθορά. Δυνατή συσχέτιση έχει φανεί μεταξύ της τιμής της ακουστικής εκπομπής RMS και της φθοράς του εργαλείου. Η μεταβλητή είναι μία από τις πιο ευαίσθητες παραμέτρους, με το μεγαλύτερο ποσοστό να φαίνεται στο τέλος της διάρκειας ζωής του εργαλείου. Αυτά τα εργαστηριακά αποτελέσματα δεν έχουν ακόμη τοποθετηθεί στην βιομηχανική πρακτική, λόγω της έλλειψης επαρκούς γνώσης σχετικά με την φυσική σημασία των σημάτων ακουστικής εκπομπής και της μεγάλης ευαισθησίας τέτοιων σημάτων στην τοποθεσία του αισθητήρα.

Μέχρι σήμερα, η λειτουργία όλων σχεδόν των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης του εργαλείου, που βασίζεται σε πολύ απλές στρατηγικές που περικλείουν ανίχνευση όταν η κατάσταση του εργαλείου καταπατήσει κάποιο συγκεκριμένο προκαθορισμένο όριο. Αυτές οι στρατηγικές χρειάζεται να ρυθμίζονται συνεχώς, δεδομένης της ευρείας ποικιλίας καταστάσεων υπό τις οποίες γίνεται η κατεργασία. Η προσθήκη μεγαλύτερης «ευφυΐας» στην διαδικασία παρακολούθησης, μαζί με την ικανότητα προσαρμογής στην ίδια την διαδικασία παραγωγής, ενώ διατηρείται η απλότητα της λειτουργίας για τον τελικό χρήστη, αποτελούν ακόμη το κέντρο εστίασης στην έρευνα για πολλές ομάδες ερευνητών.

Από τα πιο πρόσφατα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν, βγαίνει το συμπέρασμα πως οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες είναι: 1) οι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, 2) οι αισθητήρες κραδασμού / επιτάχυνσης, 3) οι αισθητήρες στατικής και δυναμικής ισχύος κοπής, και 4) οι αισθητήρες ροπής της κοπής. Το μέρος όπου τοποθετούνται οι αισθητήρες πάνω στην μηχανή είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, αφού το σύστημα πρέπει, σε όλες τις περιπτώσεις, να είναι όσο το δυνατόν πιο επεμβατικό.

Μόλις τα σήματα που λήφθηκαν από τους αισθητήρες επεξεργαστούν κατάλληλα, τα πρότυπα πρέπει να εξαχθούν, είτε στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας. Μόλις εξαχθούν τα πρότυπα, η διαδικασία λήψης αποφάσεων πρέπει να λάβει χώρα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο τύποι μεθόδων: Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένες στατιστικές μέθοδοι είναι εκείνες της στατιστικής ανάλυσης, της ανάλυσης χρονοσειρών και της διακριτικής ανάλυσης.

Σήμερα, υπάρχει μία ευρεία ποικιλία τύπων μεθόδων: 1) ασαφούς λογικής 2) δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης, 3) υβριδικά συστήματα (π.χ. νευροασαφή συστήματα), 4) πιθανολογικά δίκτυα (π.χ. δίκτυα Bayesian). Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως στα ερευνητικά έργα, στα οποία χρησιμοποιούνται και τα εποπτικά δίκτυα και τα μη-εποπτικά δίκτυα. Τα τελευταία, είναι πολύ στην μόδα τον τελευταίο καιρό, με δίκτυα όπως είναι τα ART (θεωρία προσαρμοστικής εκπομπής), KSOM (χάρτες Kohonen), και RBF (συνάρτηση ακτινικής βάσης). Όλες αυτές οι νευρωνικές δομές είναι ανταγωνιστικού-μαθησιακού τύπου.

Η κατάσταση του εργαλείου έχει αξιοσημείωτη επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας, της ακεραιότητας της επιφάνειας, της διαστασιακής ποιότητας, των επιπέδων κραδασμού της μηχανής και γενικά της απόδοσης της μηχανής. Είναι συνεπώς σημαντικό να εξασφαλιστεί πως αυτά τα συστήματα δεν αντιπροσωπεύουν μόνο την διχοτόμηση νέου/φθαρμένου, αλλά επίσης τις παραμέτρους φθοράς που επιτρέπουν την ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών, εξεζητημένων στρατηγικών αλλαγής εργαλείου.

Η ποιότητα της επιφάνειας μετράται υπό τη μορφή ακεραιότητας της επιφάνειας, η οποία δεν περιγράφει μόνο την τοπολογία μίας επιφάνειας αλλά επίσης λαμβάνει υπόψη τις μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες που συνεπώς παίζουν έναν ζωτικό ρόλο υπό τη μορφή δύναμης κόπωσης, αντίστασης στην διάβρωση και διάρκειας ζωής του εξαρτήματος. Γενικά χρησιμοποιούνται υψηλά εξεζητημένες εργαστηριακές τεχνικές, όπως είναι η διάθλαση των ακτινών Χ και η μεταλλογραφική επιθεώρηση. Αυτές εφαρμόζονται συνήθως μετά από την επεξεργασία, και σε όλες τις περιπτώσεις κοστίζουν σε χρόνο και χρήμα.

Η τοπολογία της επιφάνειας αναπαριστάται από την λεγόμενη υφή της επιφάνειας, που μετρά πολλές ποσότητες που σχετίζονται με τις αποκλίσεις σε ένα εξάρτημα, όπως συγκρίνεται με την ονομαστική επιφάνεια. Οι αποκλίσεις ταξινομούνται από πρώτης μέχρι έκτης τάξης, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Οι αποκλίσεις πρώτης και δεύτερης τάξης αναφέρονται στη μορφή (π.χ. επίπεδη, με καμπυλότητα, κλπ) και στην κυμάτωση αντίστοιχα. Η τραχύτητα της επιφάνειας αναφέρεται στην απόκλιση από την ονομαστική επιφάνεια της τρίτης μέχρι της έκτης τάξης. ΗRa είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη παράμετρος για να περιγράψει την υφή της επιφάνειας, λόγω της άμεσης επιρροής της στην τριβή, την κόπωση, την ηλεκτρική και θερμική αντίσταση, και στην εμφάνιση.

Σήμερα, οι μετρήσεις τραχύτητας λαμβάνονται χρησιμοποιώντας σύγχρονους μετρητές τραχύτητας (κατατομόμετρα), αν και η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη σε εφαρμογές μετεπεξεργασίας, με τα αντίστοιχα εγγενή προβλήματα, όπως οι χρόνοι επιθεώρησης, η ανάγκη τυχαίου ελέγχου (π.χ. δεν ελέγχεται κάθε εξάρτημα που παράγεται) και η παραγωγή των υπολειμμάτων, αφού το γεγονός πως η επιθεώρηση γίνεται μετά την επεξεργασία, σημαίνει πως η παραγωγής των υπολειμμάτων δεν μπορεί να αποφευχθεί, με ότι αυτό συνεπάγεται υπό τη μορφή κόστους και επίδρασης στο περιβάλλον. Σήμερα, η διαδικασία εξασφάλισης της ποιότητας περικλείει δύο φάσεις. Η πρώτη χρησιμοποιεί μεθόδους τύπου Taguchi κατά τη διάρκεια του επιπέδου σχεδιασμού, για να εξασφαλίσει την ποιότητα του προϊόντος που σχεδιάζεται. Αυτή είναι μία ενέργεια προ-επεξεργασίας, κάνοντας απαραίτητη την ανάγκη ενσωμάτωσης ενός δεύτερου ενδιάμεσου επιπέδου, για να εξασφαλιστεί η ποιότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατεργασίας.

Εξασφαλίζοντας την ποιότητα της επιφάνειας ενός εξαρτήματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατεργασίας, δεν είναι μία εύκολη εργασία. Χρησιμοποιήθηκαν τα οπτικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν την μέτρηση της έντασης του ανακλώμενου φωτός, ώστε να εκτιμηθεί η τραχύτητα της επιφάνειας. Ωστόσο, τα πρακτικά αποτελέσματα δεν μας έχουν προσφέρει ακόμη ελπίδα, καθώς οι μετρήσεις που λήφθηκαν δεν ήταν πολύ ακριβείς ή αξιόπιστες. Ούτε οι αισθητήρες που βασίζονται στην τεχνητή όραση, ούτε εκείνοι που βασίζονται στις ακουστικές εκπομπές δεν έχουν στην πραγματικότητα δουλέψει σε εργοστασιακό επίπεδο. Αυτό έκανε αναγκαία την ανάπτυξη αισθητήρων που βασίζονται στα μοντέλα πρόβλεψης.

Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν βασικά να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: στα μοντέλα που βασίζονται στην θεωρία κατεργασίας, τα οποία είναι αναλυτικά μοντέλα που θα μπορούσαν να οριστούν μηχανιστικά, και τα μοντέλα που βασίζονται στην παρατήρηση δεδομένων, τα οποία είναι εμπειρικά μοντέλα που θα μπορούσαν να αναφέρονται ως παρατηρητικά. Τα μηχανιστικά μοντέλα τείνουν να είναι πιο γενικά. Τα εμπειρικά μοντέλα είναι πιο εξειδικευμένα και λειτουργούν μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Οι ιδιότητές του εξαρτώνται έντονα από τα παρατηρούμενα δεδομένα, τα οποία συμπεριλαμβάνουν αφθονία, ακεραιότητα, ολοκλήρωση και επικαιρότητα. Είναι επίσης δυνατή η ανάπτυξη ημι-εμπειρικών μοντέλων.

Τα μηχανιστικά μοντέλα που συνήθιζαν να προβλέπουν την τραχύτητα, είναι γεωμετρικού τύπου, βασισμένα στην γεωμετρία της κίνησης μίας μεταλλικής διαδικασίας κοπής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι δυναμικές κοπής. Έτσι το βασικό τους μειονέκτημα, είναι πως αυτά τα μηχανιστικά μοντέλα δεν συμπεριλαμβάνουν παραμέτρους που σχετίζονται με τις

δυνάμεις κοπής, όπως είναι η ταχύτητα, το βάθος κοπής του τύπου υλικού που χρησιμοποιείται για το επεξεργαζόμενο κομμάτι. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι πως είναι καθαρά θεωρητικά, και δεν πιστοποιούν τα μοντέλα τους με άλλα πειραματικά δεδομένα. Σαν αποτέλεσμα, η σε επεξεργασία πρόβλεψη της ταχύτητας της επιφάνειας, τείνει σήμερα να συμπεριλαμβάνει την χρήση των εμπειρικών μοντέλων, και τον σχεδιασμό των πειραμάτων που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν δεδομένα παρατήρησης, είναι εξαιρετικής σημασίας. Εδώ, οι τεχνικές Taguchi για τα σχεδιαστικά πειράματα (DoE) φαίνεται να είναι οι πιο διαδεδομένες μεθοδολογίες.

Γενικά μιλώντας, η διακινδύνευση που πρέπει να αντιμετωπιστεί όταν δομούνται εμπειρικά μοντέλα είναι μεταξύ της μορφής και της δομής που υιοθετείται και του τρόπου που το μοντέλο εξαρτάται από τα επιλεγμένα δεδομένα (π.χ. μεταβλητότητα). Ένα λάθος παραμετροποιημένο μοντέλο έχει οδηγήσει σε ένα μοντέλο απόκλισης. Ένα υπέρ-παραμετροποιημένο μοντέλο θα προσφέρει μία υψηλή μεταβολή, η οποία ταιριάζει καλά στο δείγμα κατασκευής, αλλά θα μπορούσε να είναι μικρής χρήσης στην αξιολόγηση ενός δείγματος. Η ανταλλαγή απόκλισης/μεταβολής γίνεται ξεχωριστά φανερό όταν δουλεύει μία μικρή ποσότητα δεδομένων, όπου είναι δύσκολο να αναγνωριστεί μία ομαλή μορφή λόγω της μεταβολής των δεδομένων. Η επιλογή μεταξύ της απόκλισης και της μεταβολής είναι ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί.

Τα εμπειρικά μοντέλα παίρνουν βασικά μία από τις δύο μορφές: Υπάρχουν στατιστικά μοντέλα, που βασίζονται σε μη-γραμμικές πολλαπλής απόκλισης εξισώσεις, και υπάρχουν μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, που βασίζονται πάνω απ' όλα στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN). Ένα τυπικό παράδειγμα μίας μη-γραμμικής πολλαπλής απόκλισης εξίσωσης εμφανίζεται, το οποίο προτείνει μία λειτουργική σχέση μεταξύ της τραχύτητας της επιφάνειας και μερικών ανεξάρτητων μεταβλητών:

$$Ra = c \cdot h^{a1} \cdot f^{a2} \cdot r^{a3} \cdot d^{a4} \cdot s^{a5} \quad (5.19)$$

όπου Ra είναι η τραχύτητα της επιφάνειας (ο αριθμητικός μέσος), h είναι η σκληρότητα του εξαρτήματος, f είναι η τροφοδοσία, r είναι η ακτινική άκρη του εργαλείου, d είναι το βάθος κοπής και s είναι η ταχύτητα κοπής.

Επειδή υπάρχουν εξισώσεις αυτού του είδους, τα αποτελέσματα μπορούν να συζητηθούν από μηχανικής απόψεως, και οι μεταβλητές που είναι στατιστικά πιο σημαντικές, μπορούν να αναγνωριστούν. Αυτά τα μοντέλα δείχνουν πως η μηχανική κατεργασία χρίζει μεταβλητών που προσφέρουν αντιτιθέμενες συνεισφορές σε περιοχές όπως είναι η παραγωγικότητα, το φινίρισμα επιφάνειας, η ακρίβεια των διαστάσεων και το κόστος κατεργασίας, μεταξύ άλλων. Θεωρώντας μόνο τις πιο αντιπροσωπευτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και των μεταβλητών αξιών, τα επόμενα μπορεί να θεωρηθούν ως τα πιο σημαντικά:

Η παραγωγικότητα και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι αντιθετικές φιγούρες αξιών στην διαδικασία κατεργασίας.

Η τροφοδοσία έχει μία αξιοσημείωτη επίδραση στην παραγωγικότητα και στην τραχύτητα της επιφάνειας. Η παραγωγικότητα αυξάνει με την αύξηση της τροφοδοσίας, ενώ η ποιότητα της επιφάνειας μειώνεται.

Η ταχύτητα κοπής έχει αξιοσημείωτη επίδραση στην δυναμική σταθερότητα της διαδικασίας και της τραχύτητας της επιφάνειας. Η ποιότητα της επιφάνειας αυξάνει με την μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής.

Το βάθος κοπής έχει αξιοσημείωτη επίδραση στην παραγωγικότητα, στην δυναμική σταθερότητα και στην τραχύτητα της επιφάνειας.

Η σκληρότητα του επεξεργαζόμενου κομματιού που παράγεται, και πάνω από όλα, η ακτίνα του εργαλείου, έχουν μία επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας. Η ποιότητα της επιφάνειας αυξάνει καθώς αυξάνεται και η ακτίνα του εργαλείου.

Τα μοντέλα που βασίζονται στα ANN, προσφέρουν μία πολύ ισχυρή εναλλακτική όταν δεν υπάρχουν αναλυτικά μοντέλα ή όταν δεν είναι κατάλληλο ένα πολυώνυμο χαμηλού βαθμού. Ένα απαραίτητο βήμα όταν χρησιμοποιείται ένα ANN για μοντελοποίηση, είναι η χρήση πραγματικά μοντέλα παρατήρησης, για να βρουν τις τιμές συνοπτικού βάρους για όλα τα νευρωνικά (αλγόριθμος μάθησης). Ένας από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή, είναι ο οπισθοδρομικός αλγόριθμος, ο οποίος είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιήσιμος για την μοντελοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας.

Μελέτη έχει προτείνει ένα μοντέλο που χρησιμοποίησε την ταχύτητα της ατράκτου, την ταχύτητα τροφοδοσίας, το βάθος κοπής και τον μέσο κραδασμό ανά περιστροφή, όπως τα σήματα εισόδου ANN. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά της, χρησιμοποιώντας μία τοπολογία 4-5-1 για το ANN, θα μπορούσαν να επιτύχουν μία ακρίβεια του 95.87%. Όταν χρησιμοποιείται μία πιο ισχυρή τοπολογία, με δύο κρυμμένα επίπεδα στο 4-7-7-1, λαμβάνουν ακρίβεια του 99.27%. Οι χρόνοι εκπαίδευσης δεν ήταν μεγάλοι, και η λειτουργία σε πραγματικό χρόνο φαίνεται εγγυημένη.

## **5.6 Συστήματα CNC Ανοιχτής Αρχιτεκτονικής**

Οι αριθμητικοί έλεγχοι στον υπολογιστή έχουν εξελιχθεί με αξιοσημείωτες ταχύτητες τα τελευταία χρόνια, λόγω της διαθεσιμότητας των ισχυρών μικροεπεξεργαστών, των εξεζητημένων λογισμικών και άλλων βελτιώσεων της ψηφιακής τεχνολογίας. Πολλοί κατασκευαστές συμπεριλαμβάνουν τα τμήματα διαδικασίας υψηλής απόδοσης στους ελέγχους τους, με χρόνους επεξεργασίας κάτω του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μπορούν τώρα να επιτευχθούν σε σύγκριση με τα 70ms που ήταν διαθέσιμα με τα κλασικά CNC. Αυτές οι προδιαγραφές του χρόνου επεξεργασίας δεν μπορούν να μελετηθούν μόνες τους, αλλά περισσότερο σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για την διαδικασία, την αρχή και την ολοκλήρωση της απαιτούμενης κίνησης. Αυτός είναι ο πραγματικός χρόνος εκτέλεσης, ο οποίος προσδιορίζει την ταχύτητα και την ακρίβεια της κατεργασίας.

Έρευνα στην αναβάθμιση των προσωπικών υπολογιστών (H/Y) με ανοιχτά συστήματα CNC, έχουν συνεχιστεί τα τελευταία χρόνια, και αυτό οδήγησε αναγκαστικά σε ανώτερες ιδιότητες υπό τη μορφή ευκαμψίας. Οι νέες ανοιχτές αρχιτεκτονικές είναι πιο αξιόπιστες, στον βαθμό που μπορούν να λειτουργήσουν την μηχανή σαν σύνολο και οι ανοιχτές αρχιτεκτονικές επίσης επιτρέπουν την γενική διαχείριση πραγματικού χρόνου ολόκληρης της ροής των πληροφοριών που αφορούν στην λειτουργία της μηχανής. Αυτό αποφεύγει την αστάθεια που είναι εγγενής σε μία διασύνδεση με έναν H/Y ή μία σύνδεση με ένα λειτουργικό σύστημα H/Y. Η αστάθεια αυτού του είδους, έχει υπάρξει ιδιαίτερα προβληματική τελευταία με το λειτουργικό σύστημα των Windows.

Επιπλέον, είναι πλέον διαθέσιμα τα αποτελέσματα του σχεδιασμού πολύπλοκης αρχιτεκτονικής κατανεμημένου ελέγχου. Με άλλα λόγια, σε συνδυασμό με την συμπερίληψη των μικροϋπολογιστών υψηλών συχνοτήτων στα CNC που μπορούν να μοιραστούν τις εργασίες ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, υπήρξαν βελτιώσεις στην ανάπτυξη των ψηφιακών και «έξυπνων» ενεργοποιητών του κινητήρα για κάθε άξονα. Δεδομένων των υψηλών ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται, οι βρόχοι ανάδρασης συνδέονται άμεσα στους ενεργοποιητές αντί να πηγαίνουν στο CNC, αν και το CNC πρέπει ακόμη να παρακολουθεί ολόκληρο το σύστημα ως ολότητα.

Ένα ολοκληρωτικό ψηφιακό σύστημα, όπως αυτά που είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα, παρέχει μία εξαιρετική πλατφόρμα για την επίτευξη βελτιωμένου ελέγχου. Μερικά συστήματα ενσωματώνουν εντολές που αλλάζουν σε καταστάσεις ελέγχου υψηλής ακρίβειας, έτσι ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια και να μειωθεί ο χρόνος του κύκλου. Αυτές οι εντολές περιλαμβάνουν τον υπολογισμό διαφορετικών επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων σε πραγματικό χρόνο, βασισμένα στις ταχύτητες τροφοδοσίας. Αλλού, νέες στρατηγικές ελέγχου έξυπνων φίλτρων βασισμένες σε προσαρμοστικούς αλγόριθμους και ασαφή λογική, μπορούν τώρα να χρησιμοποιηθούν για να καταστείλουν τους κραδασμούς του συστήματος μέσα σε ένα καθορισμένο φάσμα συχνοτήτων.

### **5.6.1 Δικτυωμένος Έλεγχος και Εποπτεία**

Οι παραδοσιακή αρχιτεκτονική επικοινωνίας των CNC, είναι με σύνδεση σημείου με σημείο (point-to-point). Αυτή η αρχιτεκτονική έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην βιομηχανία για πολλές δεκαετίες, αν και δεν είναι κατάλληλη για συστήματα που περιέχουν μεγάλο αριθμό συσκευών, καθώς ο αριθμός των καλωδίων αυξάνεται μαζί με τον αριθμό των στοιχείων. Ακόμη αυτό το είδος αρχιτεκτονικής δεν μπορεί να αντέξει την πιθανότητα αντιμετώπισης νέων απαιτήσεων, όπως τη σπονδυλότητα, τον αποκεντρωμένο έλεγχο, την απλότητα και την ευκολία συντήρησης.

Ένα δικτυωμένο σύστημα ελέγχου είναι ένα του οποίου τα στοιχεία (αισθητήρες, ελεγκτές, ενεργοποιητές, κλπ) είναι κατανομημένα χρησιμοποιώντας μία μορφή υπολογιστικής τεχνολογίας δικτύου. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας φέρνει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αξιοπιστία, βελτιωμένη χρήση των πηγών, ευκολία συντήρησης και διάγνωσης των σφαλμάτων και, πάνω απ' όλα, την δυνατότητα αναμόρφωσης των διαφορετικών στοιχείων. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ακόμη μειονεκτήματα σε αυτόν τον τύπο συστήματος: εφαρμόζοντας έλεγχο κλειστού βρόχου σε ένα δίκτυο επικοινωνιών, οδηγεί σε καθυστερήσεις που αναπόφευκτα μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια.

#### **5.6.1.1 Επικοινωνίες σε ένα Βιομηχανικό Περιβάλλον**

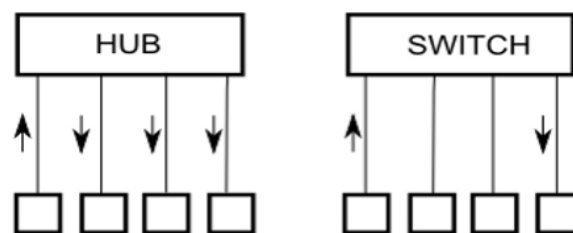
Η αγορά επικοινωνιών πραγματικού χρόνου στον βιομηχανικό τομέα έχει για μεγάλο χρονικό διάστημα κυριαρχηθεί από τα fieldbuses (πρωτόκολλο επικοινωνίας του plc). Μερικά από τα πολύ γνωστά πρότυπα είναι τα Profibus, WorldFIP και FoundationFieldbus. Σήμερα, έχουν τυποποιηθεί, αλλά δεν έχουν ενοποιηθεί. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων, ένα από τα οποία είναι η καθοριστική τους συμπεριφορά. Ωστόσο, τα μειονεκτηματά τους συμπεριλαμβάνουν το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και την δυσκολία αναβάθμισης του με άλλα προϊόντα. Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα, μερικές τεχνολογίες δικτύων, συγκεκριμένα Ethernet, υιοθετούνται για χρήση στο πεδίο βιομηχανικής αυτοκίνησης, δεδομένης της απλότητάς τους, του χαμηλού τους κόστους, της διαθεσιμότητας και των υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης.

Το βασικό τεχνικό εμπόδιο του Ethernet στα βιομηχανικά περιβάλλοντα είναι η μη-καθοριστική του συμπεριφορά, η οποία το καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου. Ο λόγος για αυτό είναι ότι, στα κλασικά δίκτυα Ethernet, το μέσο μετάδοσης μοιράζεται από όλους τους σταθμούς μέσα στο υπό-δίκτυο. Το πρωτόκολλο CSMA/CD χρησιμοποιείται για να έχει πρόσβαση στο μέσο. Αυτό το πρωτόκολλο δεν μπορεί να εγγυηθεί πως τα σταλθέντα πακέτα θα ληφθούν πριν να περάσει μία συγκεκριμένη χρονική περίοδος, επειδή ένας σταθμός θα πρέπει να περιμένει μέχρι το μέσο μετάδοσης να μην χρησιμοποιείται πριν να είναι έτοιμο να μεταδοθεί. Επιπλέον, αν δύο σταθμοί στο δίκτυο αποφασίσουν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, θα υπάρξει σύγκρουση, που θα σημαίνει πως το μήνυμα δεν θα φτάσει στον παραλήπτη σωστά. Όταν ανιχνευτεί μία σύγκρουση, οι σταθμοί πρέπει να περιμένουν για μία τυχαία χρονική περίοδο, η οποία καθορίζεται από τον αλγόριθμο δυαδικής εκθετικής υποχώρησης. Αν ένας σταθμός ανιχνεύσει 16 διαδοχικές συγκρούσεις, θα πάψει να μεταδίδει, και στέλνει ένα μήνυμα σφάλματος στα υψηλότερα

επίπεδα μέσα στον σωρό του πρωτοκόλλου του δικτύου. Εν συντομία, το Ethernet είναι αδύνατο να προβλέψει τι καθυστερήσεις θα συμβούν στο δίκτυο.

Αν και δεν εκτελείται νομοτελειακά, κάτω από συνθήκες χαμηλής κίνησης το Ethernet στέλνει πληροφορίες αρκετά γρήγορα και με μικρή αναμονή. Ωστόσο, με ένα μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο, οι συγκρούσεις είναι πιο συχνές, προκαλώντας καθυστερήσεις και μειώνοντας την απόδοση. Ένας τρόπος βελτίωσης της απόδοσης ενός συστήματος ελέγχου που βασίζεται σε ένα δίκτυο Ethernet, θα ήταν να μειωθεί η κίνηση του δικτύου, με συνεπαγόμενη την μείωση στον αριθμό των συγκρούσεων.

Μερικοί ερευνητές έχουν προτείνει την αλλαγή του μέσου πρόσβασης του πρωτοκόλλου, έτσι ώστε να επιτευχθεί καθοριστική συμπεριφορά. Το PROFINET είναι ένα πρότυπο που το κάνει αυτό. Αν και αυτές οι εναλλακτικές χρησιμοποιούν εξοπλισμό Ethernet, είναι εντελώς ασύμβατες με το πρότυπο κίνησης του Ethernet. Τελευταία, η χρήση Ethernet εναλλαγής (το οποίο χρησιμοποιεί συνδέσεις σε εναλλαγή), έχει προσφέρει επιπλέον βελτιώσεις. Το Ethernet εναλλαγής συμπεριφέρεται διαφορετικά από το κλασικό μοντέλο. Οι εναλλάκτες είναι έξυπνες συσκευές, που αναγνωρίζουν τον προοριζόμενο παραλήπτη της πληροφορίας και μεταδίδουν ξανά την πληροφορία μέσω των απαιτούμενων θυρών εξόδου. Αυτό διαφέρει από τον τρόπο που δουλεύει το παλιότερο σύστημα, μέσω hub (συσκευή δικτύου που συνδέει δύο ή περισσότερες συσκευές δικτύου) που μεταδίδει ξανά όλες τις ληφθείσες πληροφορίες μέσω των θυρών του (Σχήμα 5.12). Η χρήση του συστήματος εναλλαγής στο Ethernet εξαλείφει κάθε πιθανή σύγκρουση στην μετάδοση της πληροφορίας και συνεπώς αυξάνει την απόδοση του δικτύου.



Σχήμα 5. 12 - Hub εναντίον Εναλλάκτη.

Επειδή δεν υπάρχουν συγκρούσεις, το δίκτυο δεν γίνεται ασταθές κάτω από βαριά φορτία, και οι καθυστερήσεις μειώνονται δραστικά. Οι καθυστερήσεις που συμβαίνουν όταν χρησιμοποιείται το Ethernet εναλλαγής είναι ικανοποιητικά χαμηλές για εργασία πραγματικού χρόνου σε βιομηχανικά δίκτυα, καθιστώντας το Ethernet εναλλαγής μία αρκετά υποσχόμενη εναλλακτική για συστήματα δικτυακού ελέγχου.

#### 5.6.1.2 Η Δομή ενός Συστήματος Δικτυωμένου Ελέγχου και Εποπτείας

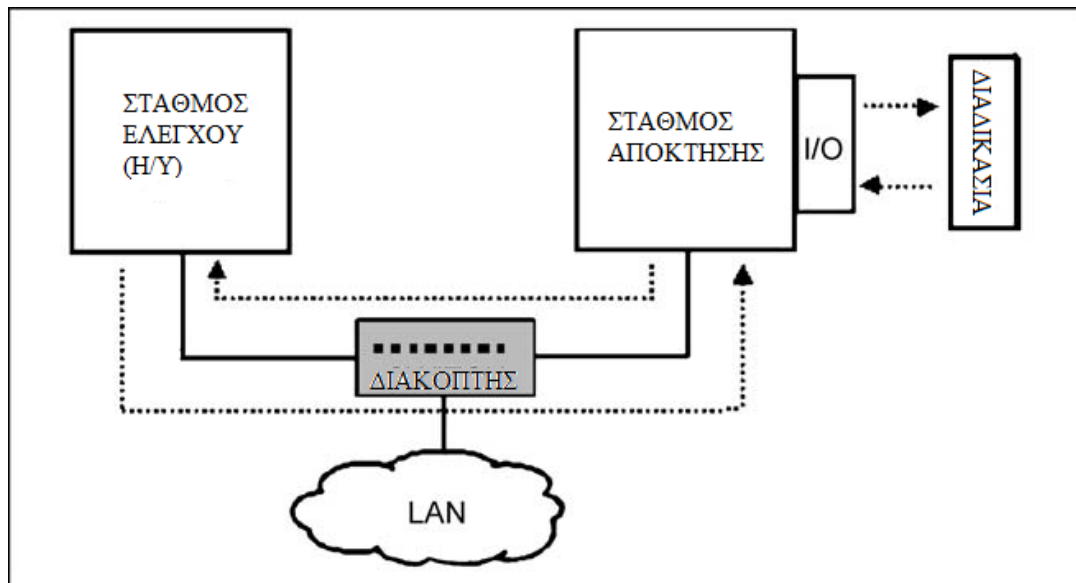
Το σχήμα 5.13 δείχνει την δομή για την εκτέλεση ενός συστήματος δικτυωμένου ελέγχου και εποπτείας, μέσω Ethernet εναλλαγής.

Στην πιο απλή του μορφή, το σύστημα αποτελείται από δύο σταθμούς, ο πρώτος από τους οποίους χειρίζεται τον έλεγχο, και ο δεύτερος, την απόκτηση. Οι δύο σταθμοί συνδέονται μέσω ενός δικτύου Ethernet εναλλαγής. Ο σταθμός απόκτησης βρίσκεται σε άμεση επαφή με την διαδικασία.

Το σύστημα λειτουργεί ως εξής: ο σταθμός απόκτησης, ο οποίος βρίσκεται σε συνεχή επαφή με την διαδικασία, αποκτά πληροφορίες από την διαδικασία. Σε δεδομένα διαστήματα, ανάλογα με την διαδικασία, ο σταθμός απόκτησης στέλνει την πληροφορία που έχει λάβει, στον σταθμό ελέγχου. Ο σταθμός ελέγχου φτιάχνει μία απόφαση που βασίζεται στον

αλγόριθμο ελέγχου που έχει εφαρμοστεί ειδικά για την διαδικασία. Αυτή η πληροφορία θα σταλεί στον σταθμό απόκτησης έτσι ώστε να ληφθεί η απαραίτητη ενέργεια.

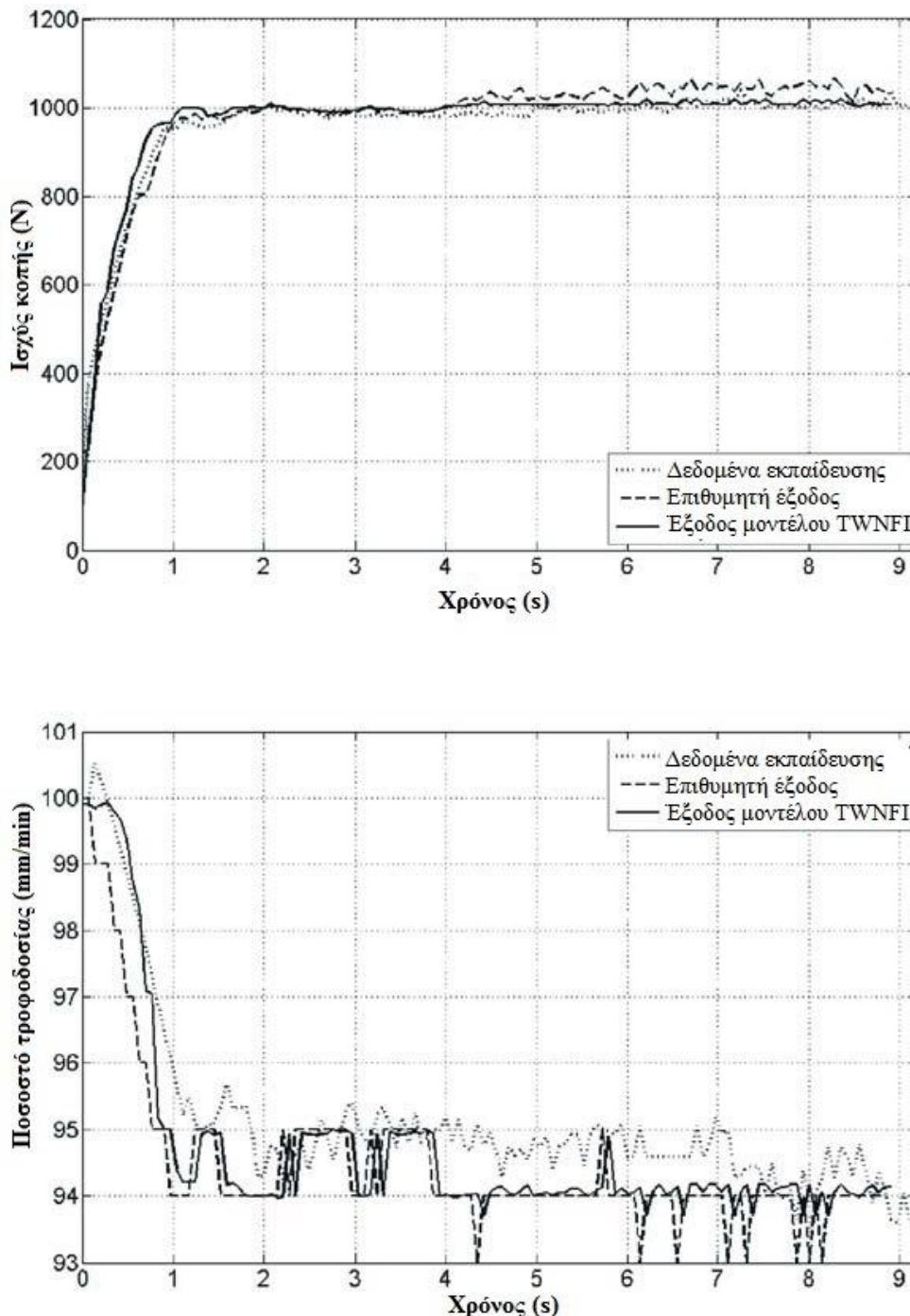
Αυτή είναι συνεπώς μία αρχιτεκτονική client-server. Ο σταθμός ελέγχου (server) λαμβάνει αιτήσεις από τον σταθμό απόκτησης (client), παίρνει μία απόφαση στην βάση κάποιου είδους στρατηγικής ελέγχου, και απαντά στον αρχικό σταθμό. Ο σταθμός ελέγχου ευθύνεται επίσης για την διεξαγωγή καθηκόντων εποπτείας, και είναι το σημείο στο οποίο όλες οι πηγές του συστήματος πρέπει να ενσωματώνονται και να συγκεντρώνονται. Τα καθήκοντά του συμπεριλαμβάνουν συγκεκριμένες μεταβλητές της διαδικασίας παρακολούθησης, συσκευές διαμόρφωσης και συστήματα ελέγχου.



Σχήμα 5. 13 – Δικτυωμένος έλεγχος και εποπτεία μέσω Ethernet.

#### 5.6.1.3 Δικτυωμένος Έλεγχος και Εποπτεία μέσω Ethernet

Ο εσωτερικός έλεγχος μοντέλου (IMC), είναι μία τεχνική που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη και καλά εγκατεστημένη στον σχεδιασμό του ελεγκτή. Αυτό το σχήμα ελέγχου κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί ένα μοντέλο ( $G_M$ ) των δυναμικών του εργοστασίου που πρόκειται να ελεγχθεί., το οποίο τοποθετείται παράλληλα στο εν λόγω εργοστάσιο ( $G_P$ ). Επιπλέον, περιλαμβάνει επίσης ένα άλλο μοντέλο αντίστροφων δυναμικών από του εργοστασίου ( $G'_M$ ) που τοποθετείται σε σειρά με την διαδικασία, η οποία ενεργεί ως ελεγκτής.



Σχήμα 5. 14 – Έξοδος μοντέλου TWNFI. α) Άμεσο μοντέλο. β) Αντίθετο μοντέλο.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του ελέγχου αυτού του τύπου έγκειται στο γεγονός ότι η σταθερότητα και η τραχύτητα μπορούν να εγγυηθούν. Ωστόσο, η αντιστροφή των μη-γραμμικών μοντέλων δεν είναι εύκολη εργασία, και μπορεί να μην υπάρχει αναλυτική λύση. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μπορεί να υπάρχει μία λύση, αλλά να είναι αδύνατο να εφαρμοστεί. Ένα άλλο σχετιζόμενο πρόβλημα είναι πως η αντιστροφή του μοντέλου επεξεργασίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε ασταθείς ελεγκτές όταν το σύστημα βρίσκεται σε μη-γραμμική φάση.

Τα παρακάτω είναι μία αναπαράσταση της χρήσης του αλγόριθμου TWNFI για την δημιουργία μοντέλων online. Και τα δύο μοντέλα υπολογίζονται με κάθε νέα είσοδο στο σχήμα ελέγχου. Χρησιμοποιώντας αυτή την νεύρο-ασταθή συμπερασματική τεχνική, η δημιουργία του αντίθετου μοντέλου είναι πολύ ευκολότερη και πάντα προσφέρει μία λύση.

Το άμεσο μοντέλο πρέπει να εκπαιδεύεται για να γνωρίζει τις δυναμικές της διαδικασίας. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται ένα σύστημα TWNFI με δεδομένα μάθησης εισόδου-εξόδου, στα οποία τα δεδομένα εισόδου αντιστοιχούν στην ταχύτητα τροφοδοσίας, ενώ η ισχύς κοπής χρησιμοποιείται ως μεταβλητή εξόδου.

Για να υπολογιστεί το αντίστροφο μοντέλο, αντί να αντιστραφεί το άμεσο μοντέλο που αποκτήθηκε αναλυτικά, χρησιμοποιείται ένα άλλο σύστημα TWNFI, στο οποίο τα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνουν τιμές ισχύος κοπής ως είσοδο, και τιμές ταχύτητας τροφοδοσίας ως έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μπορεί να μάθει τα αντίστροφα δυναμικά μίας διαδικασίας διάτρησης υψηλής απόδοσης (Σχήμα 5.14b).

Τα δεδομένα εκπαίδευσης και για το άμεσο μοντέλο και για το αντίστροφο, έχουν αποκτηθεί από πραγματικές διαδικασίες διάτρησης χρησιμοποιώντας ελέγχους υλικών GGG40. Αυτό το σύνολο δεδομένων δεν χρειάζεται να επεκταθεί, καθώς οι τιμές κάθε περιοχής λειτουργίας είναι επαρκείς.

Το αντίθετο μοντέλο  $G'_M$  και το άμεσο μοντέλο  $G_M$  χρησιμοποιούν προηγούμενες καταστάσεις για τις μεταβλητές εισόδου για να επιτύχουν μία καλύτερη προσέγγιση στην σχέση εισόδου-εξόδου στα δεδομένα εκπαίδευσης για τους αλγόριθμους TWNFI:

$$\begin{aligned} f(k) &= G'_M(F(k), F(k-1), f(k-1)) \\ \hat{F}(k) &= G_M(f(k), f(k-1), \hat{F}(k-1)) \end{aligned} \quad (5.20)$$

όπου  $F(k)$  είναι η ισχύς κοπής που εκτιμάται από το μοντέλο.

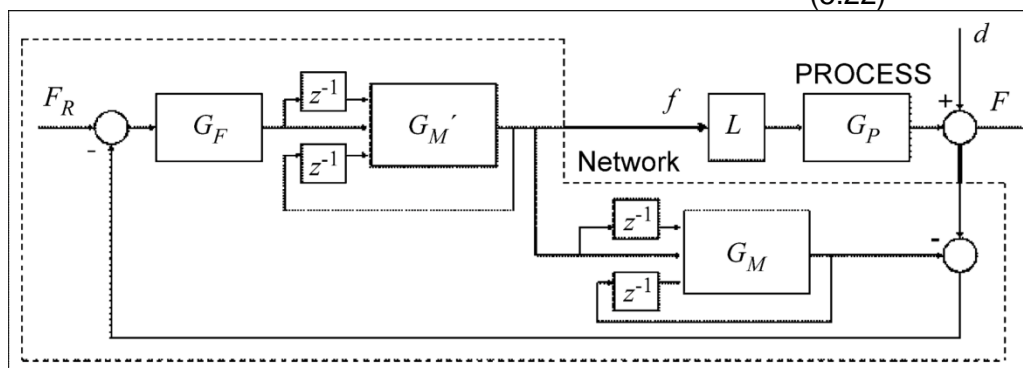
Μόλις τα μοντέλα ορίστηκαν στο διάγραμμα, αποφασίστηκε επίσης να συμπεριληφθεί ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης (χαμηλοπερατό) ( $G_F$ ). Αυτό ενσωματώθηκε στο σύστημα ελέγχου με σκοπό την μείωση του κέρδους υψηλής συχνότητας και βελτιώνοντας την τραχύτητα του συστήματος. Επίσης εξυπηρέτησε στο να λειάνει γρήγορα τις απότομες αλλαγές στο σήμα, βελτιώνοντας συνεπώς την απόκριση του ελεγκτή. Το φίλτρο παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$G_F(z) = \frac{1 - k_2}{z - k_1} \quad (5.21)$$

όπου  $k_1$  και  $k_2$  είναι σχεδιαστικές παράμετροι, και συνήθως  $k_1 = k_2$ .

Το σχήμα 5.15 δείχνει το εσωτερικό σχήμα του μοντέλου ελέγχου. Το διάγραμμα συμπεριλαμβάνει την καθυστέρηση μέσω του τμήματος  $L$ . Το σχήμα δείχνει επίσης τα άμεσα και αντίθετα μοντέλα  $G_M$  και  $G'_M$ , αντίστοιχα, το φίλτρο  $G_F$  και την διαδικασία που αναπαριστάται από  $G_P$ :

$$G_P(s) = \frac{F(s)}{f(s)} = \frac{10.26}{0.005241s^3 + 0.09376s^2 + 0.5414s + 1} e^{-0.4s} \quad (5.22)$$



Σχήμα 5. 15 – Εσωτερικό σχήμα του μοντέλου ελέγχου.

όπου  $f(s)$  είναι η ταχύτητα τροφοδοσίας,  $F(s)$  είναι η ισχύς κοπής και  $G_P(s)$  είναι η διαδικασία της συνάρτησης μεταφοράς σύμφωνα με Laplace.

Τα θέματα που αφορούν στην καθυστέρηση,  $L$ , και στην αρχιτεκτονική του δικτυωμένου συστήματος ελέγχου, εξηγούνται στην ακόλουθη ενότητα.

#### 5.6.1.4 Δικτυωμένα Συστήματα Ελέγχου

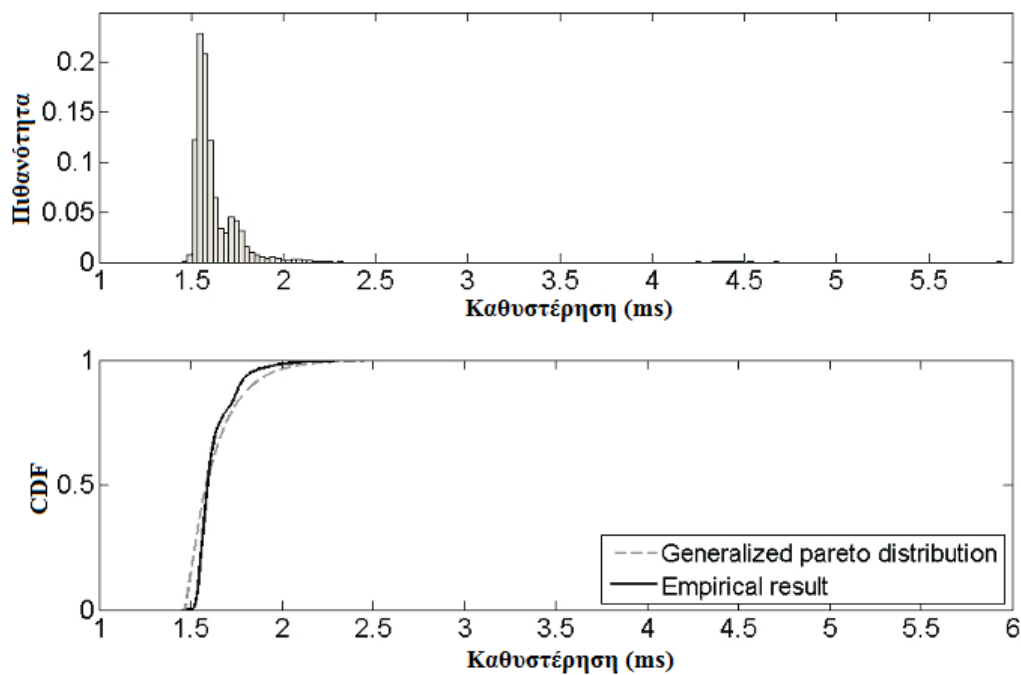
Όλες οι καθυστερήσεις (και από την ίδια την διαδικασία και από το δίκτυο), έχουν ομαδοποιηθεί μαζί σαν τμήμα  $L$ . Η χρήση των συστημάτων δικτυωμένου ελέγχου, χωρίς αμφιβολία, φέρνει σημαντικά πλεονεκτήματα υπό τη μορφή αξιοπιστίας, καλύτερης χρήσης των πηγών, ευκολία συντήρησης και διάγνωση των σφαλμάτων, και πάνω απ' όλα, πιθανότητας αναδιαμόρφωσης των διαφορετικών στοιχείων. Τα fieldbuses εδραιωθεί ως τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα δίκτυα επικοινωνιών στην βιομηχανία. Πράγματι, είναι κοινή πρακτική στην διαδικασία του πεδίου ελέγχου για τα μοντέλα να ενσωματώνουν την καθυστέρηση που εμφανίζεται από τα δίκτυα αυτά.

Ωστόσο, η ανάπτυξη των τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνιών, σήμανε πως τα συστήματα ελέγχου και εποπτείας, απαιτούνται αυξητικά στις διαδικασίες που καλύπτουν κάποια γεωγραφική περιοχή. Για το λόγο αυτό, οι διαδικασίες ελέγχου που συζητήθηκαν εδώ για την διάτρηση υψηλής απόδοσης, χρησιμοποιούν την τεχνολογία του δικτύου Ethernet.

Το Ethernet, έχει χρησιμοποιηθεί μαζικά στο πεδίο της βιομηχανικής αυτοκίνησης, δεδομένου του χαμηλού του κόστους, της διαθεσιμότητάς του και της υψηλής του ταχύτητας μετάδοσής. Η κύρια δυσκολία που σχετίζεται γενικά με τον δικτυωμένο έλεγχο και τον έλεγχο χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα Ethernet, έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ το σύστημα ελέγχου είναι αρκετά δυνατό να αντέχει τις σχεδιαστικές αλλαγές, μπορεί να μην μπορεί να ανεχτεί τις μη-μοντελοποιημένες καθυστερήσεις επικοινωνιών.

Το βασικό τεχνικό μειονέκτημα του Ethernet σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι η μη καθοριστική του συμπεριφορά, η οποία το κάνει ακατάλληλο για εφαρμογές που συμπεριλαμβάνουν απαιτήσεις πραγματικού-χρόνου. Το Ethernet δεν χρησιμοποιεί χρόνο αποκατάστασης στον δίαυλο, αλλά η σύγκρουση πακέτων μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις στην μετάδοση της πληροφορίας και μπορεί ακόμη να προκαλέσει το χάσιμο της πληροφορίας.

Ωστόσο, η χρήση του Ethernet εναλλαγής, απομακρύνει την πιθανότητα συγκρούσεων κατά τη διάρκεια μετάδοσης, αυξάνοντας συνεπώς την αποδοτικότητα του δικτύου. Καθώς δεν υπάρχουν συγκρούσεις, το δίκτυο δεν γίνεται ασταθές κάτω από βαριά κίνηση, και οι καθυστερήσεις μειώνονται δραστικά. Έρευνες έχουν δείξει πως το Ethernet εναλλαγής προκαλεί καθυστερήσεις που είναι επαρκώς μικρές και καθοριστικές για το σύστημα, όταν χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά δίκτυα πραγματικού χρόνου, και έχουν έτσι γίνει μία αρκετά υποσχόμενη εναλλακτική για τα δικτυωμένα συστήματα ελέγχου.



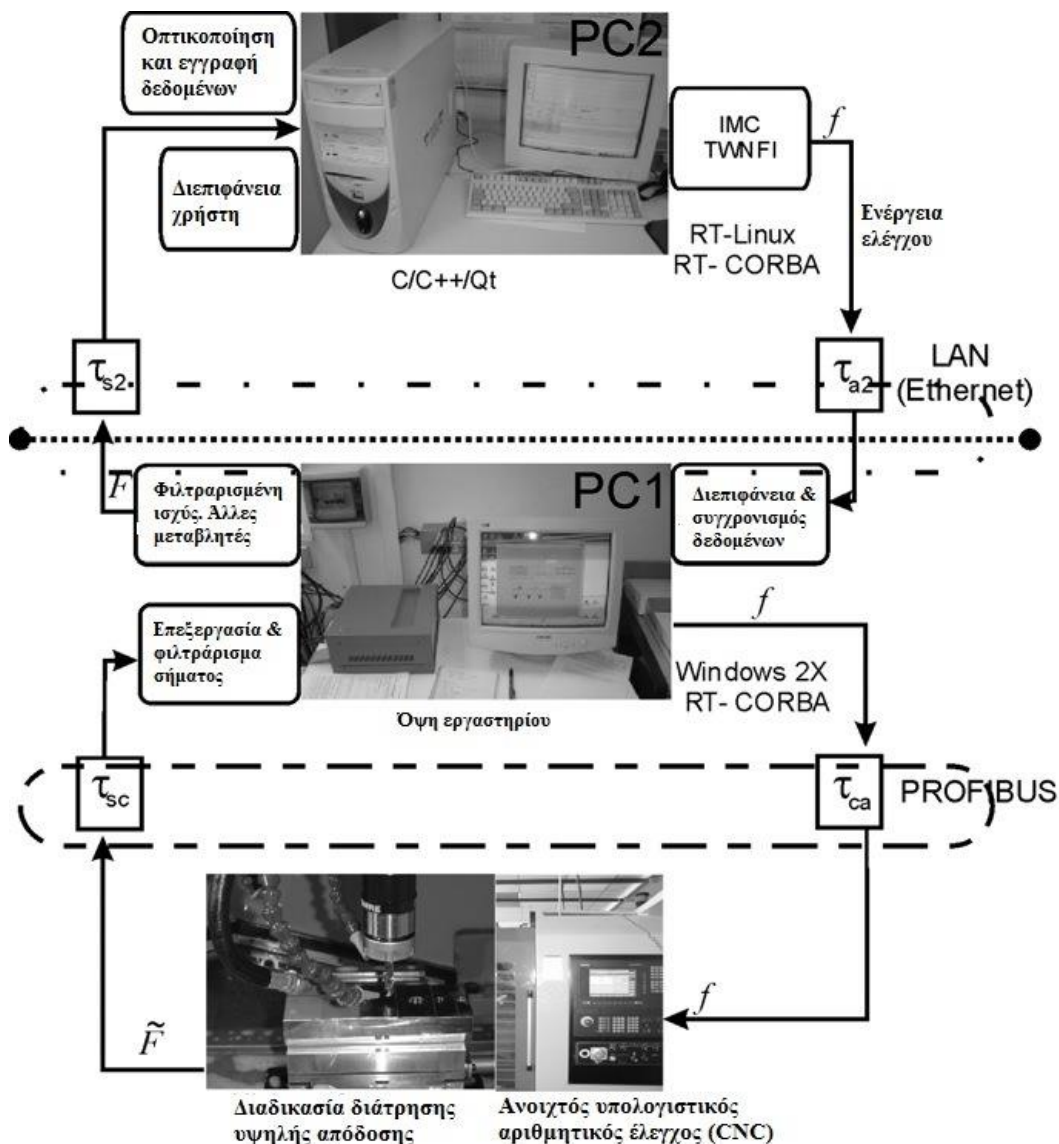
Σχήμα 5. 16 – Στατιστική κατανομή καθυστερήσεων.

Μία σε βάθος μελέτη των καθυστερήσεων, βρέθηκε στις κατασκευαστικές διαδικασίες, όπου οι εργαλειομηχανές συνδέονται σε υπολογιστές σε ένα τοπικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας το Ethernet, μαζί με μερικά πειραματικά αποτελέσματα. Βασισμένοι σε αυτή την δουλειά, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, η μέγιστη καθυστέρηση σε ένα δίκτυο Ethernet καθιερώνεται στα  $5 \times 10^{-3} \text{sec}$ .

Η αρχιτεκτονική του δικτυωμένου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.17. ΟΗ/Υ1 συνδέεται χρησιμοποιώντας Profibus, στην ανοιχτή αρχιτεκτονική CNC της εργαλειομηχανής. Εδώ λαμβάνει μέρος η μέτρηση και η διαδικασία του μετρούμενου σήματος:

$$\tau_{SC} + \tau_{CA} + \tau_{drilling} = 0.4 \quad (5.23)$$

Από τεχνικής απόψεως, η ύπαρξη του κατάλληλου λογισμικού τοποθετεί περιορισμούς στην συνδεσιμότητα με την ανοιχτή αρχιτεκτονική των συστημάτων CNC. Ωστόσο, προσφέρει ασφάλεια στον χειρισμό του CNC. Ο Η/Υ2, χρησιμοποιεί ελεύθερο λογισμικό (RT-Linux) και ένα σύστημα διαμεσολάβησης πραγματικού χρόνου (ACE-TAO). Ο εσωτερικός τύπος του συστήματος ελέγχου εφαρμόζεται εδώ. Υποθέτοντας πως η μέγιστη καθυστέρηση είναι γνωστή ( $0.4s \gg 0.005s$ ), είναι πιθανόν να εφαρμοστεί ο δικτυωμένος έλεγχος χρησιμοποιώντας το Ethernet.



Σχήμα 5. 17 – Αρχιτεκτονική του δικτυωμένου συστήματος.

## 5.7 Συστήματα Υποστήριξης Προγραμματισμού: Χειροκίνητος Προγραμματισμός

Φεύγοντας από την λειτουργία του αριθμητικού ελέγχου, το επόμενο θέμα είναι να αναλυθεί ο τρόπος προγραμματισμού του αριθμητικού ελέγχου, η γλώσσα που χρησιμοποιείται και ο τρόπος που ένας προγραμματιστής εισάγει όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την κατεργασία μέσα στον αριθμητικό έλεγχο. Στις πιο απλές περιπτώσεις, ο προγραμματιστής εργάζεται με έναν σχεδιασμό που αναγνωρίζει όλες τις συντεταγμένες και τις γραμμές που τις συνδέουν. Ωστόσο, αν φτιαχτεί ένα πολύπλοκο υλικό, και συγκεκριμένα αν ένα εξάρτημα συμπεριλαμβάνει επιφάνειες ελεύθερου σχήματος, η διαδικασία αναγνώρισης είναι πιο περίπλοκη. Μία λύση που χρησιμοποιείται συχνά σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η τεχνική εξερεύνησης/ψηφιοποίησης. Η ψηφιοποίηση είναι μία τεχνική με την οποία χρησιμοποιείται μία σχεδιαστική κλίμακα για να παρέχει τις συντεταγμένες που απαιτούνται για να προετοιμάσουν ένα πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου. Αυτό το πρόγραμμα παράγεται συνήθως αυτόματα από τον υπολογιστή χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα ψηφιακή πληροφορία. Ο υπολογιστής υπολογίζει έναν επαρκή αριθμό διακριτών σημείων, για να παραχθεί ένα ικανοποιητικό πρόγραμμα ελέγχου. Όλα τα συστήματα ψηφιοποίησης προσφέρουν την πιθανότητα εισαγωγής ή αναθεώρησης των συλλεγμένων πληροφοριών.

Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί μέθοδοι για να προγραμματιστεί μία διαδικασία κατεργασίας, ένα χειροκίνητο πρόγραμμα ή ένας αυτοματοποιημένος προγραμματισμός. Στην πρώτη περίπτωση, το πρόγραμμα εισάγεται στην γλώσσα μηχανής, με την λογική και τους υπολογισμούς που έγιναν από τον ίδιο τον προγραμματιστή. Ο προγραμματισμός στην παραδοσιακή γλώσσα μηχανής απαιτεί τα τελικά σημεία όλων των τμημάτων, των τόξων και των άλλων γεωμετρικών δεδομένων να έχουν υπολογιστεί προηγουμένως. Στην δεύτερη περίπτωση, ένας υπολογιστής γενικού σκοπού, όπως ένας Η/Υ ή ένας σταθμός εργασίας χρησιμοποιείται σαν μία προγραμματιστική βοήθεια, για να εξάγει το τμήμα προγράμματος στην συγκεκριμένη γλώσσα που απαιτείται για τον εν λόγω αριθμητικό ελεγκτή.

Ο χειροκίνητος προγραμματισμός στην γλώσσα μηχανής παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα, με το πιο σημαντικό να είναι ο απαιτούμενος χρόνος ανάπτυξης ενός προγράμματος που είναι πραγματικά αποτελεσματικό. Απαιτεί πολλούς χειροκίνητους υπολογισμούς, οι οποίοι οδηγούν σε σφάλματα. Αυτά τα μειονεκτήματα έχουν τώρα μειωθεί μερικώς, αφού τα σύγχρονα CNC μπορούν να προγραμματίζουν σταθερούς ή επαναληπτικούς κύκλους μηχανής, διεξάγοντας μία γραφική προσομοίωση της κίνησης του εργαλείου, και συμπληρώνοντας έναν αριθμό από μαθηματικές λειτουργίες, εννοώντας πως τα CNC δεν χρειάζεται να γνωρίζουν όλες τις συντεταγμένες που σχετίζονται με την κατεργασία ενός εξαρτήματος. Παρ' όλα αυτά, και παρά τα μειονεκτήματα, ο χειροκίνητος προγραμματισμός είναι απαραίτητος, τόσο πολύ που μία καλή γνώση των μεθόδων του είναι απαραίτητες για την δημιουργία ενός προγράμματος πραγματικά υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιώντας την αυτόματη τεχνική προγραμματισμού. Η αντιπαράθεση μεταξύ υποβοηθούμενου χειροκίνητου και υπολογιστικού προγραμματισμού δεν είναι πολύ σημαντική αυτές τις μέρες, καθώς και οι δύο είναι πολύ απαραίτητοι. Κανείς δεν μπορεί να είναι καλός προγραμματιστής CNC, χωρίς να έχει μία σε βάθος γνώση και των δύο τεχνικών. Στην περίπτωση του χειροκίνητου προγραμματισμού, ο προγραμματιστής πρέπει να συμπληρώσει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Σπάσιμο της κατεργασίας του εξαρτήματος σε στοιχειώδεις λειτουργίες και προσδιορισμός των τεχνολογικών απαιτήσεων (τροφοδοσία, ταχύτητα κοπής, κλπ.), έχοντας κατά νου τα εργαλεία που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για κάθε λειτουργία.
- Προσδιορισμός της σειράς προτίμησης για κάθε λειτουργία.
- Καθορισμός των καμπυλών και των επιφανειών του εργαλείου, χρησιμοποιώντας καμπύλες που μπορεί να παράγει ο ελεγκτής, χρησιμοποιώντας την σωστή παρεμβολή. Εδώ, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το απαιτούμενο επίπεδο της διαστασιολογικής ανοχής.
- Γραφή του προγράμματος στην γλώσσα μηχανής για τον συγκεκριμένο αριθμητικό ελεγκτή.
- Εισαγωγή του προγράμματος στην συσκευή CNC.

Αν και τα σημερινά συστήματα CNC έχουν νέα χαρακτηριστικά που βοηθούν στην εκτέλεση των εργασιών που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι αναμφισβήτητο το γεγονός ότι μπορούν να είναι δυσκίνητα και ακόμη αδύνατα για έναν προγραμματιστή που δεν έχει υποστήριξη από έναν υπολογιστή.

Οι επόμενες παρατηρήσεις αναφέρονται μόνο στις νέες ιδιότητες των βελτιωμένων CNC, αν υποθεθεί πως ο αναγνώστης έχει μία καλή γνώση του κλασικού χειροκίνητου προγραμματισμού. Ύστερα, η συζήτηση θα γυρίσει συνοπτικά στις αυτόματες γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα CAD/CAM.

Ένα πρόγραμμα CNC αποτελείται από ένα σύνολο τμημάτων ή οδηγιών που, όταν οργανώνονται σωστά σε υπορουτίνες ή στο σώμα του προγράμματος, παρέχουν στο

CNC όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για να κατεργαστεί ένα συγκεκριμένο εξάρτημα. Το πρόγραμμα CNC μπορεί να αποτελείται από πολλές τοπικές υπορουτίνες, οι οποίες καθορίζονται στην αρχή του προγράμματος, μαζί με το κυρίως σώμα του προγράμματος. Το σώμα του προγράμματος περιέχει μία επικεφαλίδα (που υποδηλώνει την αρχή του προγράμματος), πολλά τμήματα προγράμματος (που περιλαμβάνουν τις κινήσεις, τις λειτουργίες, κλπ.) και μία δήλωση τέλους του προγράμματος. Μία βοηθητική λειτουργία M02/M03 χρησιμοποιείται για την δήλωση τέλους του προγράμματος (FagorCNC 8070).

Μία υπορουτίνα, είναι ένα σύνολο από τμήματα που μπορεί να καλεστούν πολλές φορές από το κύριο πρόγραμμα ή από μία άλλη υπορουτίνα. Οι υπορουτίνες μπορούν να είναι είτε γενικές ή τοπικές. Μία γενική υπορουτίνα αποθηκεύεται στην μνήμη CNC ως ένα ανεξάρτητο πρόγραμμα. Μία τοπική υπορουτίνα προσδιορίζεται ως ένα μέρος του προγράμματος και καλείται μόνο από το πρόγραμμα όπου έχει οριστεί. Στα σύγχρονα CNC, τα τμήματα που απαρτίζουν τις υπορουτίνες ή το σώμα του προγράμματος μπορούν να καθοριστούν χρησιμοποιώντας τις εντολές του κώδικα ISO ή μία γλώσσα υψηλού επιπέδου. Κάθε ξεχωριστό τμήμα, πρέπει να γράφεται σε μία μονή γλώσσα, αν και το πρόγραμμα μπορεί να συνδυάζει τμήματα γραμμένα και στις δύο γλώσσες.

Η γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου επιτρέπει στον χειριστή να χρησιμοποιεί εντολές ελέγχου όπως \$IF, \$GOTO, κλπ. Με τους δύο τύπους γλώσσας, ο χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει σταθερές, μαθηματικές παραμέτρους, μεταβλητές και μαθηματικές εκφράσεις. Ο προγραμματισμός σε κώδικα ISO εμπλέκει ακόμη την χρήση των τυπικών N, G, F, S, T, D, M, κλπ. διευθύνσεων για κάθε εντολή. Όλοι οι σύγχρονοι ελεγκτές έχουν μία λειτουργία look-ahead που επιτρέπει στην μηχανή να διαβάζει πολλά τμήματα που βρίσκονται μπροστά από εκείνο που χρησιμοποιείται εκείνη τη χρονική στιγμή, για να βελτιώσει τον υπολογισμό της ακόλουθης πορείας.

Σε αντίθεση με τους παλιότερους ομόλογούς τους, τα τελευταία CNC ενσωματώνουν λογικές και μαθηματικές λειτουργίες και συναρτήσεις. Ένας χειριστής μπορεί να προγραμματίσει όλα τα είδη των μαθηματικών λειτουργιών, να κάνει συγκρίσεις (π.χ. μεγαλύτερο από ή ίσο με), να εκτελέσει δυαδικές λειτουργίες (π.χ. αποκλειστική OR), να χρησιμοποιήσει λογικές πύλες (π.χ. λογικό AND), σταθερές Boolean, τριγωνομετρικές συναρτήσεις, μαθηματικές συναρτήσεις (π.χ. λογάριθμος Neperian) και άλλες λειτουργίες, όπως «επιστροφή του ακεραίου».

Οι σύγχρονοι ελεγκτές μπορούν επίσης να ενσωματώσουν λειτουργίες όπως τον έλεγχο της επιτάχυνσης. Υπάρχει μία ονομαστική επιτάχυνση καθορισμένη από τον κατασκευαστή,  $a_0$ , και μία επιτάχυνση  $a_p$ , η οποία είναι η επιτάχυνση που πρόκειται να εφαρμοστεί σύμφωνα με τον χειριστή. Για να γίνει αυτό, οι συναρτήσεις G του ακόλουθου είδους χρησιμοποιούνται:

*G130 percentage of acceleration to be applied per axis.*

*G131 percentage of acceleration for both axes.*

Συνεπώς, το τμήμα:

*G130 X50Y20*

υποδηλώνει μία επιτάχυνση του 50% ( $a_0$ ) για τον άξονα X και 20% για τον άξονα Y, και:

*G131 100 X50 Y80*

αποκαθιστά 100% της επιτάχυνσης σε όλους τους άξονες και προκαλεί κίνηση στο σημείο X=50 Y=80.

Δύο άλλα χαρακτηριστικά που μόνο τα νέα CNC έχουν, είναι έλεγχου κραδασμού και έλεγχου AC-Forward. Οι συναρτήσεις που σχετίζονται με τον έλεγχο κραδασμού είναι:

*G132 X20 Y50*

οι οποίες προγραμματίζουν έναν κραδασμό το 20% στον άξονα X και 50% στον άξονα Y.

Το ποσοστό feed-forward (τροφοδοσίας), προγραμματίζεται χρησιμοποιώντας G134 που ακολουθείται από τους άξονες και από το νέο ποσοστό που είναι να εφαρμοστεί για κάθε άξονα. Συνεπώς:

*G134 X50.75 Y80 Z10*

υποδηλώνει ένα ποσοστό 50.75% στον άξονα X, 80% στον άξονα Y και 10% στον άξονα Z. Αυτό το ποσοστό μπορεί να εφαρμόζεται μέσω των παραμέτρων κατεργασίας και μέσω PLC, όπως και από το πρόγραμμα. Η τιμή που καθορίζεται από το PLC θα είναι εκείνη με τη υψηλότερη προτεραιότητα. Η μεγαλύτερη τιμή Feed-forward που μπορεί να εφαρμοστεί είναι 120%.

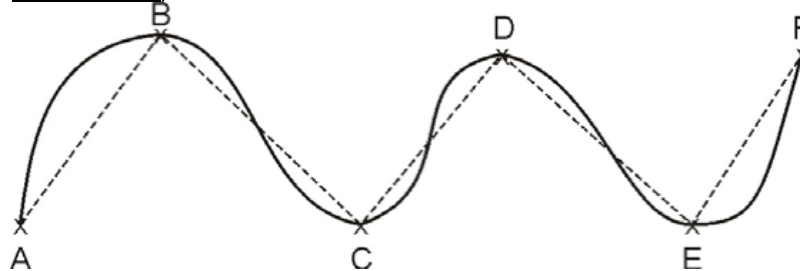
Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των σύγχρονων CNC είναι η ικανότητά τους να ελέγχουν εργαλειομηχανές υψηλής ταχύτητας (HSC). Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα συστήματα CAD/CAM παρέχουν έναν υψηλό αριθμό από πολύ μικρά τμήματα σε μέγεθος, από αρκετά χιλιοστά έως μερικά δέκατα μικρών. Με αυτόν τον τύπο εξαρτήματος, ένα CNC πρέπει να μπορεί να αναλύσει ένα μεγάλο αριθμό τμημάτων και επιπλέον να παράγει μία συνεχή γραμμή που περνάει μέσα από τα σημεία που προσδιορίζονται στο πρόγραμμα, ενώ διατηρείται η προγραμματισμένη ταχύτητα τροφοδοσίας και παρακολουθούνται τα όρια στην μέγιστη επιτάχυνση, τους κραδασμούς, κλπ., για κάθε άξονα. Η λειτουργία HSC προσφέρει πολλούς τρόπους εργασίας για να βελτιώσει τις λύσεις που σχετίζονται με τα σφάλματα περιγράμματος και την ταχύτητα της κατεργασίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το μέγιστο σφάλμα που επιτρέπεται καθορίζεται εξ αρχής, και το CNC στη συνέχεια τροποποιεί την γεωμετρία μέσω έξυπνων αλγορίθμων για να εξαλειφθεί κάθε μη απαραίτητο στοιχείο και να παραχθούν αυτόματα οι καμπύλες και τα πολυώνυμα στην μετάβαση μεταξύ των τμημάτων. Με αυτό τον τρόπο, το περίγραμμα ταξιδεύει σε ένα μεταβλητό ποσοστό τροφοδοσίας, ανάλογα με την καμπυλότητα και άλλες παραμέτρους (όπως επιτάχυνση και ταχύτητα), χωρίς να υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο σφάλματος.

Τα επόμενα μπορούν συνεπώς να προγραμματιστούν:

```
#HSC ON  
#HSC ON [CONTERROR 0.01]  
#HSC ON [CONTERROR 0.01, CORNER 150]  
#HSC ON [CORNER 150]
```

υποδηλώνοντας πως το μέγιστο σφάλμα περιγράμματος είναι 0.01 και η μέγιστη γωνία μεταξύ δύο μονοπατιών είναι 150°.

Μία από τις λειτουργίες που διαφοροποιούν τα σύγχρονα CNC από τους προκατόχους τους, είναι η ικανότητά τους να προγραμματίζουν την καμπύλη παρεμβολής χρησιμοποιώντας σειρές από σημεία ελέγχου. Αυτός ο τύπος κατεργασίας υιοθετεί το προγραμματισμένο περίγραμμα σε μία καμπύλη που περνάει μέσω όλων των προγραμματιζόμενων σημείων. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το προγραμματισμένο προφίλ. Η συμπαγής γραμμή δείχνει την καμπύλη (δείτε [Σχήμα 5.18](#)).



Σχήμα 5. 18 – Υιοθέτηση καμπύλης.

Το περίγραμμα που πρόκειται να καμπυλωθεί καθορίζεται από ευθεία μονοπάτια. Όταν καθορίζεται ένα τόξο, η καμπύλη διακόπτεται, ενώ βρίσκεται υπό κατεργασία, και

επαναλαμβάνεται στο επόμενο ευθύ μονοπάτι. Η μετάβαση μεταξύ του τόξου και της καμπύλης γίνεται εφαιπτόμενα.

Όταν εκτελείται η υιοθέτηση της «ενεργούς καμπύλης», το CNC ερμηνεύει πως τα προγραμματιζόμενα σημεία αποτελούν μέρος της καμπύλης και αρχίζει να φτιάχνει την καμπύλη. Η διάταξη του προγραμματισμού είναι:

**#SPLINE ON**

Με την εντολή τύπου επιλογής της εφαιπτομένης, ο προγραμματιστής ρυθμίζει τον τύπο των αρχικών και τελικών εφαιπτόμενων της καμπύλης που καθορίζει την μετάβαση από το προηγούμενο στο επόμενο μονοπάτι. Προαιρετικά, αν η εφαιπτομένη δεν καθορίζεται, υπολογίζεται αυτόματα. Η διάταξη του προγραμματισμού είναι:

**#ASPLINE MODE [<initial>, <final>]**

Ένα παράδειγμα είναι:

```
N30 #ASPLINE MODE [1,2]
N40 #SPLINE ON
N50 #XX1 YY1
N60 #XX2 YY2
N70 #XX3 YY3
...
...
N110 #XXi YYi
N120 #SPLINE OFF
```

όπου (X1, Y1) (X2, Y2) ... (Xi, Yi) είναι τα σημεία της καμπύλης και (Xi, Yi) είναι το τελευταίο σημείο της καμπύλης. Η τιμή «1» υποδηλώνει πως η αρχική εφαιπτομένη υπολογίζεται αυτόματα. Η τιμή «2» υποδηλώνει πως η τελική εφαιπτομένη είναι η εφαιπτομένη του προηγούμενου/επόμενου τμήματος (δείτε MODE).

Μία άλλη συνάρτηση που εμφανίζεται μόνο στα προηγμένα CNC, είναι η πιθανότητα προγραμματισμού των πολυωνύμων ενός περιορισμένου βαθμού. Η εντολή #POLY μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρεμβάλει πολύπλοκες καμπύλες, όπως μία παραβολή. Με αυτόν τον τύπο παρεμβολής, μπορεί να κατεργαστεί μία καμπύλη που δίνεται από ένα πολυώνυμο μέχρι τετάρτου βαθμού. Η διάταξη του προγραμματισμού είναι:

**#POLY [<axis> [a, b, c, d, e] ... SP <sp> EP <ep>]**

όπου <axis> είναι ο άξονας που πρόκειται να παρεμβληθεί, a, b, c, d, e, είναι οι συντελεστές πολυωνύμων, <sp> είναι η αρχική παράμετρος παρεμβολής και <ep> είναι η τελική παράμετρος.

Ένα παράδειγμα προγραμματισμού θα είναι:

```
G0X0Y0Z1 F100 0
G1
#POLY [X(0,60,0,0,0,) Y(1,0,3,0,0) SP0 EP60
M30
```

Τα νέα CNC επιτρέπουν επίσης να προγραμματιστούν μακροεντολές που καθορίζουν ένα τμήμα προγράμματος ή τμήμα από ένα τμήμα προγράμματος, με τα ονόματά τους, χρησιμοποιώντας τον σχηματισμό “MacroName”=“CNCblock”. Το FagorCNC 8070 επιτρέπει να καθοριστούν μέχρι 50 διαφορετικές μακροεντολές, καθεμία μήκους έως 140 χαρακτήρες. Εδώ παρατίθεται ένα παράδειγμα δύο απλών καθορισμών μακροεντολών:

```
#DEF “READY”= “GO X0 Y0 Z10”
#DEF “START”= “SP1 M3 M41”
```

Επιπλέον, η γλώσσα χειροκίνητου προγραμματισμού όλων των σύγχρονων CNC προσφέρει την πιθανότητα εκτέλεσης εντολών ελέγχου ροής, οι οποίες ήταν κάποτε ο αποκλειστικό χώρος των υποβοηθούμενων γλωσσών προγραμματισμού το υπολογιστή. Ένα παράδειγμα μπορεί να φανεί στις εντολές για την παραλείψη ενός τμήματος, όπως:

*\$ GOTO N <expression>*  
*\$ GOTO [<label>]*

Αυτές είναι απόλυτες παραλείψεις, αν και οι υπό όρους παραλείψεις μπορούν επίσης να προγραμματιστούν όπως:

*\$ IF <condition> ... \$ ENDIF*

Ο προγραμματιστής μπορεί επίσης να προγραμματίσει εντολές 'ifelse':

*\$ IF <condition> ... \$ ELSE ... \$ ENDIF*

ή εντολές 'FOR':

*\$ FOR <n> = <expr 1>, <expr 2>, <expr 3> ... \$ ENDFOR*

Αυτές οι νέες συναρτήσεις δεν ήταν διαθέσιμες σε παλιότερα CNC χειροκίνητης γλώσσας προγραμματισμού.

### 5.7.1 Προγραμματισμός Υποβοηθούμενος από Υπολογιστή

Όταν χρησιμοποιείται ο προγραμματισμός CNC με υποβοήθηση από υπολογιστή, ο ρόλος του προγραμματιστή μειώνεται στο να προετοιμάζει σειρές εντολών, και ο υπολογιστής διεξάγει όλες τις λειτουργίες πολύ πιο γρήγορα και με την ελάχιστη πιθανότητα σφάλματος. Μεταξύ άλλων, ο υπολογιστής μπορεί να συμπληρώσει τις παρακάτω εργασίες:

- Να υπολογίσει όλα τα σημαντικά σημεία κατεργασίας.
- Να συνθέσει τα τμήματα δεδομένων.
- Να ανιχνεύσει και να διορθώσει τα σφάλματα.
- Να ενεργοποιήσει τον καθορισμό των υποπρογραμμάτων προς χρήση σε επαναληπτικές λειτουργίες κατεργασίας.
- 

Ο υπολογιστής χρησιμοποιεί επίσης την κατάλληλη προ-επεξεργασία για να υιοθετήσει τα αποτελέσματα στην γλώσσα μηχανής που απαιτούνται για κάθε CNC.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες γλωσσών υπολογιστή, οι γενικές γλώσσες και οι ειδικές γλώσσες. Οι γενικές γλώσσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε εργαλειομηχανή. Μία γενική γλώσσα είναι ακόμη αναβαθμισμένου λογισμικού, που σημαίνει πως επιτρέπει στον προγραμματιστή να χρησιμοποιήσει ποικίλους τύπους εργαλειομηχανών. Οι ειδικές γλώσσες είναι πιο απλές και έχουν αναπτυχθεί από τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών, για χρήση στις δικές τους μηχανές. Το μειονέκτημα των ειδικών γλωσσών είναι πως έχουν το δικό τους λεξιλόγιο και σύνταξη, αλλά δεν υπάρχει προ-επεξεργασία, και η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει σε ένα μόνο βήμα, με ένα μόνο πρόγραμμα. Γενικά, μία ειδική γλώσσα είναι αφιερωμένου λογισμικού, που υποστηρίζεται μόνο από έναν τύπο μηχανής, για παράδειγμα, τους τόνους. Και οι δύο τύποι γλωσσών πηγάζουν, γενικά μιλώντας, από APT ή CompactII, των οποίων το ξεκίνημα χρονολογείται στα τέλη του 1950 στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασσαχουσέτης.

Όλες αυτές οι γλώσσες και τα παράγωγά τους χρησιμοποιούνται ακόμη, αν και αντικαθίστανται θεαματικά από μοντέρνο γραφικό προγραμματισμό αλληλεπίδρασης, όπου ο προγραμματιστής καθορίζει την γεωμετρία, ως την γεωμετρία της πορείας του εργαλείου. Κάθε γεωμετρικό σφάλμα ανιχνεύεται αυτόματα και εμφανίζεται σε μία οθόνη γραφικών για διόρθωση. Αυτή η τάση αναπτύχθηκε συνεχόμενα μέχρι το 1970, με τα συστήματα CAD/CAM να προσθέτουν την δυνατότητα οπτικοποίησης στις διαδικασίες προγραμματισμού. Τώρα είναι και εύκολο και φθηνό να χρησιμοποιείται ένα σύστημα CAD/CAM στον εργαστήριο, έτσι είναι εύκολο να αναπτυχθούν προγράμματα χρησιμοποιώντας διεπιφάνειες γραφικών. Ακόμη, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενός αποκλειστικά αφοσιωμένου υπολογιστή, καθώς ο ίδιος Η/Υ μπορεί να χρησιμοποιηθεί

επίσης και για άλλες εργασίες. Γενικά, αναπτύχθηκε ένα σχέδιο χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD (όπως το AutoCAD) και στη συνέχεια στάλθηκε στο λογισμικό CAM (όπως το MasterCAM), το οποίο παράγει το πρόγραμμα ελέγχου στην γλώσσα μηχανής. Αυτό, συμπεριλαμβάνει έναν κατάλληλο προ-επεξεργαστή για κάθε CNC. Η διαδικασία απαιτεί μία ανταλλαγή των αρχείων μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. Ο πιο παραδοσιακός τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω IGES (προδιαγραφή ανταλλαγής αρχικών γραφικών). Μία άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι η Autodesk' sDXF. Αυτό το DXF (διαμόρφωση ανταλλαγής σχεδίου) θεωρείται πρότυπη για την ανταλλαγή των σχεδίων, και αναπτύχθηκε από την Autodesk, ιδιοκτήτη του διάσημου προγράμματος AutoCAD, το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα CAD στον κόσμο για εφαρμογές όπου δεν απαιτούνται υψηλά περίπλοκες γεωμετρίες. Γενικά, η DXF χρησιμοποιείται για πιο απλές περιπτώσεις, και η IGES, για πιο περίπλοκες γεωμετρίες. Για περισσότερες πληροφορίες υπολογιστικές γλώσσες προγραμματισμού, ο αναγνώστης κατευθύνεται στα σχετικά εγχειρίδια προγραμματισμού. Αν ενδιαφέρεστε για κλασικές γλώσσες, δείτε τις APT και CompactII. Για σύγχρονα προγραμματιστικά συστήματα που βασίζονται στα Windows, δείτε το δημοφιλές, ισχυρό MasterCAM, αν και υπάρχουν και άλλα πακέτα λογισμικού.

### 5.7.2 Γραφική Προσομοίωση

Όλες οι υπολογιστικές γλώσσες προγραμματισμού προσφέρουν προσομοιώσεις ποικίλων ειδών, για να δείξουν τις πορείες της κατεργασίας σε διαφορετικές ποσότητες λεπτομέρειας. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD/CAM που βασίζονται σε H/Y, προσφέρουν κάτι παραπάνω από ικανοποιητικές εκδόσεις. Τώρα, οι χειροκίνητες γλώσσες προγραμματισμού ενσωματώνουν επίσης γραφικές προσομοιώσεις για την επιλογή μεταξύ διαφορετικών τύπων αναπαράστασης: 1) κάτοψη, 2) θεώρηση πλάνων σχεδίων, και 3) μοντέλο κυβισμού. Το μοντέλο SiemensShopMillCNC για παράδειγμα, προσφέρει αυτές τις εγκαταστάσεις και παρέχει αυτούς τους τρεις τύπους αναπαράστασης.

Το βάθος αναπαριστάται με χρώμα στην κάτοψη της αναπαράστασης; όσο πιο σκούρο το χρώμα, τόσο πιο μεγάλο το βάθος. Η θεώρηση τριών πλάνων δείχνει το σχέδιο με δύο τομές, παρόμοια με το τεχνικό σχέδιο. Οι τομές του σχεδίου μπορεί να κινούνται ελεύθερα γύρω, για να δείξουν τα κρυμμένα περιγράμματα. Τα σύγχρονα CNC μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν μία τρισδιάστατο σχήμα, στην οποία το εξάρτημα φαίνεται σε τρεις διαστάσεις σαν ένα μοντέλο κυβισμού. Το μοντέλο κυβισμού, μπορεί μετά να γυρίσει σε έναν κάθετο άξονα ή να κοπεί σε ένα επιθυμητό σημείο, για να δείξει κρυμμένα περιγράμματα και θεωρήσεις. Μία κοπή μοντέλου κυβισμού με μία διατομή αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση των προγραμμάτων κατεργασίας.

Οι τεχνικές υπολογιστικής γεωμετρίας χρησιμοποιούνται για να αναπτύξουν αυτές τις προσομοιώσεις, με μία θεώρηση αναπαράστασης συμπαγών αντικειμένων στο CAD. Υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικές βασικές διαμορφώσεις, οι πιο γνωστές είναι οι ακόλουθες:

- Οριακή αναπαράσταση (B-rep), στην οποία το αντικείμενο αναπαριστάται από τις αιχμές του, καθορίζεται ως ένα σύνολο κορυφών, ορίων και εδρών. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον τρόπο σύνδεσης όλων αυτών των στοιχείων.
- Μέθοδοι σάρωσης, στους οποίους το αντικείμενο αναπαριστάται ως ένας όγκος που παράγεται από την δημιουργία μίας καμπυλωτής σάρωσης απέναντι από έναν επίπεδο σχηματισμό.
- Αρχική περίσταση, η οποία εμπλέκει την παραμετρική περιγραφή όλων των δυνατών αντικειμένων.
- Δομική συμπαγής γεωμετρία (CSG), η οποία χρησιμοποιεί ένα σύνολο αρχέτυπων όπως κύβους, σφαίρες και κυλίνδρους.

- Χωρική απαρίθμηση, ένας τρόπος αναπαράστασης ενός στερεού χρησιμοποιώντας δυαδικά στοιχεία ομοιόμορφου μεγέθους, που είναι γνωστά ως «voxels».
- Διάσπαση κελιών, στα οποία το αντικείμενο αναπαριστάται ως ένας συνδυασμός από κελιά διαφορετικού ελέγχου.

Τα στερεά που κυρίως χρησιμοποιούνται στο CAD είναι τα B-rep. Η αναπαράσταση B-rep είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα σημερινά συστήματα CAD, αν και η χρήση τους για να αναπαραστούν δυναμικά στερεά δεν είναι συμβατή με τις συνθήκες ταχύτητας και διαδραστικότητας που απαιτούνται σε μία εικονική προσομοίωση. Ένα παρόμοιο πρόβλημα αναπτύσσεται με την διάταξη CSG, περιλαμβάνοντας υψηλές υπολογιστικές τάξεις, ανάλογα με τον αριθμό των αρχέτυπων. Για να λυθούν τα υπολογιστικά προβλήματα που παρουσιάζονται προσομοιώνοντας μία διαδικασία κατεργασίας CNC, αυτό που χρησιμοποιείται γενικά είναι οι τεχνικές προσέγγισης της γεωμετρίας ή χωρική υποδιαίρεση του χώρου εργασίας. Ένα άλλος παράγοντας που γεννιέται στο νου, είναι πως οι παραδοσιακές τεχνικές δεν αποθηκεύουν τις γεωμετρικές πληροφορίες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης, αλλά μόνο τροποποιούν την γραφική έξοδο στην οθόνη χρησιμοποιώντας τεχνικές βασισμένες στο σχήμα. Αυτό έχει σοβαρούς περιορισμούς, όπως το γεγονός ότι αναπαράγοντας μία διαφορετική όψη από ένα άλλο σημείο θα απαιτούσε έναν εκ νέου υπολογισμό ολόκληρης της προσομοίωσης, και το γεγονός ότι είναι δύσκολο να ανιχνευτούν σφάλματα μέσα σε ρεαλιστικές ανοχές.

Η έρευνα βρίσκεται σήμερα σε εξέλιξη για μία τεχνική γνωστή ως αναπαράσταση βασιζόμενη στο επίπεδο, ή LBR. Τα αντικείμενα LBR προσεγγίζονται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από ομοιόμορφης απόστασης παράλληλα επίπεδα. Κάθε επίπεδο σχηματίζεται από ένα σύνολο μη-διασταυρούμενων συνεπίπεδων περιγραμμάτων. Ο βαθμός ακρίβειας που αποκτάται θα καθοριστεί από τον αριθμό των επιπέδων που χρησιμοποιούνται. Οι λειτουργίες Boolean, μπορούν να εκτελεστούν μεταξύ αντικειμένων LBR, δημιουργώντας συνεπώς μία αλληλεπιδρούσα τρισδιάστατη οπτικοποίηση ανεξάρτητη από το σημείο θεώρησης. Η γεωμετρία μπορεί επίσης να εξαχθεί και να εισαχθεί.

Όλα τα συστήματα υποστήριξης του προγραμματισμού, προσφέρουν ισχυρά εργαλεία προσομοίωσης, μερικά μέσα στο ίδιο το CNC, και άλλα σε έναν εξωτερικό υπολογιστή, ο οποίος ενεργοποιεί την κατεργασία ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος που πρόκειται να προσομοιωθεί πριν την επεξεργασία. Ωστόσο, όλοι οι προσομοιωτές είναι καθαρά γεωμετρικοί. Έπρεπε επίσης, για παράδειγμα, να υπάρχουν προσομοιωτές επεξεργασίας, για να δείχνουν τις αναμενόμενες ισχύεις κοπής που θα παραγόταν, ενώ η εργαλειομηχανή κατασκευάζει το εξάρτημα. Τέτοιοι προσομοιωτές επεξεργασίας θα ενεργοποιούσαν πολύ καλύτερα τα τμήματα προγραμμάτων που πρόκειται να δημιουργηθούν, επειδή οι συνθήκες κοπής θα μπορούσαν τότε να προγραμματιστούν σε συμφωνία με την απαιτούμενη αντικειμενική συνάρτηση.

## 5.8 Σύγχρονες Αρχιτεκτονικές CNC

Για πολλά χρόνια τώρα, τα συστήματα CNC έχουν εξελιχθεί από κλειστές, ιδιόκτητες αρχιτεκτονικές σε πιο ανοιχτά συστήματα. Αυτή η τάση παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1998 με την ανάπτυξη του συστήματος MOSAIC στο Πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης. Ένα ευρωπαϊκό αρχέτυπο αναδύθηκε σχεδόν ταυτόχρονα στο ερευνητικό έργο OSACA, το οποίο με τη σειρά του, σχημάτιζε τμήμα του ερευνητικού ESPRITIII. Το 1994, έξι Ιαπωνικές εταιρίες ίδρυσαν μία ομάδα εργασίας γνωστή ως OSE (περιβάλλον ανοιχτού συστήματος), κοινοπραξία για την ανάπτυξη ανοιχτής αρχιτεκτονικής μέσω του ερευνητικού έργου OSEC. Στον τομέα της αυτοκίνησης, η GeneralMotors οδήγησε ένα άλλο αρχέτυπο για να αναπτύξει ελεγκτές ανοιχτής αρχιτεκτονικής, γνωστούς ως OMAC. Στην πράξη, δεδομένης της απουσίας κάποιου καθαρού καθορισμού ανοιχτής αρχιτεκτονικής των CNC, το άνοιγμα

λαμβάνεται ως εξελισσόμενη δομοστοιχείωση, φορητότητα, επεκτασιμότητα, διαλειτουργικότητα και επεκτασιμότητα.

Σήμερα, υπάρχει ένας αριθμός λύσεων ανοιχτού συστήματος, καθεμία εμφανίζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και καθεμία προσφέροντας έναν μεταβλητό βαθμό ανοίγματος.

### 5.8.1 Συστήματα που βασίζονται στην Αρχιτεκτονική του Πολλαπλού-Μικροεπεξεργαστή

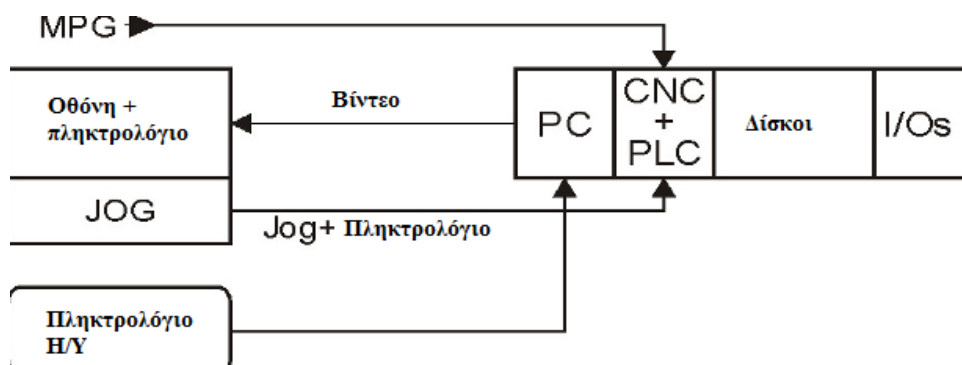
Μέχρι λίγα χρόνια πριν, όταν η συγχώνευση του υπολογιστή έγινε αναπόφευκτη, αυτές ήταν οι πιο κοινές αρχιτεκτονικές. Ήταν ιδιόκτητες αρχιτεκτονικές υπό τη μορφή εξοπλισμού και λογισμικού, και δεν είναι πλέον σε χρήση.

### 5.8.2 Ο H/Y Front/end

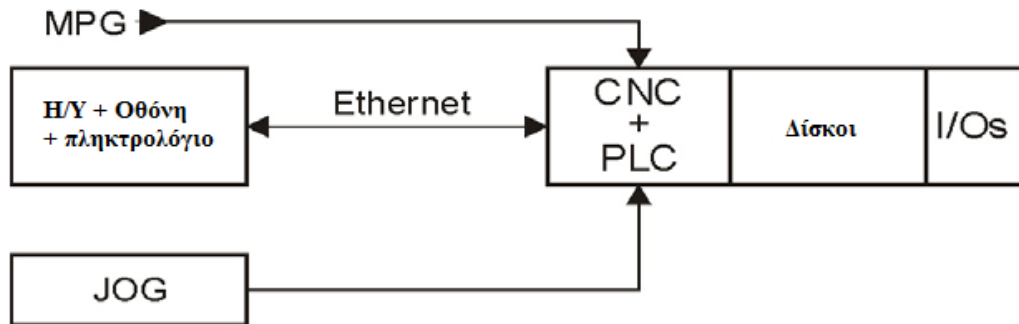
Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός H/Y σε ένα παραδοσιακό σύστημα CNC. Στην περίπτωση αυτή, ο H/Y χρησιμοποιείται βασικά για να βελτιώσει την διεπιφάνεια με τον χειριστή, αν και όλες οι εργασίες ελέγχου παραμένουν ριζωμένες στο CNC.

Ο H/Y μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στον πίνακα ηλεκτρικού ελέγχου ή στο πληκτρολόγιο. Στην πρώτη περίπτωση, ο H/Y σχηματίζει μία επιπλέον λειτουργική μονάδα στο κλασικό CNC (δείτε [Σχήμα 5.19](#)). Η αρχιτεκτονική αυτή προσφέρει μία κλασική λύση, και το βασικό της πλεονέκτημα είναι το χαμηλό επίπεδο κραδασμών από τον σκληρό δίσκο. Το σημαντικό μειονέκτημα είναι πως τα περιφερειακά του H/Y στον πίνακα ηλεκτρικού ελέγχου, μπέρδευαν τα καλώδια και συγκέντρωναν τις εισόδους/εξόδους.

Στην δεύτερη περίπτωση, ο H/Y είναι ενσωματωμένος στο πληκτρολόγιο, ενεργώντας ως διεπιφάνεια με τον χειριστή, και χρησιμοποιώντας μία γραμμή υψηλής ταχύτητας (συνήθως Ethernet) για να επικοινωνούν με έναν συμβατικό αριθμητικό έλεγχο που τοποθετείται στον ηλεκτρικό πίνακα (δείτε την [Σχήμα 5.20](#)). Τα πλεονεκτήματα του συστήματος συμπεριλαμβάνουν το γεγονός ότι ο H/Y ενσωματώνεται μέσα στο πληκτρολόγιο και η καλωδίωση είναι πιο απλή. Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα είναι το υψηλότερο κόστος (χρήση του Ethernet), συγκεντρωμένες εισοδοί/εξοδοί και μεγαλύτερος κραδασμός (σκληρός δίσκος). Αυτό το είδος διαμόρφωσης απαιτεί την χρήση δύο λειτουργικών συστημάτων, όπως, για παράδειγμα, MSWindows και ένα ιδιόκτητο λειτουργικό σύστημα NC. Η χρήση αυτού του συστήματος είναι σε ύφεση.



Σχήμα 5. 19 – Σχεδιάγραμμα αρχιτεκτονικής εξοπλισμού I.



Σχήμα 5. 20 - Σχεδιάγραμμα αρχιτεκτονικής εξοπλισμού II.

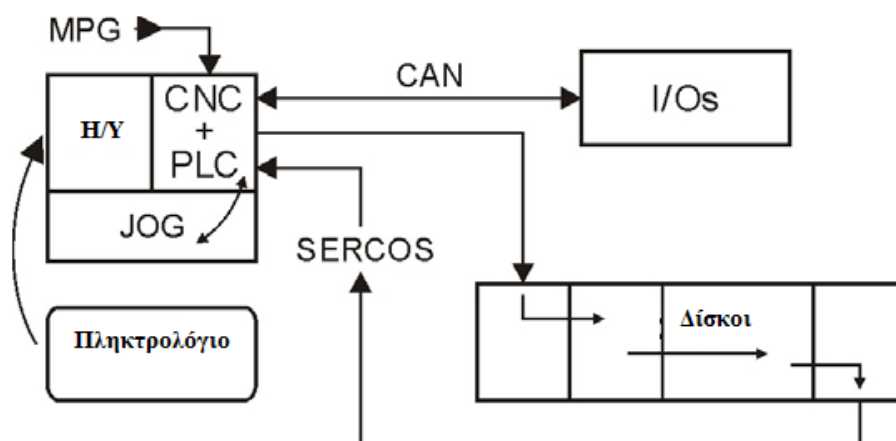
### 5.8.3 Η Κάρτα Ελέγχου της Κίνησης με έναν H/Y

Αυτές οι κάρτες, οι οποίες φυσιολογικά χρησιμοποιούν ένα σύστημα επεξεργασίας σήματος, χρησιμοποιούνταν για να διεξάγουν τις πιο κρίσιμες εργασίες (πραγματικού χρόνου), ενώ ο ίδιος ο H/Y διεξάγει τις μη-κρίσιμες λειτουργίες (μη πραγματικού χρόνου). Οι δύο CPU μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός διαύλου H/Y ή μέσω μίας διπλής μνήμης RAM. Ο σχηματισμός βελτιώνει την διεπιφάνεια και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και στους κατασκευαστές και στους χειριστές. Το βασικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη χρησιμοποίησης επιπρόσθετου εξοπλισμού, γενικά μία κάρτα DSP ελέγχου της κίνησης. Αυτή η λύση χρησιμοποιείται ευρέως στα σύγχρονα συστήματα CNC.

### 5.8.4 Η Βασισμένη στο Λογισμικό Λύση

Αυτή είναι η ιδανική λύση, καθώς όλες οι λειτουργίες CNC εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας την εκτέλεση λογισμικού στον H/Y. Οι κρίσιμες λειτουργίες εφαρμόζονται από το λογισμικό με την υποστήριξη ενός λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου (RTOS). Στην περίπτωση αυτή, ο H/Y τοποθετείται στο πληκτρολόγιο και διεξάγει όλες τις απαραίτητες εργασίες, και ως CNC και PLC, και ως μίας διεπιφάνεια χειριστή. Επικοινωνεί με τις εισόδους/εξόδους που κατανέμονται γύρω από την μηχανή και τους ψηφιακούς ρυθμιστές μέσα στον πίνακα ηλεκτρικού ελέγχου, χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα fieldbuses (δείτε την [Σχήμα 5.21](#)). Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αρχιτεκτονικής είναι: 1) περιφερειακά του H/Y στο πληκτρολόγιο, 2) απλούστερη καλωδίωση, 3) κατανεμημένες εισοδοί/εξοδοί, και 4) υποστήριξη μίας λύσης μονού επεξεργαστή για ελέγχους χαμηλής κλίμακας. Το βασικό μειονέκτημα είναι η μεγαλύτερη δόνηση (σκληρός δίσκος).

Υπάρχουν ποικίλα είδη fieldbuses: Profibus, CAN, SERCOS και άλλα. Όλα τους απαιτούν μία κύρια κάρτα (master) που να συνδέεται στον H/Y για να μπορεί να επικοινωνήσει με τις συσκευή που ακολουθούν (slaves). Τα σύγχρονα συστήματα CNC συνήθως χρησιμοποιούν τον δίαυλο CAN για τις εισόδους/εξόδους και τον SERCOS για την ενεργοποίηση των μηχανών. Γενικά μιλώντας, οι δίαυλοι SERCOS και CAN δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα ως διεπιφάνεια επικοινωνιών, έτσι πρέπει να επιλεγεί ένα από αυτά.



Σχήμα 5. 21 - Σχεδιάγραμμα αρχιτεκτονικής εξοπλισμού III.

Η διεπιφάνεια SERCOS (IEC 1491), είναι μία ψηφιακή διεπιφάνεια για επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων τα οποία πρέπει να ανταλλάσσουν πληροφορίες κυκλικά σε μικρά και σταθερά διαστήματα. Είναι κατάλληλο για τις σύγχρονες λειτουργίες καταμετρημένου ελέγχου ή ελέγχου εξοπλισμού, π.χ. σύνδεση μεταξύ δίσκων και αριθμητικοί έλεγχοι.

Μία διεπιφάνεια συστήματος επικοινωνίας SERCOS αποτελείται από ένα «κύριο» και πολλούς «ακολουθούς». Αυτές οι μονάδες συνδέονται από έναν δακτύλιο οπτικής ίνας. Αυτός ο δακτύλιος αρχίζει και τελειώνει στον «κύριο». Οι «ακόλουθοι» αναπαράγουν και επαναλαμβάνουν τα ληφθέντα δεδομένα ή στέλνουν τα δικά τους τηλεγραφήματα. Με την μέθοδο αυτή, τα τηλεγραφήματα που στέλνονται από τον «κύριο», λαμβάνονται από όλους τους «ακολουθούς». Η οπτική ίνα εξασφαλίζει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, με εξαιρετική ανοσία στον θόρυβο.

Ο ελεγκτής SERCON816 της διεπιφάνειας SERCOS, είναι ένα αναβαθμισμένο κύκλωμα για τα συστήματα επικοινωνίας με διεπιφάνεια SERCOS. Περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό της διεπιφάνειας SERCOS και μειώνει σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού και τις απαιτήσεις του υπολογιστικού χρόνου του μικροεπεξεργαστή. Είναι η άμεση διασύνδεση μεταξύ του ηλεκτρο-οπτικού παραλήπτη και του μεταδότη και του μικροεπεξεργαστή που εκτελεί του αλγόριθμους ελέγχου. Ο SERCON816 μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για «κύριους» και «ακόλουθους» διεπιφάνειας SERCOS.

Με τον δίαυλο SERCOS, οι ελεγκτές κινητήρα μπορούν να συνδεθούν σε έναν δακτύλιο οπτικής ίνας, συνήθως στα 16MHz. Ο δακτύλιος επικοινωνίας SERCOS προσφέρει τις ακόλουθες λειτουργίες, 1) κουβαλάει την οδηγία ταχύτητας από το CNC στον ελεγκτή σε μία ψηφιακή διάταξη, με μεγαλύτερη ακρίβεια και με καμία πιθανότητα εξωτερικής διατάραξης; 2) κουβαλάει την ανατροφοδότηση του σήματος από τον ελεγκτή στο CNC; 3) παρέχει πληροφορίες σε όλα τα σφάλματα και διαχειρίζεται τα βασικά σήματα «ενεργοποίησης του ελεγκτή»; 4) επιτρέπει την ρύθμιση, την παρακολούθηση και την διάγνωση των παραμέτρων από ένα CNC, χρησιμοποιώντας απλές, τυποποιημένες διαδικασίες. Αυτό ελαχιστοποιεί την ποσότητα του εξοπλισμού που απαιτείται στον ελεγκτή και παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Η ανοιχτή, τυπική δομή του, παρέχει συμβατότητα μεταξύ των ελέγχων και των δίσκων από διαφορετικούς κατασκευαστές μέσα στην ίδια μηχανή. Η εργασία είναι σήμερα σε εξέλιξη για την ώθηση της ταχύτητας στα 100MHz μέσω Ethernet.

Η διεπιφάνεια ISO 11898 CAN είναι ένα διεθνές πρότυπο για ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ ελεγκτών και μηχανών οδήγησης της κίνησης χρησιμοποιώντας CNC. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι το CanOpen, τυποποιημένο ως EN 50325-4. Ο δίαυλος επικοινωνίας CAN καλύπτει τις ίδιες λειτουργίες με τον SERCOS, με την μόνη διαφορά να είναι στο ότι ο τελευταίος αποτελεί μία σύνδεση δακτυλίου, ενώ ο CAN χρησιμοποιεί τοπολογία δέντρου.

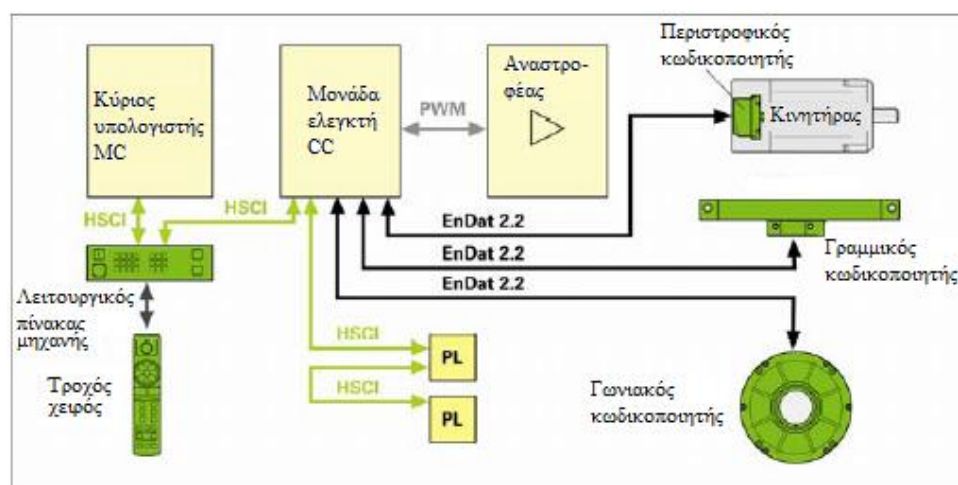
Οι ελεγκτές θέσης μπορούν να τοποθετηθούν στα CNC ή μέσα στους εξωτερικούς ρυθμιστές. Η τάση με τα σύγχρονα CNC είναι η εξωτερική τους χρησιμοποίηση, με τον βρόχο τοποθέτησης να είναι κλειστός από τους ρυθμιστές. Στην περίπτωση αυτή, οι αναφορές της θέσης στέλνονται στον ρυθμιστή κάθε δύο ή τέσσερα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Ο ρυθμιστής εξοπλίζεται με έναν παρεμβολέα, ο οποίος παράγει ενδιάμεσες αναφορές θέσης κάθε 250 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Ο ρυθμιστής επιστρέφει την πραγματική θέση του άξονα στο CNC, καθαρά σκοπούς οπτικοποίησης και διάγνωσης. Επειδή ο βρόχος θέσης κλείνεται από τον ρυθμιστή.

Στα συστήματα λύσης που βασίζονται στο λογισμικό, σημαντικό ρόλο παίζει το λειτουργικό σύστημα. Οι εφαρμογές ελέγχου πραγματικού χρόνου όπως η παρεμβολή και σερβο-έλεγχος, απαιτούν το RTOS να ιδιότητες προσδιορισμού πραγματικού χρόνου και χαμηλή αδράνεια. Για εργασίες μη πραγματικού χρόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα WindowsNT και τα Linux, τα τελευταία να είναι λογισμικά ελεύθερης πρόσβασης, με κώδικες ανοιχτής πηγής, που προσφέρουν υποστήριξη πλήρους πρωτοκόλλου, σταθερότητα και χαμηλή αδράνεια (με το RT-Linux). Οι εργασίες πραγματικού χρόνου μπορούν να διεξαχθούν χρησιμοποιώντας RT-Linux ή RTX, μία τεχνολογία για WindowsNT που προσφέρουν αποδοτικότητα RTOS και μεθόδους προσδιορισμού.

### 5.8.5 Πλήρως Ψηφιακές Αρχιτεκτονικές: Προς τις Έξυπνες Εργαλειομηχανές

Υπάρχει τώρα μία καθαρή τάση για όλα τα στοιχεία του συστήματος, να διασυνδέονται χρησιμοποιώντας καθαρά ψηφιακές διεπιφάνειες. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτό συμπεριλαμβάνει την χρήση πρότυπων fieldbuses όπως τους SERCOS ή CAN. Αλλιώς, σημαίνει την χρήση ειδικών διεπιφανειών που αναπτύχθηκαν από τους κατασκευαστές των ίδιων των ελεγκτών. Για παράδειγμα, ο Heidenhain χρησιμοποιεί την δική του διεπιφάνεια, την οποία ονομάζει HSCI, για να συνδέσει τον κύριο υπολογιστή (MC) με τον λειτουργικό πίνακα της μηχανής, και τον λειτουργικό πίνακα της μηχανής με τις μονάδες ελέγχου CC. Οι ψηφιακές διεπιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης για σύνδεση με το PLC. Οι κωδικοποιητές συνδέονται στους ελεγκτές CC μέσω μίας αμφίδρομης διεπιφάνειας, ανεπτυγμένη επίσης από τον Heidenhain, γνωστή ως EnDat 2.2. Μέχρι δύο μονάδες ελεγκτή CC μπορούν να συνδεθούν για να ελέγξουν μέχρι 14 άξονες μηχανής (δείτε [Σχήμα 5.22](#)).

Επιπρόσθετα με τις βελτιώσεις στις πλήρως ψηφιακές αρχιτεκτονικές, αναπτύξεις γίνονται επίσης στην περιοχή των «έξυπνων μηχανών», εννοώντας τις μηχανές που ενσωματώνουν έναν αριθμό «έξυπνων λειτουργιών». Το Integrex-150 του Mazak ενσωματώνει πέντε έξυπνες λειτουργίες, δηλαδή:



Σχήμα 5. 22 – Ψηφιακές συνδέσεις των ποικίλων στοιχείων ελέγχου. Ενεργός έλεγχος κραδασμού, ο οποίος μειώνει την δόνηση που προκαλείται από την κίνηση των αξόνων και συνεπώς δίνει υψηλή θέση ακρίβειας. Αυτό δημιουργεί υψηλότερη ποιότητα επιφάνειας και καλύτερη προστασία του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.








Μία έξυπνη θερμική ασπίδα. Οι αλλαγές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμότητα που παράχθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατεργασίας, αλλάζουν την ακρίβεια της ίδιας της μηχανής. Για να διορθωθεί αυτό, ο χειριστής εξαναγκάζεται να διεξάγει την σχετική θερμική αντιστάθμιση. Μία έξυπνη θερμική ασπίδα, ωστόσο, προσφέρει αυτόματη αντιστάθμιση για τις αλλαγές θερμοκρασίας, οδηγώντας σε σταθερή, υψηλής ακρίβειας κατεργασία.

Μία έξυπνη ασπίδα ασφαλείας, η οποία αποτρέπει τα σφάλματα που ξεκινούν από την παρεμβολή με την μηχανή λόγω σφάλματος του χειριστή. Αν συμβεί οποιαδήποτε παρεμβολή της μηχανής, σταματάει αμέσως η κίνηση της μηχανής.

Ένας σύμβουλος φωνής Mazak, με τον οποίο το σύστημα CNC συμβουλεύει προφορικά για πιθανά προβλήματα. Για παράδειγμα, η λειτουργία συμβουλεύει πως η λίπανση πρέπει να προστεθεί ή πως τελειώνει η διάρκεια ζωής ομαλής λειτουργίας του εργαλείου.

Μία έξυπνης απόδοσης άτρακτος, η οποία χρησιμοποιεί αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι μέσα στην άτρακτο για να παρέχουν πληροφορίες θερμοκρασίας, κραδασμού και παραμόρφωσης της ατράκτου. Αυτό μπορεί να αποτρέψει τα προβλήματα που σχετίζονται με την άτρακτο στην μηχανή.

Ο Mazak έχει επίσης ανακοινώσει πως οι μηχανές του έχουν τώρα μία έξυπνη υποστήριξη συντήρησης, η οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην συντήρηση της μηχανής (δείτε την Σχήμα 5.23).

 AVC	Ελαχιστοποιημένος κραδασμός ΕΝΕΡΓΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ Ελαχιστοποιημένος κραδασμός για υψηλή ταχύτητα, υψηλή ακρίβεια κατεργασίας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου
 ITS	Έλεγχος μετατόπισης θερμοκρασίας ΕΞΥΠΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΣΠΙΔΑ Μοναδικό σύστημα Mazak αντιστάθμισης της μετατόπισης της θερμοκρασίας
 ISS	Αποτροπή παρεμβολών της μηχανής ΕΞΥΠΝΗ ΑΣΠΙΔΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ Συναρτήσεις για την ομαλή λειτουργία κατά τη διάρκεια εγκατάστασης της μηχανής και χειροκίνητης λειτουργίας
 MVA	Σύστημα φωνητικού μηνύματος ΦΩΝΗΤΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ MAZAK Φωνητική υποστήριξη για την εγκατάσταση της μηχανής και για ασφαλείς συνθήκες επιβεβαίωσης
 IPS	Περιεκτική παρακολούθηση της ατράκτου ΑΤΡΑΚΤΟΣ ΕΞΥΠΝΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Κατάσταση παρακολούθησης της ατράκτου - για προληπτική συντήρηση
 IBA	Ασταθής ανίχνευση και ανάλυση τράπεζας ΕΞΥΠΝΟΣ ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Δείχνει το απαιτούμενο βάρος και τις τοποθεσίες για να εξαλειφθεί η κατάσταση αστάθειας
 IMS	Οθόνη περιεκτικής συντήρησης ΕΞΥΠΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΣΥΝΤΗΡΙΣΗΣ Χρήσιμες πληροφορίες για αποτρεπτική συντήρηση

Σχήμα 5. 23 – Επτά έξυπνες λειτουργίες, από Mazak.



## **6° Κεφάλαιο: Απόδοση και Ακρίβεια Εργαλειομηχανών**

### **Περίληψη Κεφαλαίου:**

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τον σχεδιασμό της κύριας εργαλειομηχανής, την κατασκευή και τις πλευρές ελέγχου ώστε να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια στα κατεργαζόμενα εξαρτήματα. Όχι μόνο η εργαλειομηχανή, αλλά και η ίδια η διαδικασία της κατεργασίας αποτελεί μία πηγή σφαλμάτων στα εξαρτήματα. Συνεπώς, απαιτείται μία ολιστική θεώρηση που περιλαμβάνει την μηχανή και την διαδικασία κατεργασίας.

Ο σχεδιασμός των μηχανών υψηλής ακρίβειας περιλαμβάνει μερικές βασικές αρχές και μεθοδολογίες οι οποίες παρουσιάζονται σε βάθος παρακάτω. Ένας παράγοντας κλειδί είναι η αναγνώριση των πηγών σφάλματος, μελετώντας τις πρακτικές αιτίες και την σχετικότητα με την τελική αβεβαιότητα. Συνεπώς, περιγράφονται το σφάλμα συναρμολόγησης, η θερμική ανάπτυξη, οι παραμορφώσεις στοιχείων και η ανακρίβεια ελέγχου.

Τα σφάλματα στα στοιχεία πολλαπλασιάζονται κατά μήκος της κινηματικής αλυσίδας της μηχανής, παράγοντας μεγαλύτερα σφάλματα τοποθέτησης στην θέση της άκρης του εργαλείου και του προσανατολισμού του άξονα του εργαλείου. Η χρήση ομογενών πινάκων εισάγεται ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση πολλαπλασιασμού του σφάλματος.

Η εκτροπή του εργαλείου και η παραμόρφωση της μηχανής που προκλήθηκε από τις δυνάμεις κοπής αποτελούν μία ακόμη σημαντική πηγή σφάλματος. Δυστυχώς, η εκτροπή είναι αδύνατον να αποφευχθεί αν και μερικά μοντέλα παρέχονται τώρα με επιλογέα μονοπατιού της κατεργασίας, υπονοώντας ελάχιστες δυνάμεις κοπής μαζί με κατευθύνσεις ευαίσθητες στα σφάλματα.

Μετά την κατασκευή και λίγο πριν η εργαλειομηχανή να παραδοθεί στον πελάτη, η επαλήθευση της ακρίβειας και της απόδοσης πρέπει να εκτελείται πάντα. Μία περιγραφή των προτύπων και των διαδικασιών που ήδη υπάρχουν, περιγράφονται στο τέλος του κεφαλαίου αυτού.

### **6.1 Εισαγωγή και Ορισμοί**

Στην υψηλά ανταγωνιστική αγορά, οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών πρέπει να χτίζουν υψηλής ακρίβειας μηχανές, ενώ συγχρόνως, να κρατούν τις τιμές όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Η ιστορία των εργαλειομηχανών είναι συνδυασμένη με την ακρίβεια τους, και συνεπώς, με την ακρίβεια των υλικών που πρόκειται να παραχθούν από αυτά, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5 στο πρώτο Κεφάλαιο.

Η βελτίωση της ακρίβειας των εργαλειομηχανών βοήθησε έντονα στην αύξηση προστιθέμενης αξίας των κατασκευασμένων εξαρτημάτων, μειώνοντας την προσαρμοστικότητα και τερματίζοντας λειτουργίες όταν τα εξαρτήματα αυτά συναρμολογούνται σε περίπλοκα συστήματα. Τα τελικά αποτελέσματα είναι και τεχνικά και οικονομικά, τα συστήματα είναι όλο και περισσότερο αξιόπιστα όταν μειώνονται οι ανοχές της κατεργασίας και συγχρόνως χρειάζονται λιγότερες λειτουργίες χειροκίνητης προσαρμογής στην τελική συναρμολόγηση. Ο αντιεκρηκτικός κινητήρας είναι ένα καλό παράδειγμα. Σήμερα η αξιοπιστία αυτού του περίπλοκου συστήματος είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη των μηχανών των αυτοκινήτων του περασμένου αιώνα; η παραγωγή τους είναι τελείως αυτόματη, χρησιμοποιώντας κέντρα κατεργασίας CNC, μηχανές διάτρησης και λείανσης, συστήματα αυτοματοποιημένης μεταφοράς και βοηθητικής συναρμολόγησης ρομποτικών.

Σε πολλές εφαρμογές η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια σχετίζεται ταυτόχρονα με τις αντίθετες συνήθως απαιτήσεις, π.χ. την ανάγκη υψηλών ποσοστών παραγωγικότητας. Ενώ την ίδια στιγμή, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ακόμη και το χαμηλό κόστος παραγωγής και η περιβαλλοντική επίδραση. Μία καλή λύση όπου αυτοί οι παράγοντες ισορροπούν μπορεί να είναι η έννοια της «κατεργασίας υψηλής απόδοσης», όπου η εργαλειομηχανή οικολογικής αποδοτικότητας αποτελεί το βασικό στοιχείο. Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει κυρίως στην έννοια της ακρίβειας, ωστόσο, θα λάβει υπόψη και άλλες πτυχές

### 6.1.1 Μία Εισαγωγή Στη Κατεργασία Ακρίβειας

Το κόστος κατεργασίας για ένα εξάρτημα αυξάνει εκθετικά καθώς αυξάνει το απαιτούμενο επίπεδο ακριβείας; αυτή είναι μία διαδεδομένη πεποίθηση πολλών μηχανικών παραγωγής. Ωστόσο, αυτή η έννοια της ακρίβειας, όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το κόστος του κάθε εξαρτήματος, εξαιρώντας κάθε άλλο παράγοντα, είναι κάπως ξεπερασμένη. Ακολουθώντας αυτή την παλιά ιδέα, το κριτήριο του 20<sup>ου</sup> αιώνα για του καθορισμού του επιπέδου ακριβείας του συστήματος παραγωγής, ήταν το λιγότερο απαιτούμενο για να αποφευχθεί η απόρριψη του εξαρτήματος από τους πελάτες, ενώ συγχρόνως, διατηρώντας την τιμή όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Επιπλέον επενδύσεις για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας θεωρούνταν τελείως περιττές.

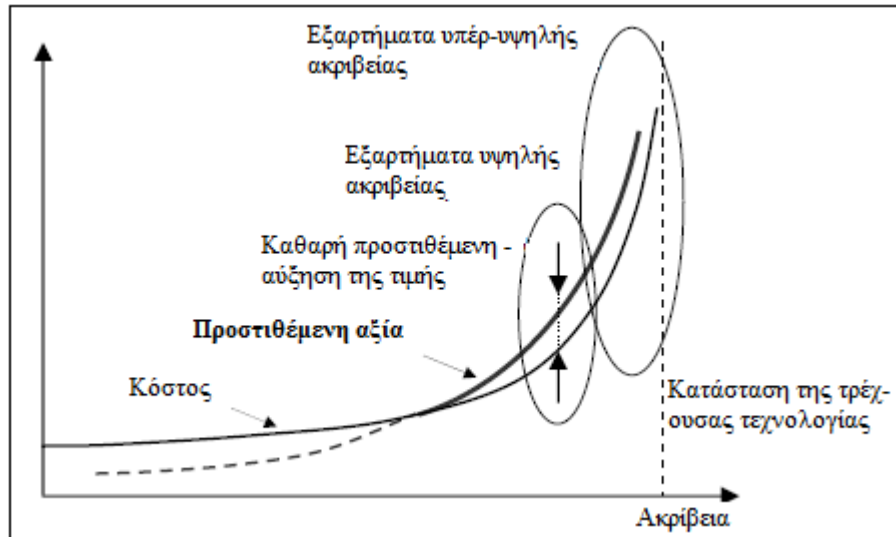
Ωστόσο, μερικοί συγγραφείς εκτιμούν πως η κατεργασία ακριβείας μπορεί να είναι πολύ πιο αποτελεσματικού κόστους από την συμβατική κατεργασία αν μπουν στο παιχνίδι και οι άλλες πτυχές. Συνεπώς, η κατεργασία υψηλής ακριβείας εξαλείφει την ανάγκη λειτουργιών επίπτονου φινιρίσματος και προσαρμογής, μειώνοντας το κόστος τελικής συναρμολόγησης όταν εισαχθούν τα στοιχεία. Ένα παράδειγμα αναπαράστασης είναι ένα απλό πλαστικό στοιχείο ψεκασμού, για ένα ταμπλό αυτοκινήτου ή για έναν προφυλακτήρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά τα εξαρτήματα σχεδιάζονται και για αεροδυναμικές και για αισθητικές λειτουργίες, έτσι υπάρχουν συνήθως υψηλές απαιτήσεις φινιρίσματος της επιφάνειας (σε πολλές περιπτώσεις κάτω από 0.1μmRa). Αυτά τα εξαρτήματα πρέπει να συναρμολογούνται σε ένα πιο πολύπλοκο σύστημα, το οποίο πρέπει να συναντά μερικές απαιτήσεις διάστασης, χωρίς εκκαθαρίσεις ή επικαλύψεις. Επιπλέον, αυτά τα εξαρτήματα συναρμολογούνται σε κατασκευαστικές γραμμές μαζικής παραγωγής, ώστε η σκληρότητα και η διαστασιολογική ανοχή να κρατιούνται σε ολόκληρη την σειρά παραγωγής. Μπορούν να ανιχνευθούν διάφορες πηγές σφάλματος για αυτό το απλό πλαστικό εξάρτημα ψεκασμού: Σφάλματα από την διαδικασία πλαστικού ψεκασμού. Αυτά σχετίζονται με την συστολή του εξαρτήματος λόγω των διαδικασιών στερεοποίησης και ψύξης, τα ελαττώματα και τις γρατζουνιές του εξαρτήματος λόγω της ροής του πλαστικού μέσα στο καλούπι, κλπ.

Σφάλματα της πλαστικής μηχανής ψεκασμού. Αυτά σχετίζονται με την κακή ευθυγράμμιση στην εγκατάσταση του καλουπιού, με τις θερμικές αποκλίσεις, και την παραμόρφωση της μηχανής λόγω της δύναμης κλεισίματος του καλουπιού.

Σφάλματα από το ίδιο το καλούπι. Όλα τα σφάλματα κατεργασίας καλουπιού αναπαράγονται απευθείας στα εξαρτήματα ψεκασμού. Η κατεργασία καλουπιού πρέπει να εξασφαλίζει μία υψηλότερη ακρίβεια από μία τάξη μεγέθους του απαιτούμενου εξαρτήματος ψεκασμού. Αυτή η ακρίβεια μπορεί να βρίσκεται στην κλίμακα 0.05-0.01 mm σε ολόκληρο το καλούπι. Τα σφάλματα καλουπιού πηγάζουν από εκείνα των εργαλειομηχανών και από εκείνα που ξεκινούν από την διαδικασία κατεργασίας; και οι δύο τύποι εξηγούνται στις επόμενες ενότητες.

Λαμβάνοντας υπόψη την προστιθέμενη αξία των εξαρτημάτων της μηχανής και συσχετίζοντάς την με το κόστος παραγωγής (όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1), κάποιος μπορεί να παρατηρήσει πως η παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας μπορεί να είναι πολύ πιο κερδοφόρα από των συμβατικών, όχι μόνο υπό τη μορφή αυστηρά οικονομικού κέρδους αλλά και μελλοντικής ενοποίησης της αγοράς. Όπως φαίνεται, όταν η ακρίβεια είναι κοντά

στο μέγιστο, η ισορροπία είναι θετική για τους χρήστες της μηχανής. Φυσικά, το κόστος επίτευξης του μέγιστου επίπεδου ακρίβειας είναι πολύ υψηλό, ωστόσο, απαιτείται μόνο σε μερικές ειδικές εφαρμογές για την αστρονομία, την παραγωγή φακών, την μετρολογία, την φυσική και άλλες συναρμολογήσεις οργάνων των συσκευών; στις εφαρμογές αυτές το κόστος δεν αποτελεί παράγοντα κλειδί.



Σχήμα 6. 1 – Συσχέτιση μεταξύ ακρίβειας, προστιθέμενης αξίας του εξαρτήματος και κόστους.

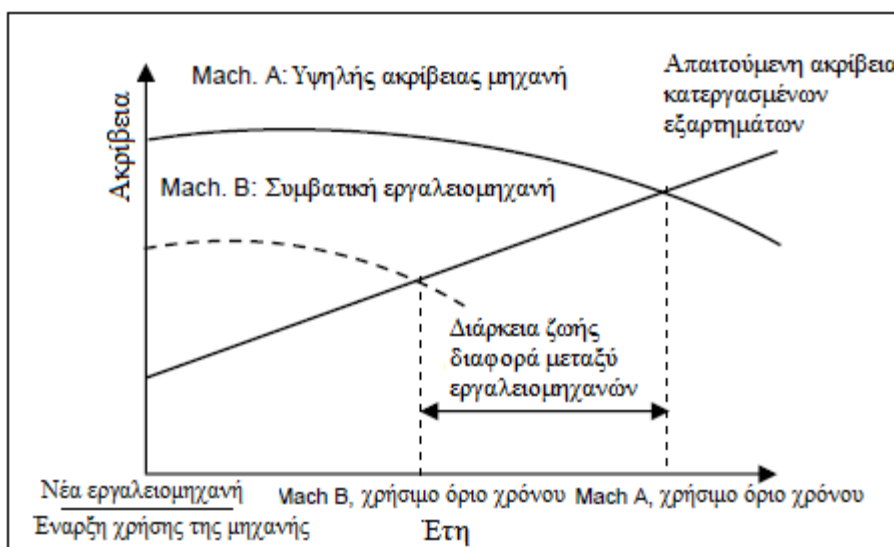
Ένας τυπικός ορισμός για την κατεργασία υψηλής ακρίβειας είναι η παραγωγή σύνθετων στοιχείων με ανοχές κάτω των 10μm. Κάτω από αυτές τις ανοχές, χρησιμοποιείται η φράση «κατεργασία υπέρ ακρίβειας». Προφανώς, ο όρος «υψηλή ακρίβεια» αλλάζει συνεχώς. Οι σημερινές εργαλειομηχανές είναι όλες υψηλής ακρίβειας αν τις συγκρίνουμε με εκείνες που υπήρχαν είκοσι χρόνια πριν, που πολλές από αυτές δεν θα είναι ακριβείς αν τις συγκρίνουμε με εκείνες που πρόκειται να κατασκευαστούν σε δέκα χρόνια από τώρα.

Από το 1990, η κατεργασία υψηλής ακρίβειας έγινε η ίδια μία βιομηχανία, συμπεριλαμβάνοντας την κατασκευή στοιχείων υψηλής ακρίβειας, τις ηλεκτρονικές ή αεροναυτικές βιομηχανίες. Η αγορά ήταν περίπου \$US 60εκατομμύρια το 2006 και εκτιμάται ανάπτυξη μέχρι το 2009 της τάξης των \$US 100εκατομμυρίων (αύξηση 66% σε τρία χρόνια!). Έχοντας κατά νου τα τμήματα που εμπλέκονται, οι μεγάλες αγορές είναι στην Ασία (Ιαπωνία, Ταϊβάν, Κορέα και Κίνα), στην Βόρεια Αμερική (ΗΠΑ και Καναδάς) και στην Ευρώπη.

Επιπλέον, πολλές βιομηχανίες, άλλες από τις παραπάνω, απαιτούν επίπεδα ακρίβειας τα οποία είναι δύσκολο να αποκτηθούν από τις παραδοσιακές μηχανές. Συνεπώς, μερικές από τις αρχές και τις μεθόδους ακρίβειας απλώνονται σε τομείς όπως είναι οι βιομηχανίες αυτοκινήτων ή οι αεροναυτικές.

Η μεγαλύτερη επένδυση για ακριβείς εργαλειομηχανές πρέπει να αναλυθεί λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια ζωής μίας εργαλειομηχανής. Αν θεωρήσουμε πως η απαιτούμενη ακρίβεια για τα κατεργασμένα εξαρτήματα αυξάνει ετησίως, και η κατεργασία των μηχανών μειώνεται λόγω των εκκαθαρίσεων, της φθοράς των επιφανειών κλπ., η διάρκεια ζωής μίας εργαλειομηχανής υψηλής ακρίβειας είναι μεγαλύτερη από ότι μίας συμβατικής. Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η αρχική ακρίβεια της μηχανής. Έτσι, η απαιτούμενη ακρίβεια των εργαλειομηχανών ακρίβειας διαρκεί για μεγαλύτερη περίοδο από ότι των συμβατικών.

Η ακρίβεια είναι στην πραγματικότητα μία στατιστική μεταβλητή. Οι πραγματικές καταστάσεις εισάγουν υψηλό αριθμό πηγών σφάλματος, πολλές από τις οποίες είναι τυχαίων επιδράσεων, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την τιμή ακρίβειας. Συνεπώς, υπάρχουν τρεις βασικές έννοιες, οι οποίες παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα.



Σχήμα 6. 2 – Συσχέτιση μεταξύ ακρίβειας και διάρκειας ζωής της εργαλειομηχανής.

### 6.1.2 Βασικοί Ορισμοί: Ακρίβεια, Επαναληψιμότητα και Ανάλυση

Ας πάρουμε το ακόλουθο παράδειγμα. Η διάμετρος μίας συγκεκριμένης οπής πρέπει να μετράται κατά μήκος μίας σειράς εξαρτημάτων. Η διάμετρος της μετρούμενης οπής είναι συγκρινόμενη με την ονομαστική αξία. Δύο πιθανά αποτελέσματα της μέτρησης παρουσιάζονται στο σχήμα 6.3. Στην κορυφή του σχήματος, οι τιμές μέτρησης παρουσιάζονται, και υπολογίζονται από την στατιστική συνάρτηση της πυκνότητας.

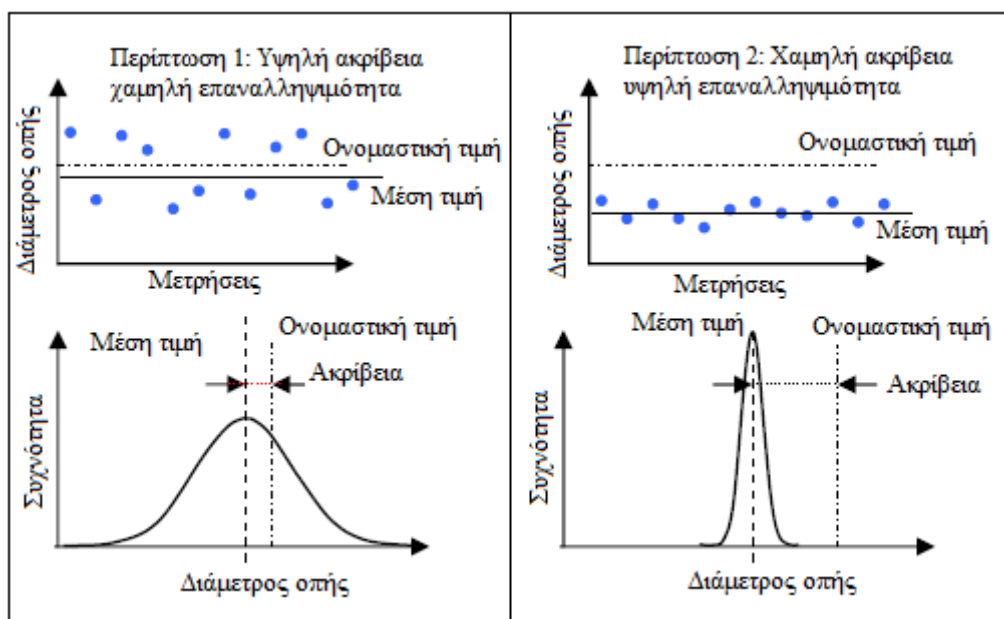
Η πρώτη περίπτωση υποδηλώνει ένα σύνολο μετρήσεων «υψηλής ακρίβειας» και «χαμηλής επαναληψιμότητας». Κάθε μέτρο παρουσιάζει απόκλιση με σεβασμό στην ονομαστική αξία; ωστόσο, η μέση τιμή της μέτρησης είναι πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία κατεργασίας παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια, αλλά επίσης και υψηλή διασπορά.

Από την άλλη πλευρά, Η δεύτερη περίπτωση αναπαριστά μία σειρά μετρήσεων των οποίων η απόκλιση της μέσης τιμής από την ονομαστική είναι υψηλότερη. Ωστόσο, όλες οι μετρήσεις παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές με αυτή την μέση τιμή ή, με άλλα λόγια, η διασπορά των μετρήσεων είναι πολύ χαμηλότερη. Είναι έτσι μία περίπτωση με χαμηλότερη «ακρίβεια» αλλά υψηλότερη «επαναληψιμότητα».

Μετά από το παράδειγμα αυτό, η έννοια της ακρίβειας, και η διαφορά μεταξύ της ακρίβειας, της επαναληψιμότητας και της ανάλυσης πρέπει να τονιστεί:

Ακρίβεια είναι η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των ονομαστικών τιμών. Αναφέρεται επίσης και ως «σφάλμα». Στατιστικά, η ακρίβεια μετράται από την μέση μετρούμενη τιμή.

Επαναληψιμότητα είναι το φάσμα απόκλισης για την ίδια τιμή τοποθέτησης λόγω μίας τυχαίας πηγής σφάλματος. Μερικές αναφορές αναφέρονται στην επαναληψιμότητα ως ακρίβεια.



Σχήμα 6. 3 – Δύο ακραίες περιπτώσεις τιμών ακριβείας και επαναληψιμότητας.

Ωστόσο, κατά μία γενική έννοια, η ακρίβεια αναφέρεται στην ποιοτική πτυχή, συμπεριλαμβάνοντας και την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα.

Η ανάλυση είναι η μικρότερη ποσότητα που μπορεί να ανιχνευθεί με εγγύηση για μία συσκευή μέτρησης. Έτσι, πρέπει να είναι περίπου μίας τάξης μεγέθους χαμηλότερα από την ακρίβεια της μηχανής όπου οι συσκευές μέτρησης εγκαθίστανται. Σήμερα η ανάλυση δεν αποτελεί πρόβλημα για την ακρίβεια της μηχανής, αφού για παράδειγμα, τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας ενσωματώνουν κωδικοποιητές γραμμικής ανάλυσης 0.1μm για να κλείσουν τους βρόχους τοποθέτησης του άξονα. Με αυτά τα στοιχεία, η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της εργαλειομηχανής είναι υψηλότερες από την ανάλυση.

Η έννοια της αβεβαιότητας (U), ως το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μίας μετρήσιμης τιμής, είναι επίσης σημαντική. Η εμπειρία έχει δείξει πως η μέτρηση της ίδιας ποσότητας ξανά και ξανά με το ίδιο όργανο και κάτω από τις ίδιες συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές. Συνεπώς, είναι προφανές πως κάθε μέτρηση περιλαμβάνει ένα απροσδιόριστο σφάλμα, το οποίο δεν είναι πάντα το ίδιο. Η ανακρίβεια αναφέρεται ως το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα σε μία μέτρηση, με τον παράγοντα πιθανότητας, έτσι η αβεβαιότητα σημειώνει ένα φάσμα σφάλματος με μία δεδομένη πιθανότητα. Συνεπώς, αν ένα σύνολο διαφορετικών μετρήσεων οδηγεί σε μία μέση τιμή  $\bar{x}$ , μπορεί να εξασφαλιστεί η «πραγματική τιμή» της μετρήσιμης ποσότητας που βρίσκεται μεταξύ του διαστήματος  $\bar{x} \pm kU$  με μία καθορισμένη πιθανότητα (συνήθως 95%, έχοντας  $k=2$ ).

Είναι σημαντικό να θυμηθούμε την παρατήρηση του Bryan, ο οποίος λέει πως οι αποκλίσεις των εργαλειομηχανών εξαρτώνται από μία σειρά παραγόντων (το ίδιο το σχέδιο, εσωτερικές/εξωτερικές δυνάμεις, θερμικές μεταβολές, ...) και ο πιθανολογικός ορισμός της αβεβαιότητας είναι στην πραγματικότητα ένα μαθηματικό εργαλείο, το οποίο βοηθά στην κατανόηση και αξιολόγηση ενός προβλήματος το οποίο μπορεί να είναι πολύ περίπλοκο ή απλά απρόβλεπτο.

### 6.1.3 Ιστορικές Παρατηρήσεις και η Κατάσταση της Τεχνολογίας

Μία από τις πρώτες αναφορές σε μία υψηλής ακρίβειας μηχανή είναι η μηχανή διάτρησης που σχεδιάστηκε και κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία από τον JohnWilkinson το 1774, που αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο του βιβλίου. Αυτή η μηχανική μηχανή ήταν ικανή να τρυπά

οπές με διάμετρο 1,250 mm, με προσέγγιση σφάλματος 1 mm. Ήταν ένα τεράστιο βήμα, και πολλές είναι οι αναφορές που συνεισφέρουν στην εξάπλωση της ατμομηχανής, επειδή η σωστή σφράγιση του κυλίνδρου δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την ακρίβεια αυτής της μηχανής διάτρησης. Για να κάνουμε μία γρήγορη σύγκριση, η εκκαθάριση πιστονιού/κυλίνδρου μίας σύγχρονης μηχανής μοτοσικλέτας είναι περίπου 1.5-2  $\mu\text{m}$ .

Η ιστορία των εργαλειομηχανών είναι η ιστορία ακρίβειάς τους. Από την πατέντα του Wilkinson, πολλοί παράγοντες έχουν εισάγει βελτίωση της στις εργαλειομηχανές. Οι περισσότεροι ήταν μηχανικοί, μέχρι την παρουσία των CNC στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα που γενικεύτηκαν το 1970. Αυτή η συσκευή βελτίωσε την ακρίβεια παρεμβολών από την τάξη του 0.1mm το 1970, έως τα 0.01mm το 2007.

Για να χτιστεί η ακρίβεια των μηχανών, δεν εξαρτάται μόνο από μία απλή βελτίωση, αλλά επίσης από πολλές τεχνικές καθ' όλη τη ζωή και χρήση της μηχανής. Αρχίζοντας από το σχέδιο, τα δομικά στοιχεία της εργαλειομηχανής σχεδιάζονται σήμερα λαμβάνοντας υπόψη πολλά φαινόμενα, όπως τις ελαστικές παραμορφώσεις που προκλήθηκαν από τις εξωτερικές δυνάμεις ή την βαρύτητα, την πιθανή φθορά των κινούμενων τμημάτων, και την εμφάνιση θερμικών σφαλμάτων ή μηχανικών αποκρίσεων σε εξωτερικούς παράγοντες. Επιπλέον, με την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας κάθε ξεχωριστού στοιχείου της εργαλειομηχανής, έχουν παρουσιαστεί και συγκεκριμένες τεχνικές για την κατασκευή και την συναρμολόγηση των γραμμικών οδηγών. Για παράδειγμα, οι εταιρίες εργαλειομηχανών υπέρ-υψηλής ακρίβειας, εκτιμούν περισσότερες από 400 ώρες εργασίας για την απόξεση (λείανση) των γραμμικών οδηγών σε κάθε μηχανή για να εξασφαλιστεί η ευθύτητα και η ορθοκανονικότητα του κάθε άξονα. Ωστόσο, ακρίβεια απαιτείται από πολλούς κατασκευαστές εργαλειομηχανών. Έτσι, η δομοποίηση, η εναλλαξιμότητα των εξαρτημάτων και η ευκολία της συντήρησης πρέπει επίσης να σχετίζονται με την ακρίβεια. Για τον λόγο αυτό, σήμερα η χρήση γραμμικών κυλινδρικών οδηγών που έρχονται συναρμολογημένοι και προ-φορτισμένοι από τον προμηθευτή, κάνουν την επαναληψιμότητα των λειτουργιών συναρμολόγησης της μηχανής ευκολότερη. Για αυτό, με τους κυλινδρικούς οδηγούς προσφέρεται γενικά υψηλότερη ακρίβεια στους κατασκευαστές της εργαλειομηχανής.

Ο σχεδιασμός των μηχανών υψηλής ακρίβειας απαιτεί την εφαρμογή των βασικών αρχών, που ακολουθούνται από την χρήση του εξοπλισμού για τον προϋπολογισμό του σφάλματος. Από την άλλη, η χωρική διάταξη μπορεί να εισαχθεί για να προσδιορίσει την μετάδοση των σφαλμάτων κατά μήκος της κινηματικής αλυσίδας. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτών των αρχών και των εργαλείων ήταν η αύξηση της ακρίβειας από 100 $\mu\text{m}$  σε 1 $\mu\text{m}$  στα τελευταία τριάντα χρόνια, όπως φαίνεται στο πρώτο κεφάλαιο, στο σχήμα 1.4.

Όσον αφορά στην επαλήθευση της εργαλειομηχανής, ο Schlesinger το 1930 καθόρισε τις προδιαγραφές και τα τεστ για την αποδοχή των εργαλειομηχανών από τους χρήστες. Μέχρι τότε, πολλοί ερευνητές, τεχνικοί, εταιρίες και ομάδες τυποποίησης εργάστηκαν και εργάζονται για να καθορίσουν μετρολογικές διαδικασίες και τεστ αξιολόγησης της ακρίβειας των εργαλειομηχανών (δείτε την Ενότητα 6.4).

Τρεις ενώσεις προάγουν την εξάπλωση της γνώσης όσον αφορά στην ακρίβεια και στην μετάδοσή της στις εταιρίες σε τρεις ηπείρους. Η παλαιότερη στην Ιαπωνία από το 1933 είναι η JSPE. Στις ΗΠΑ η ASPE υπήρξε από το 1986, και η ευρωπαϊκή EUSPEN ολοκληρώνει την εικόνα της ακρίβειας ανά τον κόσμο. Μηχανικοί που ενδιαφέρονται για την μετρολογία, την κατασκευή μηχανής, τις συσκευές ακρίβειας και τις μικρό-κατασκευές, ανταλλάσσουν εμπειρίες μέσω αυτών των κοινωνιών. Φυσικά, εκείνες οι κοινωνίες που είναι εστιασμένες στην κατασκευή σε πολλές χώρες, έχουν επίσης την ακρίβεια ως ένα πολύ σημαντικό παράγοντα.

## 6.2 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού και Προϋπολογισμός Σφάλματος

Ένα από τα πιο δύσκολα αλλά κυρίαρχα στάδια σχεδιασμού μηχανών είναι η εκτίμηση του «προϋπολογισμού του σφάλματος» μίας μηχανής, πριν από την κατασκευή. Ο προϋπολογισμός του σφάλματος είναι ένα εργαλείο μηχανικού σχεδιασμού, που επιτρέπει μία προηγούμενη εκτίμηση της αβεβαιότητας ενός πολύπλοκου συστήματος.

Η εκτίμηση ξεκινά με κάθε απλό σφάλμα, το οποίο πρέπει να περιγράφεται και να ποσοτικοποιείται, ώστε να παράγει μία τιμή συνολικού σφάλματος για την εργαλειομηχανή. Το κύριο πλεονέκτημα από τον υπολογισμό του προϋπολογισμού του σφάλματος είναι να μπορεί να αξιολογεί την σχετική σχετικότητα κάθε πηγής σφάλματος στο συνολικό σφάλμα. Η άμεση συνέπεια είναι πως οι προσπάθειες θα εστιάσουν σε εκείνες με το περισσότερο βάρος στην γενική αβεβαιότητα. Οι σχεδιαστές και οι συναρμολογητές θα προσπαθήσουν να τα μειώσουν, ή αν αυτό δεν είναι δυνατό, να τα λάβουν υπόψη τους όταν ο εξοπλισμός CNC προσαρμόζεται στην μηχανή.

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τις βασικές έννοιες που εμπλέκονται όταν διεξάγεται ένας προϋπολογισμός σφάλματος. Το πρώτο βήμα είναι λογικά η αναγνώριση και κατανόηση των μεγάλων πηγών σφάλματος του σχεδίου, η συναρμολόγηση, η επαλήθευση και η χρήση μίας εργαλειομηχανής. Μαζί με την εργασία αυτή, λαμβάνονται υπόψη οι βασικές αρχές οι οποίες εμπνέουν όλα τα σχέδια ακρίβειας. Είναι δύσκολο να αποδειχθεί το αν οι αρχές είναι πριν ή μετά την ανάλυση των πηγών σφάλματος. Οι αρχές μηχανικής βασίζονται στην εννοιολογική απόφαση των μηχανικών λύσεων, εντούτοις, λαμβάνουν επίσης υπόψη τις πιο κοινές πηγές σφάλματος και την σχετική τους σημασία. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζουμε πρώτα τις πηγές.

### 6.2.1 Πηγές Σφαλμάτων στις Εργαλειομηχανές

Οι βασικές πηγές αβεβαιότητας στον σχεδιασμό και στην κατασκευή των εργαλειομηχανών κατηγοριοποιούνται όπως ακολούθως:

Γεωμετρικά και κινηματικά σφάλματα: αυτά προέρχονται από μηχανικές ατέλειες, όπως αποκλίσεις αξόνων, υποβάθμιση των διαδρομών οδήγησης, και φθορά των αρθρώσεων και των συζεύξεων. Αυτά επηρεάζουν άμεσα την σχετική θέση μεταξύ του εργαλείου και του επεξεργαζόμενου κομματιού, παράγοντας σφάλματα διαστάσεων και σχήματος πάνω στα επεξεργαζόμενα τμήματα. Η μηχανική ακρίβεια που επιτυγχάνεται από τις περίπλοκες μηχανές (όπως είναι οι εργαλειομηχανές πέντε αξόνων), είναι γενικά κατώτερη από εκείνη των συμβατικών. Στα κέντρα κατεργασίας τριών αξόνων, η μετάδοση του σφάλματος είναι βασικά γραμμική. Αλλιώς, στις μηχανές με περιστροφικούς άξονες η μετάδοση του σφάλματος κατά μήκος της κινηματικής αλυσίδας δεν είναι γραμμική. Τα σφάλματα μεταξύ των κινητών στοιχείων της μηχανής, επηρεάζουν άμεσα τις τελικές διαστάσεις του επεξεργαζόμενου κομματιού και του σχήματός του.

Πολλοί ερευνητές έχουν ερευνήσει τα γεωμετρικά σφάλματα για τις εργαλειομηχανές τριών αξόνων. Για παράδειγμα, ο Nawara διατύπωσε το σφάλμα των εργαλειομηχανών από 21 απλά στοιχεία σφάλματος, προτείνοντας μία πρόβλεψη σφάλματος και έναν αλγόριθμο αντιστάθμισης. Επιπρόσθετα στην εργασία αυτή, υπάρχουν πολλές αναφορές οι οποίες αναπτύσσουν μοντέλα για την εκτίμηση του γεωμετρικού σφάλματος, εφαρμόζοντας αλγόριθμους αντιστάθμισης στα CNC. Η αβεβαιότητα στην τοποθέτηση των διαφανειών της μηχανής, των συζεύξεων εκκαθάρισης, κλπ., συμπεριλαμβάνονται επίσης σε αυτή την ομάδα.

Όσο πιο πολύπλοκο είναι το σύστημα, τόσο πιο πολλά είναι τα σφάλματα στην μηχανή. Αυτός είναι και ένας λόγος που οι μηχανές υψηλής ακρίβειας παρουσιάζουν πολύ απλές δομές με ελάχιστους περιορισμούς; οι περιορισμοί αυξάνουν την ακαμψία του συστήματος

αν και εισάγουν αβεβαιότητα και απαιτούν ειδική φροντίδα στο στάδιο της συναρμολόγησης, για να αποτρέψουν την κακή ευθυγράμμιση και άλλες υπέρ-στατικές επιδράσεις.

Θερμικά σφάλματα: Τα θερμικά σφάλματα έχουν μία περίπλοκη μη γραμμική φύση η οποία τα κάνει δύσκολα στον χειρισμό. Οι βασικές αιτίες των θερμικών παραμορφώσεων είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας του εργαστηρίου (για παράδειγμα μεταξύ φθινοπώρου και καλοκαιριού, πρωινού ή απογεύματος), η τοπική θερμότητα λόγω της τροφοδοσίας και των βασικών κινητήρων ατράκτου, ή το πλήθος των θραυσμάτων.

Το σφάλμα ακαμψίας και τα σφάλματα που απευθύνονται στην απόκλιση του εργαλείου κοπής: Οι εργαλειομηχανές δεν είναι τέλεια άκαμπτες. Έτσι, το βάρος των δομικών στοιχείων από τη μία και οι δυνάμεις κοπής από την άλλη, προκαλούν μεγάλα σφάλματα τα οποία είναι υψηλά εξαρτώμενα από την θέση της εργαλειομηχανής. Από την άλλη πλευρά, οι δυνάμεις κοπής μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα που απευθύνονται στην απόκλιση των εργαλείων κοπής. Σαν ενδεικτικό μέγεθος, τα σφάλματα που παράγονται από την απόκλιση των εργαλείων στις επεξεργασίες φινιρίσματος σφαιρικού τέλους μπορεί να προεξέχουν 40μm. Αυτά τα σφάλματα θα μελετηθούν σε βάθος στην επόμενη ενότητα.

Τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι οι «γνωστές πηγές». Οι συνέπειές τους είναι πολύπλοκες, αλλά έχουν αναπτυχθεί τεχνικές αξιολόγησής τους ή αντιστάθμισης των επιδράσεών τους. Δυστυχώς, στις πραγματικές περιπτώσεις υπάρχουν επίσης οι «άγνωστες πηγές», οι οποίες μπορούν να παραδοθούν μόνο λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο επίπεδο αβεβαιότητας.

## **6.2.2 Εκτίμηση Προϋπολογισμού του Σφάλματος**

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι τυπικοί προϋπολογισμοί σφάλματος για ένα συμβατικό τριών αξόνων, υψηλής ταχύτητας κέντρο κατεργασίας και μία υπέρ-ακρίβεια μικρο-φραιζαρίσματος τριών αξόνων. Οι προϋπολογισμοί πρέπει να συμπεριλαμβάνουν όλα τα στοιχεία που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια του κατεργασμένου κομματιού, π.χ. τα σφάλματα μηχανής (γεωμετρικά σφάλματα, σφάλματα θέσης κλπ.), σφάλματα διαδικασίας κατεργασίας (εκκεντρότητα εργαλείου, απόκλιση, κραδασμός κλπ.) και σφάλματα που προέρχονται από βοηθητικό εξοπλισμό (εγκατάσταση του επεξεργαζόμενου κομματιού).

### **6.2.2.1 Σφάλματα Εργαλειομηχανών**

Η ενότητα αυτή καλύπτει τα σφάλματα κατασκευής της μηχανής, τα σφάλματα λόγω της φθοράς των εξαρτημάτων και τα σφάλματα λόγω του μη-κατάλληλου ελέγχου για κάθε μονάδα οδήγησης της κίνησης.

Σφάλμα καθοδήγησης της τοποθέτησης: Η αντιστάθμιση που εφαρμόζεται από το NC μειώνει αυτό το σφάλμα βασικά στην επαναληψιμότητα της κίνησης τις κάθε διαφάνειας. Για να συμβατικά κέντρα φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας, η συνήθης ανάλυση των γραμμικών κλιμάκων είναι κάτω από 1 μm, ενώ η ανάλυση των κέντρων μικρο-φραιζαρίσματος υπέρ-ακρίβειας είναι κάτω από 0.01μm. Αυτές οι τιμές ανάλυσης αποτελούν το σφάλμα τοποθέτησης ελάχιστης ολίσθησης; ωστόσο, τα ακόλουθα σφάλματα πρέπει να προστίθενται για να ληφθεί η τιμή αβεβαιότητας του κάθε καθοδηγητή.

Αβεβαιότητα της θέσης αναφοράς. Η «προέλευση της μηχανής» ή το «σημείο μηδέν την μηχανής» είναι ένα σταθερό σημείο που ρυθμίζεται από τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής. Κάθε κίνηση του εργαλείου μετρίεται από το σημείο αυτό. Το CNC θυμάται πάντα τις αποστάσεις του εργαλείου από την αρχή της μηχανής. Το σχετιζόμενο σφάλμα με αυτή την ενέργεια σχετίζεται με την επαναληψιμότητα της ρύθμισης του σημείου μηδέν της μηχανής. Αυτό είναι εφαρμόσιμο μόνο όταν η μηχανή ανοίγει ή κλείνει, όταν η

μηχανή πρέπει να πάει στο σημείο αρχής. Η τιμή αυτή είναι περίπου 3-5  $\mu\text{m}$  για ένα συμβατικό κέντρο φραιζαρίσματος, και 0.5 $\mu\text{m}$  για ένα υπέρ-ακρίβειας.

Θερμική διαστολή. Εξαρτάται έντονα από τις πηγές εσωτερικής θερμότητας της μηχανής και από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του δωματίου εργασίας. Μία τυπική τιμή αβεβαιότητας για συμβατικές εργαλειομηχανές μπορεί να είναι 5  $\mu\text{m}$ . Αυτά τα σφάλματα για τα κέντρα φραιζαρίσματος είναι κάτω των 0.5  $\mu\text{m}$  λόγω της προσεκτικής μόνωσης των θερμικών πηγών στις μηχανές αυτές.

Οι μετρημένες τιμές θέσης, είναι διαφορετικές όταν η διαφάνεια πηγαίνει μπροστά ή πίσω. Τα αθροίσματα αυτών των σφαλμάτων είναι κοντά στα 3  $\mu\text{m}$  στις συμβατικές εργαλειομηχανές και 0.1 $\mu\text{m}$  σε εκείνες της υπέρ-ακρίβειας.

Γωνιακά σφάλματα: Οι μονάδες ολίσθησης της μηχανής υφίστανται επιδράσεις κύλισης και εκτροπής. Τα τυπικά γωνιακά σφάλματα μπορεί να είναι έως  $\pm 5 \text{ arcsecs}/100\text{mm}$  στα κέντρα φραιζαρίσματος, και κάτω από  $\pm 3 \text{ arcsecs}/100\text{mm}$  στις μηχανές υπέρ-ακρίβειας. Από την άλλη πλευρά, η επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων στην τοποθέτηση και στην ευθύτητα εξαρτάται γραμμικά από την απόσταση του σημείου αναφοράς. Αυτό το μήκος είναι άμεσα σχετιζόμενο με το μέγεθος της μηχανής, π.χ., 750-1000 mm για μία μικρή συμβατική μηχανή φραιζαρίσματος και σε κλίμακα των 10mm για μηχανές μικρο-φραιζαρίσματος.

Εφαρμόζοντας την μετάδοση των σφαλμάτων, η αξιολογημένη αβεβαιότητα για μία γραμμική κίνηση θα ήταν στο φάσμα των 12 $\mu\text{m}$  για τις συμβατικές μηχανές και 0.25 $\mu\text{m}$  για τις μηχανές υπέρ-ακρίβειας. Αυτή η εκτίμηση συμπεριλαμβάνει την μηχανική κατασκευή της μηχανής; ωστόσο πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες αβεβαιότητες. Αυτές είναι:

Σφάλματα τροχιάς (πορείας) της μηχανής: Αυτή η πηγή σφάλματος είναι αμελητέα στην μικρο-επιπεδοποίηση, επειδή στα γρηγορότερα ποσοστά τροφοδοσίας της γρηγορότερης κατεργασίας (50mm/min), οι μηχανές κινούνται τόσο αργά που το συνεπαγόμενο σφάλμα όσον αφορά στο σημείο ρύθμισης είναι μικρό, ακόμη και χωρίς να είναι εγκατεστημένος ο έλεγχος προσοτροφοδότησης. Αντιθέτως, για ένα υψηλής ταχύτητας κέντρο φραιζαρίσματος με ένα μέσο CNC, η απόκλιση μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής τροχιάς μπορεί να είναι έως 5  $\mu\text{m}$  λόγω των συνεπαγόμενων σφαλμάτων του CNC στις έντονες αποκλίσεις τροχιάς (πορείας).

Σφάλματα στην άτρακτο, συμπεριλαμβάνοντας τις διεπιφάνειες στελέχους-ατράκτου, στελέχους-καστονίου και καστονίου-εργαλείου: Οι άτρακτοι ακριβείας εγγυώνται σφάλματα εκκεντρότητας του 1  $\mu\text{m}$  στην άκρη της ατράκτου; ωστόσο, αυτό το σφάλμα μεγεθύνεται από την διεπιφάνεια ατράκτου-στελέχους, το ίδιο το στέλεχος, το καστόνι ή εργαλειοθήκη, την διεπιφάνεια εργαλειοθήκης-εργαλείου και από το ίδιο το εργαλείο. Τα στελέχη και τα καστόνια που είναι διαθέσιμα στην αγορά συμπεριλαμβάνουν ομάδες απλής ακρίβειας, με σφάλματα εκκεντρότητας γύρω στα 10  $\mu\text{m}$ , και εργαλειοθήκες υπέρ-ακρίβειας που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές υπέρ-ακρίβειας, με σφάλματα εκκεντρότητας μόνο 3 $\mu\text{m}$ . Η έλλειψη συγκέντρωσης εξαρτάται από την τελειότητα του εργαλείου, αλλά κυρίως από την σωστή διεύθυνση και σύσφιξη του εργαλείου μέσα στο καστόνι. Σήμερα, οι εργαλειοθήκες θερμικής συρρίκνωσης είναι οι πιο ακριβείς για τις μηχανές συμβατικής κλίμακας; συνήθως η εκκεντρότητα που μετριέται στην άκρη του εργαλείου είναι κάτω από 5  $\mu\text{g}$ .

#### 6.2.2.2 Σφάλματα Μηχανικής Επεξεργασίας

Οι κύριες πηγές αβεβαιότητας που πηγάζουν από την διαδικασία κατεργασίας είναι η παραμόρφωση του εργαλείου, η φθορά και ο κραδασμός της μηχανής, του εργαλείου ή του εξαρτήματος. Με περισσότερες λεπτομέρειες:

Παραμόρφωση του εργαλείου: ένα εργαλείο μπορεί να λυγίσει σημαντικά υπό την ενέργεια των δυνάμεων κοπής. Για την συμβατική επιπεδοποίηση, αυτή η τιμή εξαρτάται βασικά από την ακαμψία του εργαλείου που χρησιμοποιείται, η οποία δίνεται από τη σχέση μεταξύ του μήκους του και της διαμέτρου. Μία τάξη μεγέθους του σφάλματος στην κατεργασμένη επιφάνεια είναι 25-30μm, λαμβάνοντας υπόψη ένα λεπτό κονδύλιο φραιζαρίσματος (Ø6mm και 60mm μήκος) και εφαρμόζοντας συνθήκες φινιρίσματος πάνω στο ατσάλι. Στις χειρότερες περιπτώσεις τα σφάλματα θα μπορούσαν να είναι υψηλότερα από 90μm. Στην άλλη κλίμακα, οι τυπικοί παράμετροι μικρο-φραιζαρίσματος προκαλούν ισχύς κοπής περίπου 30-100 mN, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε παραμόρφωση 3μm.

Φθορά του εργαλείου: η φθορά αυξάνει τις δυνάμεις κοπής και παράγει μία ποικιλία διαστάσεων του εργαλείου, με την συνεπαγόμενη απώλεια ακρίβειας. Η γωνιακή ακτίνα των ευθειών κονδυλίων φραιζαρίσματος γίνονται πιο στρόγγυλες λόγω της φθοράς, και έτσι είτε η διάμετρος του εργαλείου ή το μήκος γίνονται μικρότερα από την ονομαστική μορφή. Επίσης, τα εργαλεία του κοχλία φραιζαρίσματος χάνουν την αρχική τους ακτίνα, ειδικά όταν κατεργάζονται πολύ σκληρά υλικά.

Κραδασμός: δύο τύποι κραδασμού είναι κοινοί κατά την κατεργασία. Ο πρώτος είναι οι δυναμικοί κραδασμοί λόγω της συχνότητας που περνάει από τα δόντια. Έτσι, αν η φυσική συχνότητα της μηχανής, του εργαλείου ή του επεξεργαζόμενου κομματιού είναι κοντά στην χαρακτηριστική συχνότητα της ισχύος κοπής, τότε συμβαίνει μία σημαντική ενίσχυση. Δεύτερον, οι αυτό-διεγερόμενοι αναπαραγωγικοί κραδασμοί μπορεί να παράγουν σχετική μετατόπιση εργαλείου-εξαρτήματος, μεγαλύτερη από 100μm; Ο κραδασμός αποτρέπει με μία καλή επιλογή ταχύτητας της ατράκτου, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3. Οι κραδασμοί θεωρούνται μία πηγή αβεβαιότητας μόνο αν είναι αδύνατο να ελαχιστοποιηθούν με καλή τεχνογνωσία της κατεργασίας.

#### 6.2.2.3 Βοηθητικά Συστήματα Ευθυγράμμισης και η Ρύθμιση της Αναφοράς

Τα σφάλματα που ξεκινούν στην θέση του επεξεργαζόμενου κομματιού και η ακόλουθη ρύθμιση «μηδενικής αναφοράς», δεν επηρεάζουν την ακρίβεια του επεξεργαζόμενου κομματιού, αν όλες οι λειτουργίες πρόκειται να γίνουν σε μία μονή μηχανή με μία μονή εργαλειοθήκη. Σφάλματα ρύθμισης εμφανίζονται όταν τα επεξεργαζόμενα κομμάτια μετακινούνται μεταξύ των μηχανών, ή εφαρμόζονται διαφορετικά εργαλεία; τότε αυτή είναι μία πολύ σημαντική πηγή σφάλματος. Στην πραγματικότητα, αυτός είναι και ένας από τους λόγους χρησιμοποίησης των νέων μηχανών πολλαπλών εργασιών που παρατέθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν συστήματα ευθυγράμμισης του επεξεργαζόμενου κομματιού στην αγορά, που εξασφαλίζουν την επαναληψιμότητα της τοποθέτησης κάτω από 3μm. Συνεπώς, το σφάλμα αυτό πρέπει να προστεθεί στην αναμενόμενη επαναληψιμότητα τοποθέτησης της εργαλειομηχανής.

#### 6.2.2.4 Ο Συνολικός Προϋπολογισμός Σφάλματος

Μετά τα παραπάνω στοιχεία, οι κοινές τιμές αβεβαιότητας που εκτιμώνται για συμβατική και μικρο-φραιζαρίσματος κατεργασία, συλλέγονται στον Πίνακα 6.1.

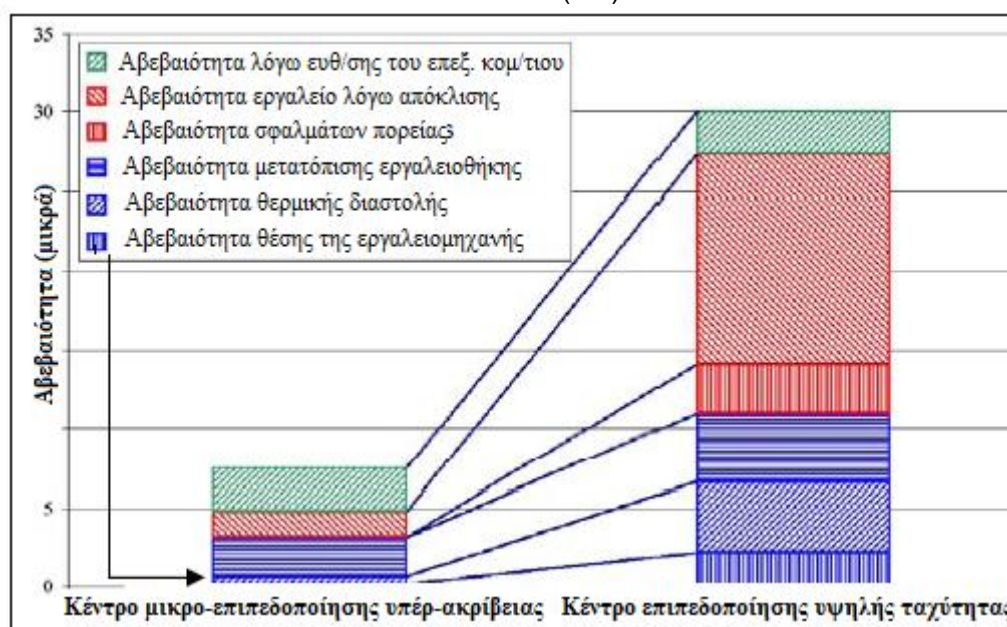
**Πίνακας 6.1** – Αβεβαιότητες ενός κέντρου υπέρ-ακρίβειας και ενός συμβατικού κέντρου κατεργασίας.

	Κέντρο κατεργασίας υψηλής ταχύτητας	Κέντρο μικρο-επιτεδο- ποίησης υπέρ-ακρίβειας
Αβεβαιότητα κατεργασίας θέσης	2.50 $\mu\text{m}$	0.13 $\mu\text{m}$
Αβεβαιότητα θερμικής διαστολής	5.00 $\mu\text{m}$	λιγότερη από 0.50 $\mu\text{m}$
Αβεβαιότητα μετατόπισης εργαλειοθήκης	5.00 $\mu\text{m}$	2.20 $\mu\text{m}$
Αβεβαιότητα σφαλμάτων πορείας	3.50 $\mu\text{m}$	–
Αβεβαιότητα εργαλείου λόγω απόκλισης	15.00 $\mu\text{m}$	1.50 $\mu\text{m}$
Αβεβαιότητα λόγω ευθυγράμμισης του επεξ. κομ/τιού	3.00 $\mu\text{m}$	2.50 $\mu\text{m}$

Η συνδυασμένη πρότυπη αβεβαιότητα ( $u_c$ ) και, συνεπώς, η εκτεταμένη αβεβαιότητα ( $U$ ) υπολογίζεται διαδοχικά ως:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N |u(x_i)|^2 \quad (6.1)$$

$$U = 2 \cdot u_c \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.4 – Προϋπολογισμοί σφάλματος υπέρ-ακρίβειας και συμβατικών κέντρων κατεργασίας.

Για ένα συμβατικό κέντρο κατεργασίας υψηλής ταχύτητας, οι τιμές αβεβαιότητας μπορεί να είναι γύρω στα 30  $\mu\text{m}$ . Από την άλλη μεριά, η γενική αβεβαιότητα των εργαλειομηχανών είναι 5.5  $\mu\text{m}$ , αλλά αν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα ευθυγράμμισης και αναφοράς, η αβεβαιότητα αυξάνεται στα 7.5  $\mu\text{m}$ . Στο σχήμα 6.4, η σχετικότητα κάθε πηγής σφάλματος μπορεί να παρατηρηθεί ως το αποτέλεσμα υπολογισμού του σφάλματος προϋπολογισμού.\

### 6.2.3 Βασικές Αρχές για τον Σχεδιασμό Μηχανής Ακρίβειας

Μετά την ανάλυση των πηγών σφάλματος και των υπολογισμών της συνδυασμένης πρότυπης αβεβαιότητας (Εξίσωση 6.1), εξάγονται μερικές βασικές αρχές, σαν οδηγός για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος τοποθέτησης και την επίτευξη των απαιτούμενων επιπέδων ακρίβειας. Ωστόσο, η αληθινή και πρακτική εφαρμογή αυτών των αρχών είναι μερικές φορές πολύ περίπλοκη.

Οι Nakazawa και Slocum παρέχουν βασικές οδηγίες για την καθιέρωση των αρχών σχεδίου και κατασκευής για την ακρίβεια των εργαλειομηχανών και των άλλων συσκευών. Μερικές από αυτές εξηγούνται συνοπτικά στις παρακάτω γραμμές.

#### 6.2.3.1 Η Δομή της Εργαλειομηχανής

Μερικές αρχές πρέπει να εφαρμόζονται για να βελτιωθεί η δομή της εργαλειομηχανής. Συνεπώς, η «λειτουργική αρχή» δηλώνει πως τα ανεξάρτητα πλαίσια προτείνονται σημαντικά ώστε να διαχωριστούν τα σφάλματα του κάθε στοιχείου. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανές πρέπει να σχεδιάζονται ξεκινώντας από τις βασικές απαιτήσεις, αντί να βελτιώνονται παλιά σχέδια ή να προστίθενται νέα στοιχεία, οι οποίες αποτελούν τη βάση της «αρχής συνολικού σχεδιασμού».

Ένας ακόμη βασικός κανόνας είναι η «αρχή της συμβατότητας», η οποία σχετίζεται άμεσα με την ακαμψία της δομής της εργαλειομηχανής. Η ακαμψία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, σκεπτόμενοι όχι μόνο τους γενικούς όρους αλλά και τις τοπικές περιοχές που θα αντιμετωπίσουν μεγάλες δυνάμεις. Το σχήμα 6.5 παρουσιάζει την αρχή γενικού σχεδιασμού και την αρχή συμβατότητας. Εκεί, παρουσιάζεται μία νέα περιστροφή ατράκτου, που σχεδιάζεται ειδικά για λειτουργίες υψηλής ακρίβειας.



Σχήμα 6. 5 – Αρχή συνολικού σχεδιασμού: ενσωματωμένος κινητήρας, τοποθετημένος σε μία άτρακτο τόνου, από CMZMachineryGroup. Η άτρακτος ψύχεται με λάδι.

Τέλος, η «αρχή ελαχιστοποίησης της θερμοκρασιακής παραμόρφωσης» αναφέρεται σε ένα από τα κύρια προβλήματα στον σχεδιασμό των νέων εργαλειομηχανών. Αν είναι δυνατόν, η δομή της μηχανής πρέπει να παρουσιάζει ένα συμμετρικό σχεδιασμό, όπου η αντιστάθμιση των θερμικών παραμορφώσεων είναι ευκολότερη. Οι πηγές θερμότητας της μηχανής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μακριά από την ζώνη εργασίας και προτείνεται ο σχεδιασμός συστημάτων ψύξης για να αποφευχθούν οι θερμικές διαβαθμίσεις, όπως είναι περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 6.5.

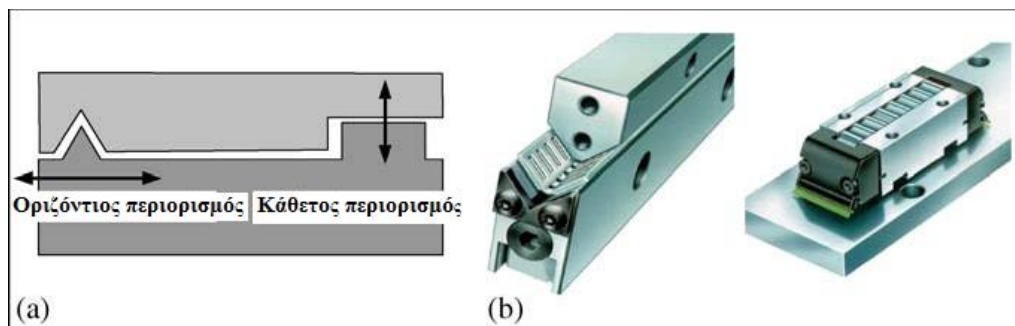
#### 6.2.3.2 Η Αρχή Κινηματικού Σχεδιασμού και η Ομαλή Κίνηση

Όποτε είναι δυνατό, η μηχανή πρέπει να παρουσιάζει ελάχιστους περιορισμούς στις αρθρώσεις (συνδέσεις), στις διαφάνειες και σε άλλες διεπιφάνειες στοιχείων. Ένας κινηματικός σχεδιασμός αποτρέπει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από εσωτερικούς περιορισμούς και επιτρέπουν την απομόνωση ευαίσθητων στοιχείων από την επιρροή των υποστηρίγμάτων μεταβαλλόμενων διαστάσεων, και/ή τις κατασκευαστικές ανοχές. Ο κινηματικός σχεδιασμός παρέχει ακριβώς τον σωστό αριθμό των ανεξάρτητων περιορισμών που διατηρούνται από δυνάμεις κατάλληλου τερματισμού, για να διασφαλίσει τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας μεταξύ δύο άκαμπτων σωμάτων.

Στο σχήμα 6.6 φαίνεται ένα παράδειγμα κινηματικού σχεδιασμού ενός γραμμικού άξονα. Οι οδηγοί σχεδιάζονται για να επιτρέψουν την κίνηση προς μία κατεύθυνση και να περιορίσουν τις πιθανές μετατοπίσεις προς όλες τις άλλες. Για να εισαχθούν οι λιγότεροι περιορισμοί,

εισάγονται δύο οδηγοί διαφορετικού σχήματος. Ο πρώτος είναι ένας γραμμικός οδηγός σχήματος V, ο οποίος περιορίζει τις πλάγιες μετατοπίσεις της τράπεζας. Ο δεύτερος είναι ένας επίπεδος οδηγός ο οποίος περιορίζει μόνο την κάθετη κίνηση της τράπεζας, για να αυξήσει την ακαμψία στην κατεύθυνση αυτή. Αν είχαν εισαχθεί δύο πανομοιότυποι γραμμικοί οδηγοί, το σύστημα θα ήταν υπέρ-περιορισμένο και έτσι οι ατέλειες των οδηγών και των συναρμολογήσεων θα οδηγούσαν στην παραμόρφωση των στοιχείων. Στον κινηματικό σχεδιασμό, οι ατέλειες απορροφώνται από τις αρθρώσεις του συστήματος, χωρίς επιπρόσθετα φορτία. Σαν γενικός κανόνας, τα σημεία περιορισμού είναι λιγότερο προβληματικά από την επιφάνεια και την γραμμή επαφής.

Η «αρχή της ομαλής κίνησης» υποδηλώνει πως οι μηχανισμοί οδήγησης πρέπει να παρουσιάζουν ελάχιστη τριβή για να πετύχουν ομαλές κινήσεις. Η τριβή μεταξύ των στοιχείων ολίσθησης, παράγει επιδράσεις, όπως κόλλησης και ολίσθησης, που μπορεί να είναι δύσκολο να ελέγξουν τους κραδασμούς. Επιπλέον, ένα ακριβές σύστημα οδήγησης όχι μόνο πρέπει να είναι ακριβές στην κατασκευή, αλλά πρέπει επίσης να παρουσιάζει ομαλή κίνηση. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των συστημάτων οδήγησης πρέπει να επιτύχει δύο στόχους, τους συντελεστές ελάχιστης και σταθερής τριβής.

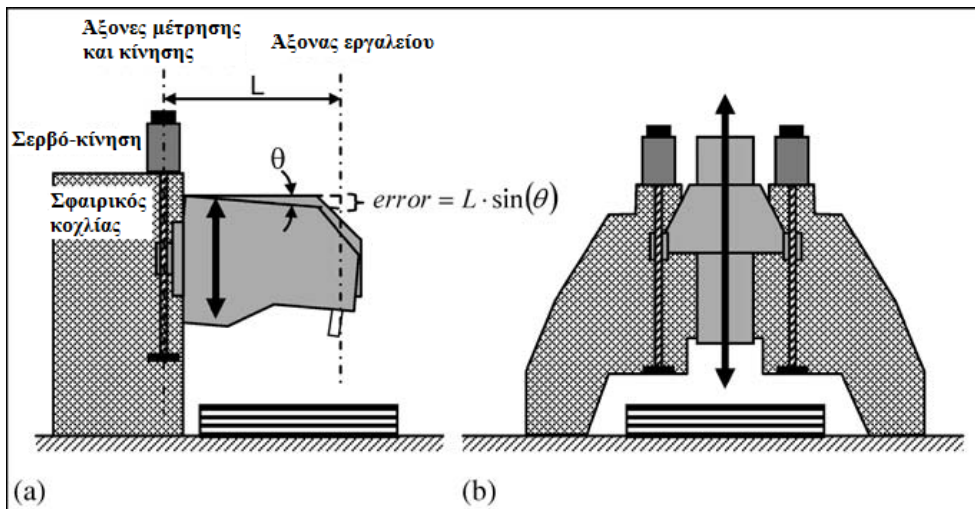


Σχήμα 6. 6 – α) Ημί-κινηματικό σχέδιο ενός γραμμικού άξονα. β) Λεπτομέρειες των V και επίπεδων γραμμικών συστημάτων οδήγησης INA – FAG.

### 6.2.3.3 Η Βασική Αρχή ABBE

Αυτή η βασική αρχή της μετρολογίας δηλώνει «το μήκος που πρόκειται να μετρηθεί και την κλίμακα μέτρησης που πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο άξονα». Στις συμβατικές εργαλειομηχανές, πολλά συστήματα γραμμικής κίνησης δεν ικανοποιούν την μέθοδο ABBE επειδή ο άξονας της κίνησης και το στοιχείο της μηχανής δεν βασίζονται σε μία μονή γραμμή.

Στο σχήμα 6.7, παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί σχεδιασμοί εργαλειομηχανών, η 6.7a δείχνει ένα πλαίσιο C με στήλη μονού σφαιρικού κοχλίου. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η γραμμή του άξονα του εργαλείου και η γραμμή μέτρησης διαχωρίζονται; συνεπώς, η αρχή ABBE δεν ικανοποιείται και έτσι η γωνιακή απόκλιση ερμηνεύεται σε σφάλμα μετατόπισης στο εργαλείο. Στο σχήμα 6.7b, φαίνονται μία διπλή στήλη και ένας διπλός σφαιρικός κοχλίας. Στην περίπτωση αυτή, η απόσταση μεταξύ του άξονα του εργαλείου και κάθε άξονα κοχλίας αντισταθμίζει την επίδραση της γωνιακής απόκλισης στον γραμμικό άξονα. Αυτή είναι, προφανώς, μία πιο δαπανηρή λύση, αλλά η ακρίβεια της μηχανής είναι πολύ υψηλότερη.



Σχήμα 6. 7 – Δύο διαφορετικά σχέδια μηχανής. α) Με σφάλμα ABBE. β) Με μείωση του σφάλματος ABBE.

#### 6.2.3.4 Η Μέτρηση Τοποθέτησης

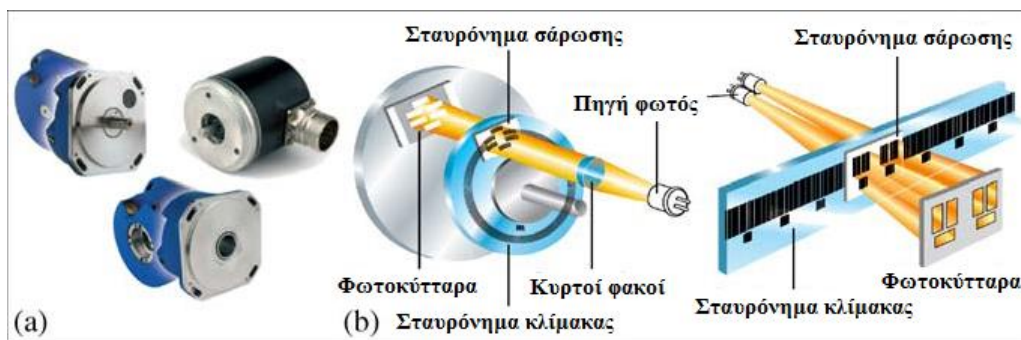
Ένα άμεσο σύστημα μέτρησης, ελεύθερο από εξωτερικές διαταραχές και θορύβους, είναι πάντα καλύτερο από ένα έμμεσης μέτρησης. Το τελευταίο χρειάζεται μερικούς γεωμετρικούς παράγοντες που μπορεί να ποικίλουν λόγω πηγών σφάλματος. Ένα κλασικό παράδειγμα αυτής της αρχής είναι η χρήση σύστασης από γραμμικούς κωδικοποιητές, αντί για κωδικοποιητές μέτρησης της τοποθέτησης των γραμμικών αξόνων.

Οι περισσότερες από τις συσκευές μέτρησης για εργαλειομηχανές, λειτουργούν χρησιμοποιώντας την αρχή της φωτοηλεκτρικής σάρωσης, η οποία είναι μία μέθοδος ελεύθερης επαφής, έτσι τα συστήματα μέτρησης είναι ελεύθερα από φθορά. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συσκευές σάρωσης φωτός, που αποτελούνται από μία πηγή φωτός που προβάλλεται σε δύο διαβαθμίσεις με ίδιες περιόδους διαβάθμισης. Μία από τις διαβαθμίσεις: το «σταυρόνημα σάρωσης» κινείται σε σχέση με το άλλο: το «σταυρόνημα κλίμακας». Όταν το φως περάσει μέσα από μία διαβάθμιση, οι φωτεινές και οι σκοτεινές επιφάνειες προβάλλονται σε έναν φωτοηλεκτρικό αισθητήρα. Υπάρχουν δύο οριακές θέσεις: πρώτα, όταν οι διαβαθμίσεις είναι ευθυγραμμισμένες, το φως περνάει από μέσα και τα φωτοβολταϊκά κελιά παράγουν την μέγιστη τιμή τάσης. Από την άλλη πλευρά, αν οι γραμμές της μίας διαβάθμισης συμπίπτουν με τα κενά της άλλης, δεν περνάει φως από μέσα, και το σήμα των φωτοβολταϊκών κελιών είναι ελάχιστο. Το τελικό σήμα της σχετικής κίνησης μεταξύ της σάρωσης και σταυρονήματος κλίμακας παράγει σχεδόν ημιτονικά σήματα εξόδου.

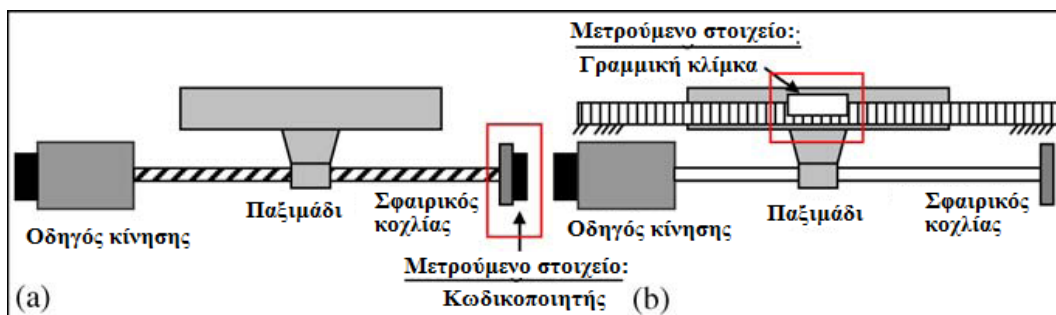
Υπάρχουν δύο τύποι φωτοηλεκτρικών συστημάτων μέτρησης, ανάλογα με το σταυρόνημα κλίμακας. Πρώτα, αν το σταυρόνημα σάρωσης είναι ένας δίσκος, η συσκευή μέτρησης ονομάζεται «περιστροφικός κωδικοποιητής» ή απλά «κωδικοποιητής». Οι περιστροφικοί κωδικοποιητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την γωνιακή μέτρηση των περιστροφικών κινήσεων όπως οι NC περιστροφικοί άξονες ή οι γωνιακές μετρήσεις μετρολογίας. Από την άλλη πλευρά, αν το σταυρόνημα σάρωσης είναι μία γραμμική κλίμακα, η συσκευή μέτρησης είναι ένας χαρακτηρισμένος γραμμικός κωδικοποιητής ή απλά μία γραμμική κλίμακα. Και οι γραμμικοί και οι περιστροφικοί κωδικοποιητές μπορούν να χωριστούν σε απόλυτους και σχετικούς κωδικοποιητές. Οι απόλυτοι κωδικοποιητές χρησιμοποιούν μία κλίμακα διαβάθμισης που σχηματίζεται από πολλές διαβαθμίσεις ή ίχνη κώδικα, όπου κάθε πιθανή τοποθέτηση δημιουργεί έναν μοναδικό κώδικα. Συνεπώς, η θέση διαβάζεται απευθείας και δεν υπάρχει ανάγκη να βρεθεί μία θέση αναφοράς. Οι σχετικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούν μία σταθερή κλίμακα περιόδου διαβάθμισης, και η θέση μετρείται σε σχέση με μία θέση αναφοράς. Η ανάλυση των σχετικών κωδικοποιητών είναι υψηλότερη από ότι

των απόλυτων, και αποτελούν την πιο τυπική συσκευή μέτρησης για εργαλειομηχανές υψηλής ακρίβειας.

Η ανάλυση των σχετικών κωδικοποιητών εξαρτάται κυρίως από την περίοδο της κλίμακας διαβάθμισης. Όσο πιο μικρή είναι η περίοδος της δομής διαβάθμισης, τόσο πιο μεγάλη είναι η ανάλυση. Επιπλέον, η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από την ανοχή της βάσης μεταξύ της σάρωσης και του σταυρονήματος κλίμακας. Στην πραγματικότητα, οι τυπικές περίοδοι διαβάθμισης είναι μεταξύ 20  $\mu\text{m}$  και, για υψηλής ακρίβειας εφαρμογές, υπάρχουν γραμμικοί κωδικοποιητές με 4  $\mu\text{m}$  περιόδους διαβάθμισης. Επιπλέον, το σταυρόνημα σάρωσης μπορεί να χωριστεί σε πολλά πλέγματα σάρωσης. Ένα φωτοκύτταρο, αντιστοιχίζεται σε κάθε πεδίο σάρωσης και παρέχεται ένα διαφορετικό ημιτονικό ηλεκτρικό σήμα από το καθένα. Συνεπώς, κάθε περίοδος διαβάθμισης μπορεί να χωριστεί παρεμβάλλοντας τα διαφορετικά ηλεκτρικά σήματα από κάθε φωτοκύτταρο και η ανάλυση της μέτρησης μπορεί να βελτιωθεί έως 0.1  $\mu\text{m}$  για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Στο σχήμα 6.8, παρουσιάζεται η αρχή φωτοηλεκτρικής σάρωσης και για έναν περιστροφικό και για έναν γραμμικό κωδικοποιητή.



Σχήμα 6. 8 – α) Περιστροφικοί κωδικοποιητές. β) Φωτοηλεκτρική σάρωση για έναν περιστροφικό και έναν γραμμικό κωδικοποιητή. (Courtesy of Fagor Automation).



Σχήμα 6. 9 – α) Σύστημα μέτρησης βασισμένο σε κωδικοποιητή. β) Σύστημα μέτρησης βασισμένο σε γραμμική κλίμακα.

Στο σχήμα 6.9, παρουσιάζονται δύο λύσεις μέτρησης. Η λύση που βασίζεται στον κωδικοποιητή, μετράει απευθείας την γωνιακή θέση του σφαιρικού κοχλίου, που είναι τοποθετημένος στην αντίθετη θέση στην άρθρωση μεταξύ του οδηγού κίνησης και του σφαιρικού κοχλίου. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, μπορεί να αποκτηθεί η τοποθέτηση του άξονα, υπολογίζοντας τη σχέση μεταξύ της κίνησης του γραμμικού άξονα με την περιστροφή του σφαιρικού κοχλίου. Ωστόσο, η μέτρηση επηρεάζεται από πολλές πηγές σφάλματος. Συνεπώς, ο κωδικοποιητής δεν μπορεί να ανιχνεύσει τις παραμορφώσεις του σφαιρικού κοχλίου λόγω των θερμικών επιδράσεων ή των επιδράσεων φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, οι αντιδράσεις του σφαιρικού παξιμαδιού δεν ανιχνεύονται επίσης. Με άλλα λόγια, ο κωδικοποιητής, δεν μπορεί να ανιχνεύσει το τι συμβαίνει σε εκείνα τα στοιχεία που τοποθετούνται μετά το σύστημα οδήγησης της κίνησης.

Αντίθετα, αν η γραμμική κλίμακα εγκαθίσταται μεταξύ της τράπεζας και της δομής της μηχανής, η γραμμική κίνηση μετράται απευθείας. Αυτή η μέτρηση είναι ανεξάρτητη από τα

χαρακτηριστικά του σφαιρικού κοχλία (διάμετρος, αγωγός) και τις παραμορφώσεις του. Συνεπώς, είναι ξανά μία πιο δαπανηρή αλλά πολύ ακριβής λύση.

#### 6.2.3.5 Η Αρχή της Διόρθωσης Σφάλματος

Η γενική ακρίβεια μετά τη συναρμολόγηση είναι συνήθως κάτω από την απαιτούμενη ακρίβεια για την μηχανή. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην χρήση τεχνικών αντιστάθμισης για να διορθωθούν και να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα αυτά, που μπορούν να μετρηθούν από προηγμένα όργανα μέτρησης όπως τα παρεμβολόμετρα λείζερ. Οι διορθώσεις εφαρμόζονται στην μηχανή CNC με στόχο την επίτευξη της θέσης στόχου για το κεντρικό σημείο του εργαλείου. Αυτή η αρχή ή η μέθοδος μπορεί να φαίνεται μία εύκολη λύση, επειδή οι θέσεις στόχου μπορεί να ληφθούν χωρίς την ανάγκη να δομηθεί μία πολύ ακριβής μηχανή. Ωστόσο, είναι λάθος επειδή υπάρχει ένα όριο αντιστάθμισης της ακρίβειας; οι μηχανές χαμηλής ακρίβειας δεν θα βελτιώσουν σημαντικά την ακρίβεια αντισταθμίζοντας τα σφάλματα και δεν θα γίνουν ποτέ μηχανές υψηλής ακρίβειας.

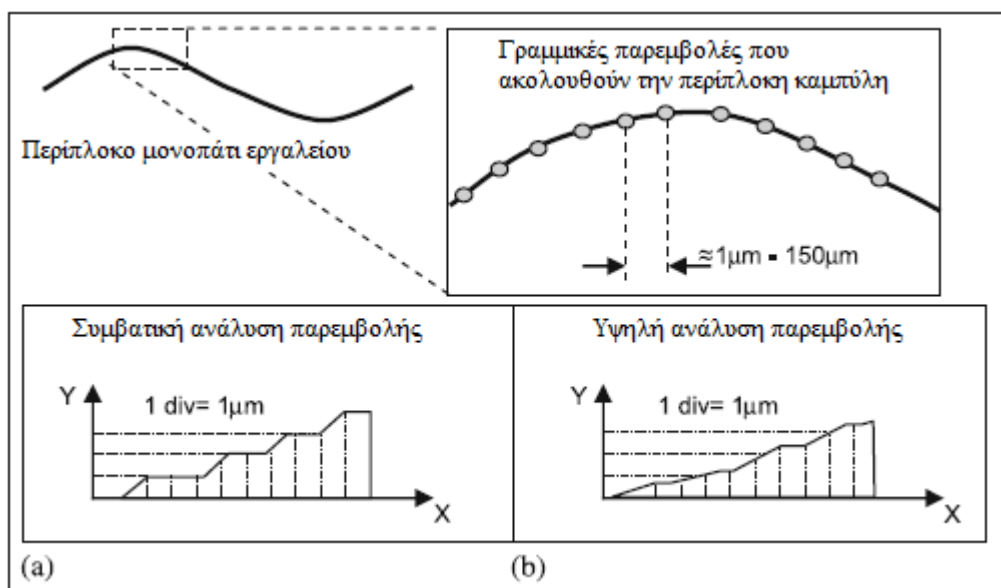
Διαφορετικοί τύποι σφαλμάτων μπορούν να διακριθούν:

- Επαναλαμβανόμενα σφάλματα, τα οποία μπορούν να είναι προβλεπόμενα και, επομένως, αντισταθμισμένα από την μηχανή CNC. Συνήθως, τα γεωμετρικά σφάλματα είναι σε αυτή την ομάδα. Ένα επαναλαμβανόμενο σφάλμα είναι ένα σφάλμα, αλλά δεν είναι πραγματικά μία αβεβαιότητα.
- Μη-επαναλαμβανόμενα σφάλματα, τα οποία είναι μεταβαλλόμενα με την θερμοκρασία, την ισχύ, τους κραδασμούς ή άλλους παράγοντες. Αυτά τα σφάλματα δεν μπορούν να αντιστοιχηθούν επειδή η τιμή του σφάλματος είναι άγνωστη. Ωστόσο, έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνα στην μοντελοποίηση, την παρακολούθηση και των τεχνικών ελέγχου. Μέσω αυτών των τεχνικών, η θερμική παραμόρφωση ή τα σφάλματα κραδασμού μπορεί να γίνουν προβλέψιμα και συνεπώς αντισταθμισμένα.
- Τυχαία σφάλματα. Παρά τα τρέχοντα μοντέλα, υπάρχουν πολλές αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικότητας και του σχεδιασμού, που είναι αδύνατον να εκτιμηθούν. Έτσι, μόνο στατιστικές θεραπείες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτές.

#### 6.2.3.6 Έλεγχος Τοποθέτησης Εργαλειομηχανής

Μόλις η μηχανή σχεδιαστεί και δομηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια, είναι απαραίτητο να συντονίσει τον έλεγχο των κινήσεών της. Το πρώτο σημαντικό γεγονός είναι πως είναι αδύνατον να επιτευχθεί μία ακριβής κίνηση με εξοπλισμό χαμηλής ακρίβειας.

Ο έλεγχος της μηχανής πρέπει να σχεδιάζεται κάτω από την «αρχή της επίδρασης του φίλτρου», που βασίζεται στην διόρθωση του θορύβου και στην απόκτηση ακριβούς και ομαλής κίνησης. Μία από τις πηγές θορύβου είναι οι γραμμικές παρεμβολές των περίπλοκων καμπύλων. Τα αρχεία CAD προσδιορίζονται συνήθως με καμπύλες NURB υψηλής τάξης. Αυτές οι καμπύλες προσδιορίζονται με μία σχετικά μικρή ποσότητα σημείων; εν τούτοις, η γεωμετρία είναι καλά προσδιορισμένη λόγω του μαθηματικού ορισμού των σχημάτων. Ωστόσο, το πρόγραμμα NC που παράγεται από τα συστήματα CAM, βασίζεται συνήθως σε μικρές γραμμικές παρεμβολές. Σαν αποτέλεσμα, εισάγεται μία διπλή αρνητική επίδραση. Πρώτα το μονοπάτι του εργαλείου δεν είναι ακριβές, αν και η απόκλιση μεταξύ του μονοπατιού και της ακριβούς καμπύλης μπορεί να ελεγχθεί από το λογισμικό CAM. Δεύτερον, η σειρά των γραμμικών παρεμβολών έχουν ως αποτέλεσμα ένα μη-ομαλό μονοπάτι εργαλείου, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της κίνησης του άξονα και, τελικά, σε κραδασμό στην κατεργασία.



Σχήμα 6. 10 – Συμβατική (a) και υψηλής ανάλυσης παρεμβολή (b) για μία αλληλουχία γραμμικών παρεμβολών.

Οι σύγχρονοι έλεγχοι εργαλειομηχανών ενσωματώνουν συγκεκριμένες λειτουργίες για να ελαχιστοποιήσουν το φαινόμενο της ασυνέχειας που πηγάζει από την γραμμική παρεμβολή. Έτσι, προηγμένες λειτουργίες ελέγχου κραδασμών ενσωματώνονται στο CNC για τον έλεγχο του ποσοστού τροφοδοσίας στις γωνίες του επεξεργαζόμενου κομματιού. Ο έλεγχος κραδασμού οδηγεί σε μία ομαλή διακύμανση της επιτάχυνσης, η οποία οδηγεί σε μία ομαλή κίνηση χωρίς κάποια αστάθεια. Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση των παρεμβολών έχει βελτιωθεί σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια. Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζονται τα συμβατικά και τα υψηλής ανάλυσης σχήματα. Παρουσιάζεται μία σχετικά σκληρή παρεμβολή που οδηγεί σε μία φτωχή επιφάνεια φινιρίσματος (Σχήμα 6.10a). Σε αντίθεση με αυτό, το σχήμα 6.10b δείχνει μία υψηλής ανάλυσης παρεμβολή, που εμπλουτίζει την επιφάνεια φινιρίσματος.

## 6.2.4 Σφάλμα Μετάδοσης

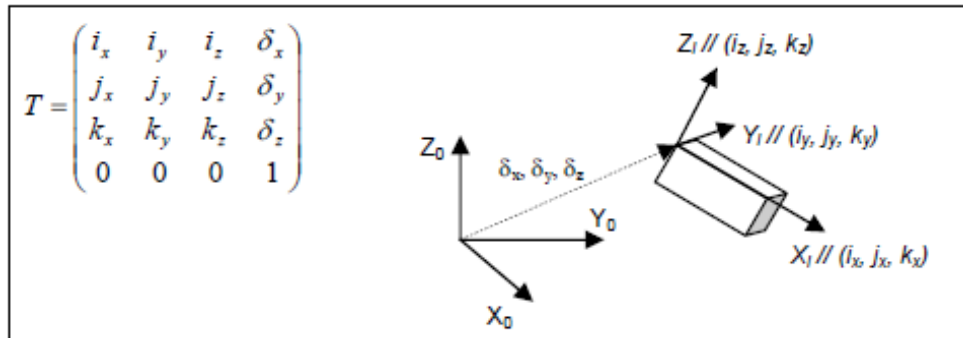
Οι εργαλειομηχανές είναι χωρικοί μηχανισμοί με αρθρώσεις που μπορούν να μοντελοποιηθούν ως κινηματικά ζεύγη. Ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, το κινηματικό μοντέλο είναι διαφορετικό, και μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα σχήμα «ράβδων και κόμβων» όπως κάθε μηχανισμός. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει περιστροφικές και πρισματικές αρθρώσεις.

Ένα σύστημα συντεταγμένων  $X_iY_iZ_i$  πρόκειται να σταθεροποιηθεί πάνω σε κάθε στοιχείο του μηχανισμού; έτσι, η θέση του στοιχείου θα προσδιοριστεί πλήρως από την αρχή  $X_iY_iZ_i$  έως το απόλυτο σύστημα αναφοράς  $X_0Y_0Z_0$  και την περιστροφή των αξόνων  $X_iY_i$  και  $Z_i$  με σεβασμό προς το σύστημα συντονισμού  $X_0Y_0Z_0$ . Για να αποκτηθεί η θέση ενός στοιχείου που είναι τοποθετημένο στο τέλος του μηχανισμού, ένα σύστημα συντονισμού πρέπει να σχετίζεται με εκείνο, στο κεντρικό σημείο του εργαλείου.

Μία γνωστή μέθοδος αναπαράστασης της σχετικής χωρικής θέσης ενός άκαμπτου σώματος, όσον αφορά σε ένα δεδομένο σύστημα συντεταγμένων, βασίζεται σε ένα πίνακα  $4 \times 4$ , που ονομάζεται «πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού». Οι πρώτες τρεις στήλες του πίνακα (δείτε Σχήμα 6.11) αναπαριστούν τα διανύσματα μονάδας του συστήματος αναφοράς  $X_iY_iZ_i$  του άκαμπτου σώματος, με σεβασμό προς το απόλυτο σύστημα αναφοράς. Η τέταρτη στήλη υποδηλώνει την θέση της αρχής  $X_iY_iZ_i$  με σεβασμό προς το σύστημα αναφοράς.

Χρησιμοποιώντας πίνακες ομογενών μετασχηματισμών, κάθε σημείο στοιχείου που αναφέρεται στο τοπικό σύστημα  $X_i Y_i Z_i$  μπορεί εύκολα να αποκτηθεί με σεβασμό προς το σύστημα αναφοράς  $X_0 Y_0 Z_0$ , ως ακολούθως:

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} \quad (6.3)$$



Σχήμα 6. 11 – Πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού για τον προσδιορισμό χωρικής θέσης του στοιχείου.

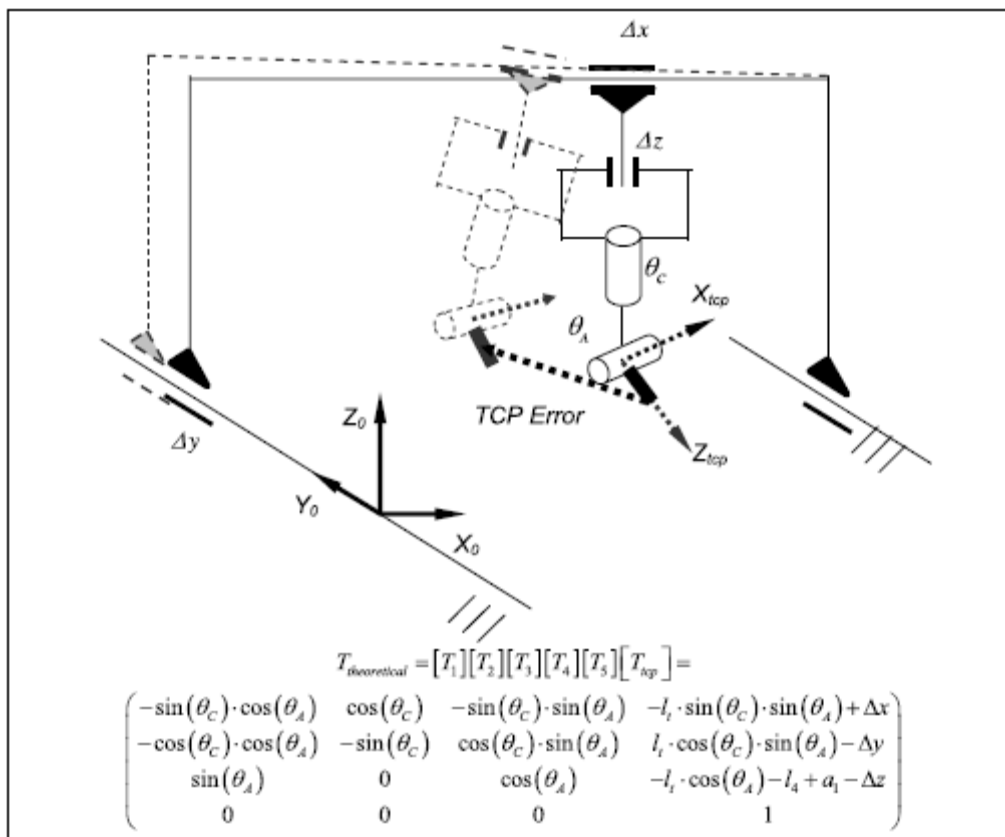
Για την αναπαράσταση ενός χωρικού χειριστή όπως μία εργαλειομηχανή, σχηματοποιείται ένας πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού, για να περάσει από το ένα στοιχείο στο άλλο. Οι πίνακες στοιχείων πολλαπλασιάζονται διαδοχικά για να αποκτήσουν τον μοναδικό πίνακα ομογενούς μετασχηματισμού, ο οποίος μπορεί να υπολογίσει την θέση του εργαλείου (τοποθετείται στο τέλος του χειριστή) με σεβασμό προς την αναφορά του συστήματος συντονισμού. Συνεπώς, λαμβάνεται ο πίνακας γενικού μετασχηματισμού  $T_{4 \times 4}$  της μηχανής και του εργαλείου.

Στην περίπτωση των εργαλειομηχανών, το κεντρικό σημείο του εργαλείου, ή αλλιώς TCP είναι η αναφορά του εργαλείου, που τοποθετείται μόλις στην άκρη του εργαλείου, και ο άξονας  $Z_{tcp}$  συνήθως ταιριάζει στον άξονα του εργαλείου. Επομένως, ο γενικός πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού μίας εργαλειομηχανής, δίνει την θέση του συστήματος TCP ( $X_{tcp} Y_{tcp} Z_{tcp}$ ). Αυτός ο πίνακας είναι μία συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων της μηχανής και της θέσης των βαθμών ελευθερίας (άξονες μηχανής).

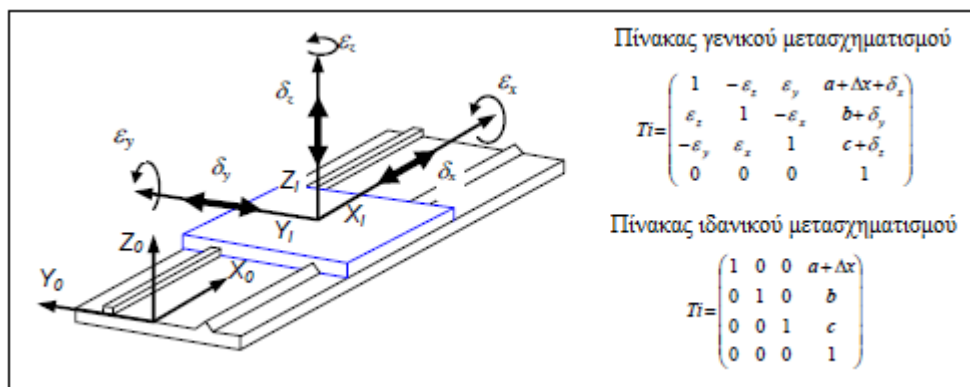
Για παράδειγμα, στο σχήμα 6.12, φαίνεται ένα κέντρο φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας πέντε αξόνων και το κινηματικό μοντέλο του. Αυτή η μηχανή παρουσιάζει τρεις μεταγραφικούς άξονες (X, Y και Z) στην μνήμη RAM, και δύο περιστροφικούς άξονες (A και C) στο σταθερό μέρος του τόννου. Μόλις σχεδιαστεί το μοντέλο, καθορίζεται ένα σύστημα αναφοράς συντεταγμένων ( $X_0 Y_0 Z_0$ ) που είναι σταθεροποιημένο στην βάση της μηχανής. Για να ληφθεί ο πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού ολόκληρης της μηχανής, προσαρμόζονται διαφορετικά συστήματα αναφοράς σε κάθε δομικό στοιχείο. Πολλαπλασιάζοντας κάθε πίνακα μετασχηματισμού από το ένα στοιχείο αναφοράς στο άλλο  $[T_i]$ , λαμβάνεται ο συνεπαγόμενος πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού  $[T_{th}]$ , όπως φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος 6.12. Οι όροι αυτού του πίνακα εξαρτώνται από την θέση των αξόνων των εργαλειομηχανών ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $\theta_A$  και  $\theta_C$ ), τους γεωμετρικούς παράγοντες της δομής της μηχανής, που προσδιορίζονται ως  $a_1$  ή  $l_4$ , και τέλος, το μήκος του εργαλείου που προσδιορίζεται ως  $l_e$ .

Κατά τον ίδιο τρόπο, ένα σφάλμα σε κάθε στοιχείο της μηχανής μπορεί να θεωρηθεί στο κινηματικό μοντέλο ως μία νέα παράμετρος. Στο σχήμα 6.12, παρουσιάζονται τα θεωρητικά και κινηματικά σχήματα. Όπως φαίνεται, η θέση της άκρης του εργαλείου που αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων ( $X_0 Y_0 Z_0$ ), είναι πολύ πιο δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα σφάλματα των στοιχείων της μηχανής και οι αρθρώσεις.

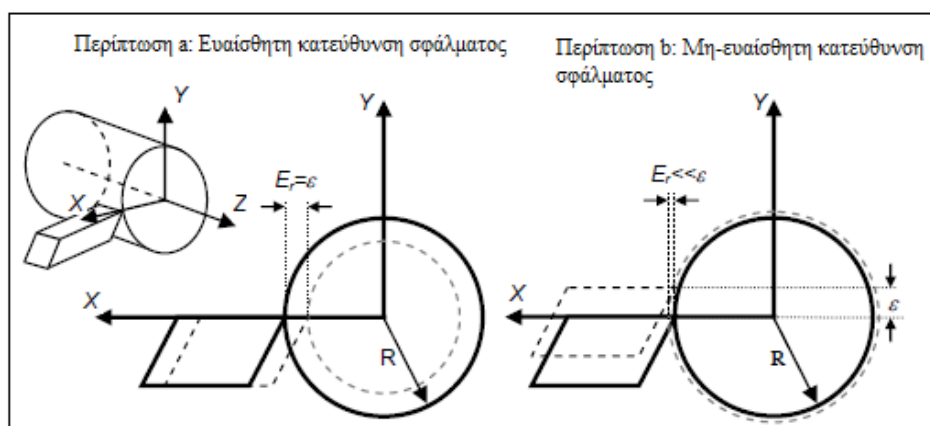
Η πολυπλοκότητα της προσέγγισης ομογενού μετασχηματισμού, πηγάζει από τον μεγάλο αριθμό σφαλμάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε κάθε μετασχηματισμό στοιχείων. για παράδειγμα, θεωρώντας έναν γραμμικό οδηγό κίνησης, ο πίνακας μετασχηματισμού δίνει την κίνηση ενός συστήματος συντεταγμένων που ρυθμίζονται στην μεταφορά, με σεβασμό προς το σύστημα αναφοράς που ρυθμίζεται στον οδηγό κίνησης. Η ιδανική γραμμική κίνηση οδηγεί σε έναν εύκολα ερμηνεύσιμο πίνακα, συμπεριλαμβάνοντας τις σταθερές τιμές  $a, b$  και  $c$  που είναι εξαρτημένες από την γεωμετρία του οδηγού κίνησης και της κίνησης  $\Delta x$  της διαφάνειας. Αλλά αν τα σφάλματα λαμβάνονται υπόψη, ο συνεπαγόμενος πίνακας εισάγει πολλούς όρους μετάφρασης και περιστροφής (δείτε Σχήμα 6.13). Οι τιμές σφαλμάτων που σημειώνονται ως  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  αντιστοιχούν στα γραμμικά σφάλματα τοποθέτησης, όπου  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ , και  $\varepsilon_z$  είναι τα σφάλματα περιστροφής, βήματος και εκτροπής. Τα σφάλματα αυτά είναι μεταβλητές για κάθε θέση του οδηγού, και πρέπει να έχουν μετρηθεί προηγουμένως. Συνεπώς, συγκρίνοντας τους ιδανικούς και τους γενικούς (συνολικούς) πίνακες, ο αριθμός των παραμέτρων αυξάνει σημαντικά.



Σχήμα 6. 12 – Κινηματικά μοντέλα ενός τέλει και ενός πραγματικού κέντρου φραιζαρίσματος πέντε αξόνων.



Σχήμα 6. 13 – Ιδανικός και γενικός πίνακας ομογενού μετασχηματισμού για έναν γραμμικό οδηγό κίνησης.



Σχήμα 6. 14 – Ευαίσθητες και μη-ευαίσθητες κατευθύνσεις σφάλματος για μία συμβατική λειτουργία περιστροφής.

Παρά την πολυπλοκότητα αυτή, οι ομογενείς μετασχηματισμοί, συμπεριλαμβάνοντας τα σφάλματα κάθε στοιχείου οδηγούν στην μελέτη ενός εξαιρετικού εργαλείου και βελτιώνουν την ακρίβεια της μηχανής. Η επιρροή του κάθε σφάλματος στην τοποθέτηση του εργαλείου μπορεί να ελεγχθεί, συμπεραίνοντας πότε ένα συγκεκριμένο σφάλμα είναι σημαντικό και αξίζει να το δουλέψουμε για να το μειώσουμε. Από την άλλη πλευρά, είναι χρήσιμο να ελέγχουμε το πότε τα σφάλματα είναι σε ευαίσθητη ή μη κατεύθυνση.

Μία κατεύθυνση ονομάζεται ευαίσθητη όταν ένα σφάλμα κατά μήκος της μεταδίδεται απευθείας ή ενισχύεται στην άκρη του εργαλείου. Μία μη ευαίσθητη κατεύθυνση, είναι μία όπου τα σφάλματα επηρεάζουν ελαφρώς την άκρη του εργαλείου. Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα ευαίσθητων και μη-ευαίσθητων κατευθύνσεων. Εδώ, η ίδια τιμή σφάλματος  $\epsilon$  παρουσιάζεται στο εργαλείο για μία συμβατική λειτουργία περιστροφής. Στην πρώτη περίπτωση, το σφάλμα παρουσιάζεται στην ακτινική κατεύθυνση, οδηγώντας με ένα παρόμοιο σφάλμα επεξεργαζόμενου κομματιού  $E_r$ . Ωστόσο, αν η ίδια τιμή σφάλματος παρουσιάζεται στην κατεύθυνση εφαπτομένης, το σφάλμα  $E_r$  είναι πολύ χαμηλότερο από  $\epsilon$ . Στην περίπτωση αυτή, η ακτίνα είναι μία υψηλά ευαίσθητη κατεύθυνση και συνεπώς τα σφάλματα στην κατεύθυνση αυτή είναι τα πρώτα που πρέπει να μειωθούν.

## 6.2.5 Θερμικά Σφάλματα

Η θερμική αύξηση της δομής της εργαλειομηχανής και του επεξεργαζόμενου κομματιού είναι, γενικά, ένα γνωστό φαινόμενο. Υπάρχει μία γενική κατανόηση πως οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάζουν τις διαστάσεις της μηχανής, επηρεάζοντας εντέλει την ακρίβεια της. Παρ' όλα αυτά, με το πέρασμα των ετών, μερικές εργαλειομηχανές έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τις επιδράσεις θερμικής αύξησης. Ωστόσο, σήμερα μερικοί χρήστες αρχίζουν να διατηρούν την θερμοκρασία του εργαστηρίου στους  $20^\circ\text{C}$ , συνήθως μέσω κλιματισμού.

Το μέγεθος των συμπαγών στοιχείων εξαρτάται από την θερμοκρασία και τα περισσότερα υλικά διαστέλλονται ή συστέλλονται γραμμικά με αυτήν; ο γραφίτης αποτελεί μία εξαίρεση όντας πρακτικά σταθερός στις θερμικές μεταβολές. Η αύξηση του γραμμικού μήκους μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\Delta L = \Delta T \cdot \alpha \cdot L_0 \quad (6.4)$$

όπου  $\Delta L$  είναι το μήκος της αύξησης,  $\Delta T$  είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας,  $\alpha$  είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής και  $L_0$  είναι το αρχικό μήκος του αντικειμένου. Αυτή η εξίσωση θεωρεί σταθερό τον συντελεστή θερμικής διαστολής και ομοιόμορφη την

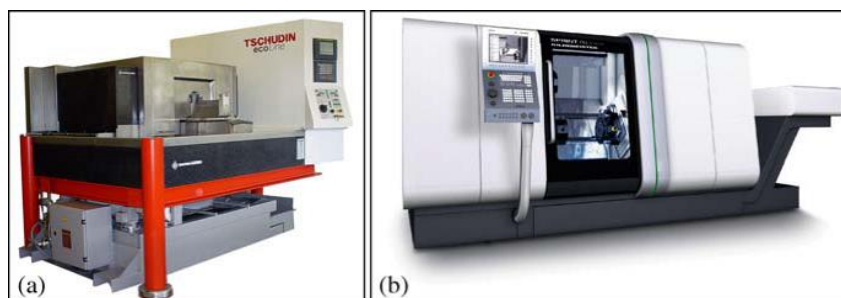
θερμοκρασία κατά μήκος του γραμμικού αντικειμένου, αλλά δίνει μία πραγματικά καλή προσέγγιση της θερμικής αύξησης ενός στοιχείου.

Στην θεώρηση αυτού του τύπου, η μεταβολή του μήκους μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αν τα μήκη του στοιχείου, της μεταβολής της θερμοκρασίας ή του συντελεστή θερμικής διαστολής είναι ελάχιστα. Ωστόσο, το μήκος των στοιχείων της μηχανής εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής, και αποτελούν ένα περιορισμό του σχεδιασμού. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι μία ιδιότητα υλικού, επομένως η επιλογή υλικού του στοιχείου, είναι πολύ σημαντική.

Ο γρανίτης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις μηχανές συντονισμού των μετρήσεων (CMM). Ομοίως, πολλές εργαλειομηχανές υψηλής ακρίβειας συμπεριλαμβάνουν δομικά εξαρτήματα αυτού του υλικού; δείτε την Σχήμα 6.15. Το κύριο πλεονέκτημα είναι η μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και η ακρίβεια και επιτεδοποίηση των επιφανειών, αλλά είναι ολοφάνερα μία πολύ πιο δαπανηρή λύση από την συμβατική δομή του γκρι χυτοσίδηρου.

Στον Πίνακα 6.2, φαίνονται οι συντελεστές θερμικής διαστολής μερικών από τα πιο τυπικά υλικά. Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 1, ο χυτοσίδηρος είναι η συνηθισμένη λύση για τις συμβατικές εργαλειομηχανές, όταν αξιολογούνται ταυτόχρονα πολλές πτυχές. θεωρώντας τις τιμές που συλλέχθηκαν στον Πίνακα 6.2 και χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, αν ένα εργαστήριο δεν είναι μονωμένο κατάλληλα και η θερμοκρασία αυξάνει 10°C, για ένα στοιχείο χυτοσίδηρου μήκους 1,000mm, προκαλείται μεταβολή του μήκους μεγαλύτερη από 0.1mm.

Μία γενική αλλά λανθασμένη πεποίθηση είναι πως αν η αλλαγή της θερμοκρασίας είναι αρκετά χαμηλή, η μηχανή και τα επεξεργαζόμενα κομμάτια υφίστανται παρόμοια θερμική αύξηση. Προφανώς δεν είναι αλήθεια, επειδή η εργαλειομηχανή, η πλάκα στήριξης και το επεξεργαζόμενο κομμάτι παρουσιάζουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Επιπλέον, αν αλλάζουν οι θερμοκρασίες του δωματίου, η μηχανή, οι πλάκες στήριξης και τα επεξεργαζόμενα κομμάτια δεν αλλάζουν την θερμοκρασία τους με την ίδια ταχύτητα. Πάλι εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του υλικού και από το μέγεθος των στοιχείων.



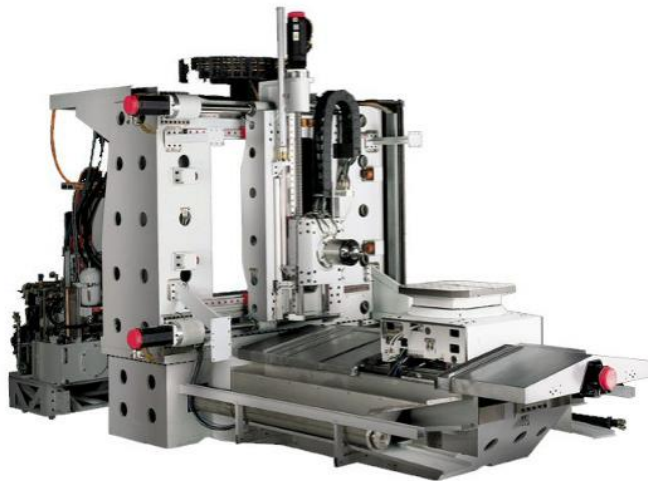
Σχήμα 6. 15 – α) Μηχανή λείανσης υπέρ-ακρίβειας του Tschudin. β) Προηγμένο κέντρο περιστροφής CTXofDMG δομικά στοιχεία γρανίτη.

**Πίνακας 6.2** – Συντελεστές θερμικής διαστολής για υλικά που χρησιμοποιούνται στις δομές εργαλειομηχανών και στα υλικά των επεξεργαζόμενων κομματιών.

Υλικό	Συντελεστής θερμικής διαστολής ( $\alpha \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )
Γκρι χυτοσίδηρος	11.1
Ανθρακας χάλυβα (AISI 1045)	10.8
Πολυμερές σκυρόδεμα	11.5–14.0
Γρανίτης	8.0–8.5
Αλουμίνιο (7075 T6)	23.6
Τιτάνιο (Ti6Al4V)	8.6
Ανοξείδωτο ατσάλι (AISI 303)	17.3

Αν και όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο κινηματικός σχεδιασμός είναι υψηλά προτεινόμενος, οι συμβατικές εργαλειομηχανές είναι συνήθως δομές υψηλού περιορισμού. Για τον λόγο αυτό, οι θερμικές αυξήσεις των στοιχείων της μηχανής περιλαμβάνουν περίπλοκες δομικές παραμορφώσεις, αφού αυτές οι αυξήσεις περιορίζονται από άλλα στοιχεία. Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των πιέσεων παραμόρφωσης που προκαλείται από την θερμική διαστολή, η συμμετρική δομή της μηχανής είναι μία καλή σχεδιαστική πρακτική. Έτσι, η διαστολή προς το ένα άκρο του στοιχείου αντισταθμίζεται με την διαστολή στο άλλο άκρο. Στο σχήμα 6.16 φαίνεται μία διάταξη εργαλειομηχανής με μία πλήρη συμμετρική δομή. Στην μηχανή αυτή, τα σερβο-συστήματα και τα συστήματα ψύξης τοποθετούνται μακριά από την περιοχή εργασίας. Αυτό επειδή τα στοιχεία εκείνα είναι πηγές θέρμανσης οι οποίες μπορεί να στρεβλώσουν και τη μηχανή και το εξάρτημα.

Ο έλεγχος θερμοκρασίας του εργαστηρίου είναι απαραίτητος μέσα στα συστήματα κλιματισμού, τα οποία συνήθως λειτουργούν στους 20°C σαν θερμοκρασία αναφοράς. Σαν κανόνας, το εργαστήριο πρέπει να τοποθετείται μέσα σε ένα κλειστό δωμάτιο με μονωμένους τοίχους για να αποφεύγεται κάθε είσοδος ηλιακού φωτός και κάθε θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης προτείνεται το συνεχές διάβασμα της θερμοκρασίας σε ποικίλα σημεία του εργαστηρίου κάθε ώρα, ώστε να καταγραφούν οι αλλαγές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.16 – Εργαλειομηχανή υψηλής ακρίβειας με συμμετρικό σχεδιασμό, από Dixi.

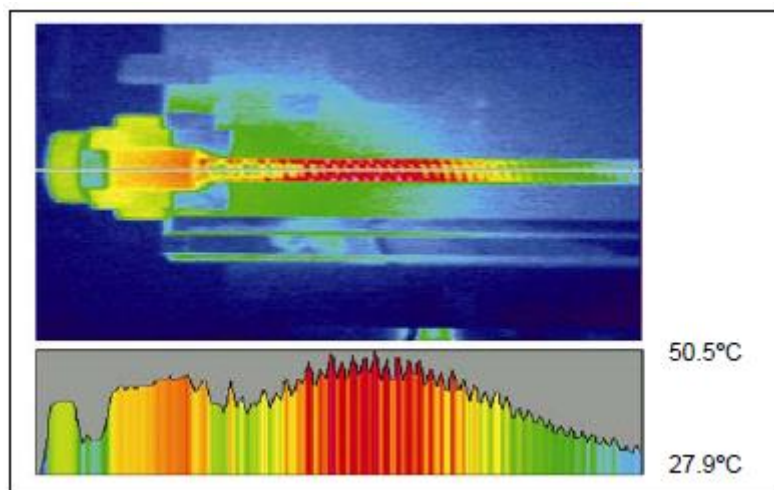
Υπάρχουν μερικές τυπικές πηγές θερμότητας στην εργαλειομηχανή, οι οποίες μπορεί να αυξήσουν την θερμοκρασία των περιβαλλόντων στοιχείων. Η γενική πρόταση είναι να τοποθετηθούν αυτές οι πηγές θερμότητας όσο πιο μακριά γίνεται από την περιοχή εργασίας. Αυτό είναι αρκετά εύκολο με μερικά στοιχεία όπως είναι τα ηλεκτρικά συστήματα, οι ψύκτες ή ακόμη οι σερβο-οδηγοί. Ωστόσο, στοιχεία όπως είναι οι σφαιρικοί κοχλίες, παράγουν ζέστη και αυξάνουν την θερμοκρασία.

Οι σφαιρικοί κοχλίες χρησιμοποιούνται για να αντιστρέφουν την περιστροφική κίνηση των αξόνων σε γραμμική. Είναι πολύ ακριβείς και αποδοτικοί, και μεταδίδεται περίπου το 90% της ενέργειας. Ωστόσο η υπόλοιπη ενέργεια μεταφράζεται σε θερμότητα, η οποία προκαλεί την θερμική διαστολή του σφαιρικού κοχλία όντας μία πηγή σφαλμάτων τοποθέτησης. Η θερμική μεταβολή των σφαιρικών κοχλίων είναι γενικά απρόβλεπτη και μη-ομοιόμορφη, έτσι είναι πολύ δύσκολο να αντισταθμιστεί. Μία καλή πρακτική εγκαθιστά τον άξονα με μία υψηλή προ-πίεση; με τον τρόπο αυτό, η αρχική παραμόρφωση μπορεί να απορροφήσει κάποια από την θερμική διαστολή χωρίς σημαντική μείωση της ακαμψίας του άξονα.

Στο σχήμα 6.17, φαίνεται ένα πραγματικό παράδειγμα της θέρμανσης ενός σφαιρικού κοχλία, μετά από έξι ώρες αντίστροφης διάνυσης 24m/min μεταξύ δύο σημείων που

βρίσκονται χωριστά 150mm. Μπορεί να παρατηρηθεί η θερμική κατανομή και η ζεστή περιοχή που τοποθετείται στην μεσαία περιοχή του κοχλία.

Αυτή η επίδραση, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά σφάλματα όταν το σύστημα μέτρησης της τοποθέτησης βασίζεται στον κωδικοποιητή του σερβοκινητήρα (Σχήμα 6.9a). Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, υπάρχουν δύο λύσεις. Πρώτα, η χρήση γραμμικών κλιμάκων για την απευθείας μέτρηση της θέσης του άξονα (Σχήμα 6.9b). Η απευθείας μέτρηση θα αυξήσει την ακρίβεια της εργαλειομηχανής, όχι μόνο εξαιτίας της θερμικής διαστολής του σφαιρικού κοχλία, αλλά επίσης και από άλλες παραμορφώσεις οι οποίες δεν μπορούν να μετρηθούν από τον κωδικοποιητή. Η δεύτερη λύση είναι να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικοί κραδασμοί του σφαιρικού κοχλία από το σύστημα ψύξης. Μία τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια είναι η ροή ψυκτικού υγρού μέσα τους κοχλίες της μηχανής. Είναι μία πιο ακριβή λύση από ότι οι απλοί συμπιεγείς σφαιρικοί κοχλίες, επειδή είναι απαραίτητο να βγάζουν τους σφαιρικούς κοχλίες και να εισάγουν το ψυκτικό υγρό μέσω περιστροφικών αρθρώσεων. Επιπλέον, όχι μόνο οι μηχανές υψηλής ακρίβειας αλλά επίσης κάποια κέντρα φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιούν σήμερα σφαιρικούς κοχλίες που ψύχονται.



Σχήμα 6. 17 – Σφάλμα τοποθέτησης ως αποτέλεσμα ανόδου της τοπικής θερμοκρασίας μέσα στον σφαιρικό κοχλία επανακυκλοφορίας (CourtesyofHeidenhain).

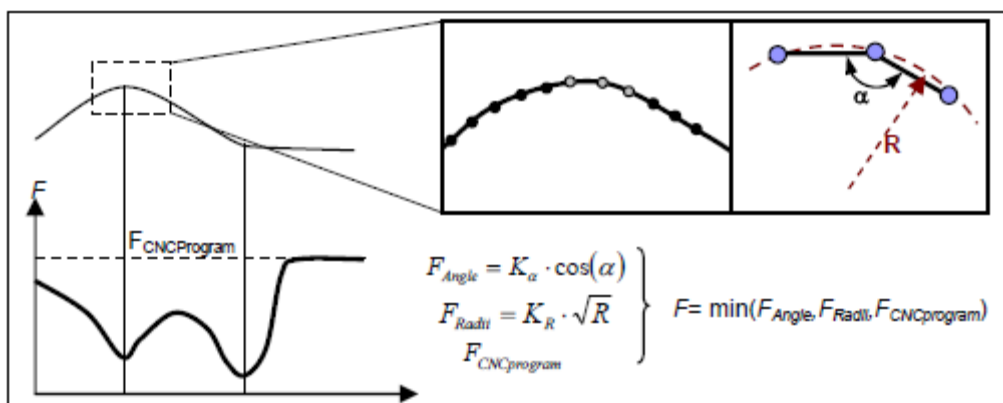
Τέλος, μία από τις κύριες εισόδους είναι ο κύρια άτρακτος της μηχανής. Είναι συνήθως ένας ηλεκτρικός κινητήρας υψηλής ισχύος και, αν και ψύχεται έντονα, η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε μία θερμική διαστολή, η οποία «πιέζει» αξονικά το εργαλείο προς το επεξεργαζόμενο κομμάτι. Αυτή η επίδραση φάνηκε καθαρά στην Ενότητα 3.5.4.

## 6.2.6 Σφάλματα παρεμβολής του CNC

Η τελευταία γενιά των CNC ενσωματώνουν αλγόριθμους που μειώνουν την ταχύτητα της μηχανής και της επιτάχυνσης σε εκείνες τις ζώνες όπου πρέπει να εκτελούνται περίπλοκες παρεμβολές, όπως γωνίες ή τροχιές με πολύ χαμηλή ακτίνα καμπυλότητας. Η μείωση της επιτάχυνσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των δυνάμεων αδράνειας. Αυτές οι δυνάμεις, μπορούν να παραμορφώσουν τα δομικά στοιχεία της μηχανής ή να παρεκκλίνουν τις τροχιές. Επιπλέον, αυτοί οι αλγόριθμοι που παρέχουν έλεγχο των κραδασμών, οδηγούν σε μία ομαλότερη συμπεριφορά των οδηγών κίνησης τροφοδοσίας.

Η λειτουργία των CNC για την μείωση του ποσοστού τροφοδοσίας της μηχανής κατά μήκος των πολύπλοκων παρεμβολών ονομάζεται look-ahead. Βασικά, βασίζεται στο διάβασμα

εκατοντάδων τμημάτων CNC πριν από την εκτέλεσή τους, προσαρμόζοντας το ποσοστό τροφοδοσίας με βάση την πολυπλοκότητα της τροχιάς. Αυτή η λειτουργία εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, τροποποιώντας την πραγματική τροφοδοσία με όσον αναφορά στην προγραμματισμένη. Ένα παράδειγμα υπολογισμού του ποσοστού τροφοδοσίας φαίνεται στο σχήμα 6.18, όντας κάτι διαφορετικό για άλλους κατασκευαστές CNC. Εδώ μία εργαλειομηχανή που αποκτήθηκε από το σύστημα CAM μεταφράζεται σε μία σειρά μικρών γραμμικών παρεμβολών (μήκους μεταξύ 0.1mm και 1μm). Ο αλγόριθμος look-ahead αξιολογεί κάθε σύνολο τριών διαδοχικών σημείων και υπολογίζει δύο γεωμετρικές παραμέτρους, την γωνία  $\alpha$  μεταξύ δύο διαδοχικών χορδών και την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  του κύκλου συμπεριλαμβάνοντας τα τρία σημεία. Το CNC αξιολογεί δύο ποσοστά τροφοδοσίας; το πρώτο είναι η συνάρτηση της γωνίας  $\alpha$ , και το δεύτερο είναι η συχνότητα της ακτίνας  $R$ . Συγκρίνοντας αυτά τα δύο υπολογισμένα ποσοστά τροφοδοσίας με το προγραμματισμένο, το πιο περιοριστικό από τα τρία επιλέγεται και στέλνεται στην συνάρτηση ελέγχου του άξονα CNC.



Σχήμα 6. 18 – Παράδειγμα ενός απλού αλγόριθμου look-ahead, ο υπολογισμός τροφοδοσίας για ένα γενικό μονοπάτι εργαλείου.

Προφανώς, αυτοί οι αλγόριθμοι δηλώνουν μείωση της τροφοδοσίας και συνεπώς αύξηση του χρόνου κατεργασίας; π.χ. οι χρόνοι φραιζαρίσματος μπορεί να είναι έως 80% υψηλότεροι από τους αναμενόμενους χρησιμοποιώντας το προγραμματισμένο ποσοστό τροφοδοσίας σαν αναφορά. Για τον λόγο αυτό, οι παράμετροι look-ahead (οι παράγοντες  $K$  στο σχήμα 6.18) μπορεί να αλλάξουν κατά μήκος του προγράμματος CNC εισάγοντας μερικές βοηθητικές συναρτήσεις μέσα στο πρόγραμμα. Αυτές οι βοηθητικές συναρτήσεις καλούν ένα σύνολο παραμέτρων που αποθηκεύονται σε ένα πίνακα CNC. Συνήθως, για σκληρές λειτουργίες χωρίς απαιτήσεις ακριβείας αλλά όπου είναι επιθυμητή η υψηλή παραγωγικότητα, οι παράμετροι look-ahead που πρόκειται να επιλεχθούν, δεν μειώνουν σε μεγάλο βαθμό το προγραμματισμένο ποσοστό τροφοδοσίας. Αντίθετα, στην περίπτωση λειτουργιών φινιρίσματος είναι σημαντική η ενεργοποίηση των παραμέτρων look-ahead για την μείωση του ποσοστού τροφοδοσίας και με τον τρόπο αυτό τις εσωτερικές δυνάμεις, επιτρέποντας συνεπώς μία ομαλή κίνηση κατά μήκος του πλήρους μονοπατιού.

### 6.3 Σφάλματα Προερχόμενα από την Διαδικασία Κατεργασίας

Οι προηγούμενες ενότητες έχουν περιγράψει τις κύριες πηγές σφάλματος που προέρχονται από τις εργαλειομηχανές και τα στοιχεία τους. Επιπρόσθετα στα σφάλματα αυτά, υπάρχουν σημαντικά σφάλματα που προέρχονται από την διαδικασία κατεργασίας. Μερικές φορές μπορεί να είναι μεγαλύτερα από τις αποκλίσεις που προκαλούνται από την ίδια την κατεργασία.

Τα σφάλματα από την διαδικασία κατεργασίας μπορούν να ξεκινήσουν από το πρώιμο στάδιο, την παραγωγή προγράμματος του CNC, ακολουθούμενα από φθορά του εργαλείου,

απόκλιση του εργαλείου και παραμόρφωση των εξαρτημάτων λόγω της πίεσης στην πλάκα στήριξης.

Φυσικά, τα ανθρώπινα σφάλματα είναι πάντοτε πιθανά. Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές πολλαπλών εργασιών και πολλαπλών αξόνων, έχουν επεκτείνει την πιθανότητα συγκρούσεων του εργαλείου ενάντια στο εξάρτημα. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζει ενδιαφέρον το ειδικά ανεπτυγμένο λογισμικό για την εικονική προσομοίωση της διαδικασίας κατεργασίας κατά μήκος των κινήσεων της μηχανής. Αυτά τα πακέτα επιτρέπουν τον έλεγχο των προγραμμάτων κατεργασίας πάνω στην οθόνη του υπολογιστή. Ένα παράδειγμα είναι το Vericut της CGTech. Ωστόσο, αυτός ο κίνδυνος και άλλα ανθρώπινα σφάλματα δεν λαμβάνονται υπόψη στον προϋπολογισμό του σφάλματος.

Σε μία γενική θεώρηση, τα σφάλματα που προέρχονται από την διαδικασία κατεργασίας μπορούν να μειωθούν λαμβάνοντας ειδική φροντίδα της πλάκας στήριξης του εξαρτήματος και του συστήματος σύσφιξης του εργαλείου από την μία, και την καλή επιλογή των παραμέτρων κατεργασίας από την άλλη. Μερικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις δυνάμεις κοπής; ωστόσο, είναι αδύνατον να αποφευχθούν άλλες, έτσι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προϋπολογισμό σφάλματος της εργαλειομηχανής ώστε να ληφθεί ο προϋπολογισμός γενικού σφάλματος του εξαρτήματος που πρόκειται να κατεργαστεί.

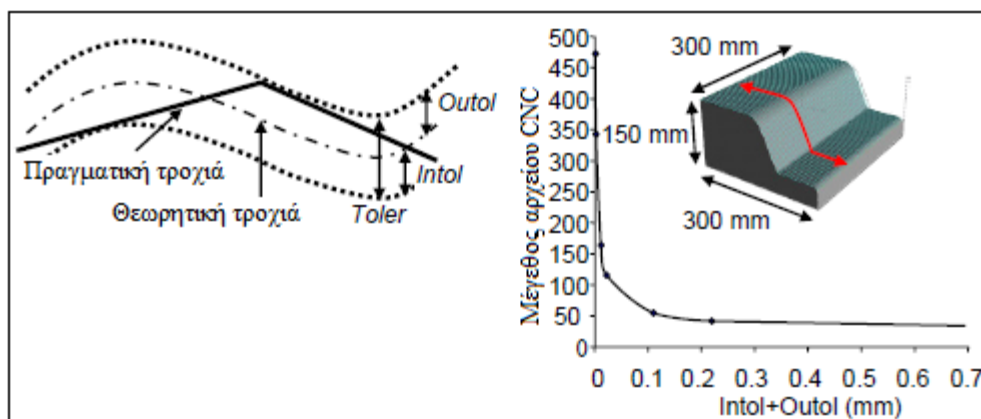
### 6.3.1 Σφάλματα Προερχόμενα από την γενιά προγραμμάτων CNC

Η γενιά των προγραμμάτων CNC μπορεί να διεξαχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, π.χ. χειροκίνητο προγραμματισμό, διαλεκτικό προγραμματισμό ή χρησιμοποιώντας ένα κατασκευαστικό σύστημα με υποβοήθηση υπολογιστή (CAM). Ο χειροκίνητος και ο διαλεκτικός προγραμματισμός είναι απλοί, άμεσοι και, υποθέτουν πως δεν έχουν γίνει σφάλματα, ακριβείς επειδή ο χρήστης είναι εκείνος που ρυθμίζει την τοποθέτηση του εργαλείου σε κάθε σημείο. Παρ' όλα αυτά, είναι έγκυροι μόνο για πολύ απλά εξαρτήματα. Για εξαρτήματα μεσαίας και υψηλής πολυπλοκότητας, πρέπει να χρησιμοποιούνται τα συστήματα CAM.

Τα συστήματα CAM χρησιμοποιούν ως εισόδους την γεωμετρία του εξαρτήματος CAD και έναν αριθμό παραμέτρων που πρόκειται να προσδιοριστούν από τον χρήστη. Το 1980 και στις αρχές του 1990, ο υπολογισμός του εργαλείου όσον αφορά στην επιφάνεια του εξαρτήματος βασιζόταν στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας CAD, η οποία ήταν μία επιπρόσθετη πηγή σφάλματος. Σήμερα, το λογισμικό CAM εργάζεται με την πραγματική επιφάνεια του CAD για να υπολογίσει τις τοποθεσίες των εργαλείων. Ωστόσο, παρουσιάζεται μία άλλη διακρίση, επειδή το τελικό πρόγραμμα CNC βασίζεται γενικά σε μία σειρά από μικρές γραμμικές παρεμβολές. Η κλίση μεταξύ αυτών των παρεμβολών και της αρχικής γεωμετρίας CAD ελέγχεται από το σύστημα CAM, χρησιμοποιώντας μία τιμή ανοχής ή, που είναι πολύ πιο διαδεδομένο, δύο τιμές ανοχής που ονομάζονται «intol» και «outol» (δείτε την [Σχήμα 6.19](#)). Προφανώς, όσο πιο χαμηλές είναι οι τιμές ανοχής, τόσο πιο υψηλή είναι η ακρίβεια του προγράμματος CNC. Όμως, αν οι τιμές «intol» και «outol» είναι πολύ χαμηλές, ο αριθμός των γραμμικών τμημάτων αυξάνει εκθετικά και συνεπώς και το μέγεθος του αρχείου CNC. Το σχήμα 6.19 δείχνει το μέγεθος του προγράμματος για διαφορετικές τιμές «intol» και «outol»; Το μέγεθος του CNC για ένα πρόγραμμα φινιρίσματος μπορεί να είναι έως 700MB ή ακόμη περισσότερο. Στις βιομηχανικές εφαρμογές το μέγεθος του αρχείου είναι σημαντικό επειδή υποδηλώνει τις απαιτήσεις μνήμης για το CNC και τα συστήματα μαζικής αποθήκευσης.

Μερικά συστήματα CAM μπορούν να παράγουν μονοπάτια χρησιμοποιώντας καμπύλες υψηλής τάξης όπως σφήνες ή NURBS. Αυτή η μέθοδος μπορεί να αποκτήσει περίπλοκες τροχιές με πολύ πιο λίγα σημεία, έτσι μπορεί να φαίνεται ως μία τέλεια λύση η λήψη τροχιών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, η πιο επεκταμένη τεχνική είναι ακόμη η γραμμική διακριτοποίηση του μονοπατιού του εργαλείου, λόγω της έλλειψης τυποποίησης στα

CNCNURB από τη μία, και τους υπολογισμούς υψηλότερης ισχύος και μεγαλύτερης αποθηκευτικής ικανότητας στα σύγχρονα CNC από την άλλη.



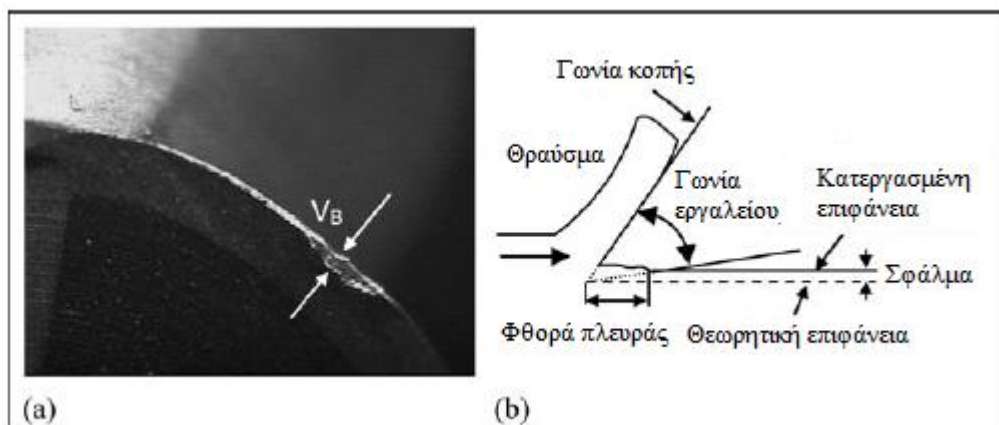
Σχήμα 6. 19 – Μέγεθος αρχείου CNC για ένα εξάρτημα ελέγχου με διαφορετικές τιμές intol και outol.

Παρ' όλα αυτά, κατά μία αυστηρή έννοια, η απόκλιση που προκαλείται από τα συστήματα CAM δεν είναι μία συμβατική πηγή σφάλματος επειδή η μέγιστη απόκλιση μπορεί να ελεγχθεί. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η τιμή αυτού του σφάλματος, θεωρώντας την μέσα στον προϋπολογισμό συνολικού σφάλματος του εξαρτήματος.

### 6.3.2 Σφάλματα Προερχόμενα από την Φθορά του Εργαλείου

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι ετών, νέα υλικά υποστρωμάτων, «μανδύες» και η γεωμετρία εργαλείου έχουν αναπτυχθεί για να αυξηθεί η ταχύτητα κοπής. Αυτές οι εξελίξεις οδηγούν επίσης σε μία μακρύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Δυστυχώς, η φθορά του εργαλείου είναι μία αναπόφευκτη επίπτωση που προέρχεται από πολλές διαδικασίες υποβιβασμού όπως γδάρισμα, διάχυση, πλαστική παραμόρφωση, κλπ. Η φθορά μπορεί να τοποθετηθεί σε διαφορετικές ζώνες αιχμών του εργαλείου. Συνεπώς, αν η φθορά τοποθετείται στην γωνία κοπής του εργαλείου, επηρεάζεται πολύ η ανθεκτικότητα και το άκρο μπορεί να σπάσει, αλλά αυτός ο τύπος φθοράς δεν έχει άμεση συνέπεια στην διάσταση του επεξεργαζόμενου κομματιού. Από την άλλη, αν η φθορά εντοπίζεται στην πλευρά, αλλάζουν και το σχήμα του εργαλείου και η διάσταση, επηρεάζοντας την ακρίβεια του επεξεργαζόμενου κομματιού. Επομένως, η γωνία κοπής πρέπει να μετράται και να ελέγχεται όπως με κάθε άλλη πηγή σφάλματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20.

Η φθορά της πλευράς μετράται από την παράμετρο VB. Υπάρχει μία άμεση σχέση μεταξύ της VB και της διάστασης του εργαλείου στην περίπτωση της φραιζαρίσματος ή στην γωνία αιχμής του εργαλείου στην περίπτωση της περιστροφής. Επομένως, όσο πιο υψηλή είναι η παράμετρος VB, τόσο πιο υψηλή είναι και η απόκλιση της άκρης του εργαλείου και η ανακρίβεια του κατεργασμένου εξαρτήματος. Η μέση τιμή του VB πρέπει να είναι κάτω από 0.3mm για γενικές εφαρμογές (ή 0.5mm σε μερικές περιπτώσεις). Ωστόσο, αυτή η τιμή αναφοράς πρέπει να είναι χαμηλότερη για ακριβή εξαρτήματα υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπου ένα νέο εργαλείο μπορεί να απαιτηθεί για κάθε εξάρτημα.



Σχήμα 6. 20 – α) Φθορά πλευράς. β) Φθορά πλευράς και συνέπειες στην διάσταση του εξαρτήματος.

### 6.3.3 Σφάλμα Απόκλισης Εργαλείου

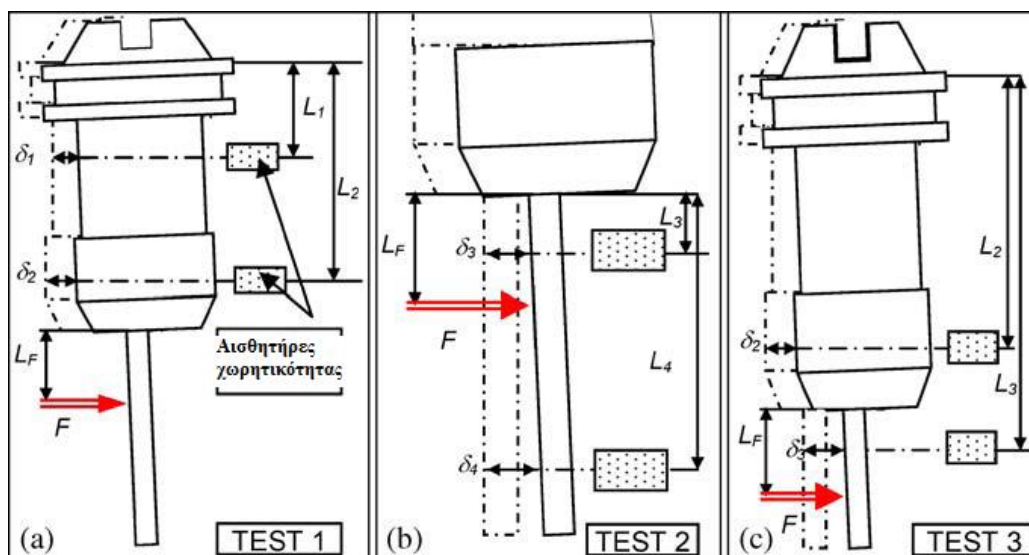
Μερικές λειτουργίες κατεργασίας απαιτούν τη χρήση λεπτών εργαλείων ώστε να φινιριστούν οι βαθιές και στενές κοιλότητες, για παράδειγμα η επιπεδοποίηση των καλουπιών για τα πλαστικά υλικά. Μετά, υπάρχουν σημαντικά σφάλματα που προέρχονται από την απόκλιση του εργαλείου κοπής, ή πιο συγκεκριμένα, από την παραμόρφωση ολόκληρου του συστήματος μηχανή-εργαλειοθήκη-εργαλείο, κάτω από την ενέργεια των δυνάμεων κοπής. Υπάρχουν πολλές ερευνητικές εργασίες σε σχέση με την επίδραση της απόκλισης πάνω στις επιφάνειες της μηχανής. Για παράδειγμα, σφάλματα των 100μm μετρήθηκαν σε ένα καλούπι σκληρυμένου χάλυβα για μία προεξοχή 78mm και διάμετρο 10mm καρβιδιοδέματος σφαιρικής κονδυλοειδούς φραιζας. Το μέγεθος αυτών των στοιχείων εξηγεί το γιατί μερικοί κατασκευαστές καλουπιών πρέπει να επαναλαμβάνουν το πρόγραμμα φινιρίσματος CNC για να ανακατασκευάσουν το υλικό που έμεινε από το προηγούμενο φινίρισμα, με την αύξηση του κόστους και του χρόνου παραγωγής που προκύπτει.

Η πρώτη προσέγγιση στην μελέτη της απόκλισης του εργαλείου θεωρεί το εργαλείο ως έναν κυλινδρικό πρόβολο. Το βασικό αυτό μοντέλο προβλέπει την απόκλιση ως:

$$\delta = \frac{64F}{3\pi E} \frac{L_T^3}{D^4} \quad (6.5)$$

Όπως φαίνεται, η απόκλιση του εργαλείου είναι μία συνάρτηση των επόμενων παραμέτρων:  $E$ , το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του εργαλείου,  $L_T^3/D^4$ , η παράμετρος λεπτότητας του εργαλείου συμπεριλαμβάνοντας την ισοδύναμη διάμετρο του εργαλείου  $D$ , και το μήκος της προεξοχής  $L_T$ . Τέλος,  $F$  είναι η ισχύς κοπής κάθετη στον άξονα του εργαλείου. Θεωρώντας το προηγούμενο μοντέλο, προτείνεται η χρήση μικρών και υψηλής διαμέτρου μηχανές άλεσης, αλλά οι λειτουργίες στις στενές κοιλότητες συνήθως απαιτούν υψηλές προεξοχές και χαμηλές διαμέτρους.

Το εργαλείο τοποθετείται στο τέλος του συστήματος όπου η μηχανή, το στέλεχος και η εργαλειοθήκη επίσης εισάγουν ευελιξία. Τυπικές τιμές ευελιξίας του συστήματος κυμαίνονται από 0.4 έως 1.8μm/N; αυτό το χαρακτηριστικό εξαρτάται από τον τύπο της εργαλειοθήκης, την ακαμψία της κατεργασίας και την λεπτότητα του εργαλείου.



Σχήμα 6. 21– α) Διαμόρφωση ελέγχων για την απόκτηση ακαμψίας στελέχους-ατράκτου. β) Η γωνιακή ακαμψία της εργαλειοθήκης. γ) Η ακτινική ακαμψία της εργαλειοθήκης.

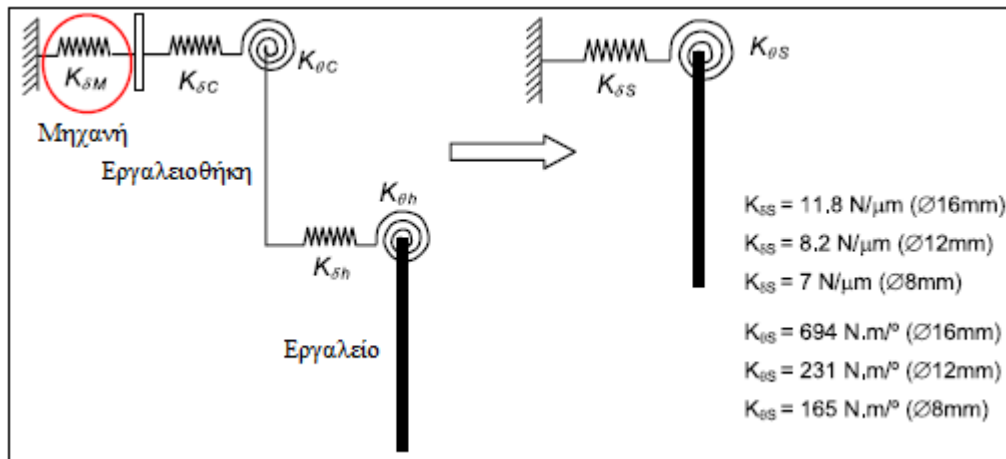
Ένα από τα πιο κοινά στελέχη (γάμπα δαχτυλιδιού) είναι ο τύπος HSK (δείτε Ενότητα 3.4.3) ο οποίος βασίζεται σε μία διπλής όψης επαφή στην άκρη της ατράκτου, και στις κωνικές και στις πλευρικές επιφάνειες του στελέχους. Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει εξαιρετική απόδοση υπό τη μορφή αξονικής και ακτινικής ακαμψίας. Μετρήθηκε η ακτινική ακαμψία των στελεχών HSK50, η οποία κυμαίνεται από 19N/μm στα 5,000rpm έως 17N/μm στα 25,000rpm. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με εκείνη του εργαλείου που αποκτήθηκε από το μοντέλο του προβόλου, οι οποίες είναι περίπου 0.15N/μm για 6Ømm και 4.4N/μm για 12Ømm; μπορεί να σημειωθεί πως στην πιο άκαμπτη περίπτωση, η ακαμψία του εργαλείου είναι περίπου τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή του στελέχους.

Από την άλλη πλευρά, συγκρίνοντας την ακαμψία του εργαλείου όσον αφορά στην εργαλειομηχανή, στην περίπτωση του πιο ευέλικτου εργαλείου, η ευκαμψία της μηχανής είναι μικρότερη από 45% της γενικής τιμής που μετρήθηκε στην άκρη του εργαλείου, ενώ αυξάνεται στο 69.5% στην περίπτωση του πιο άκαμπτου εργαλείου.

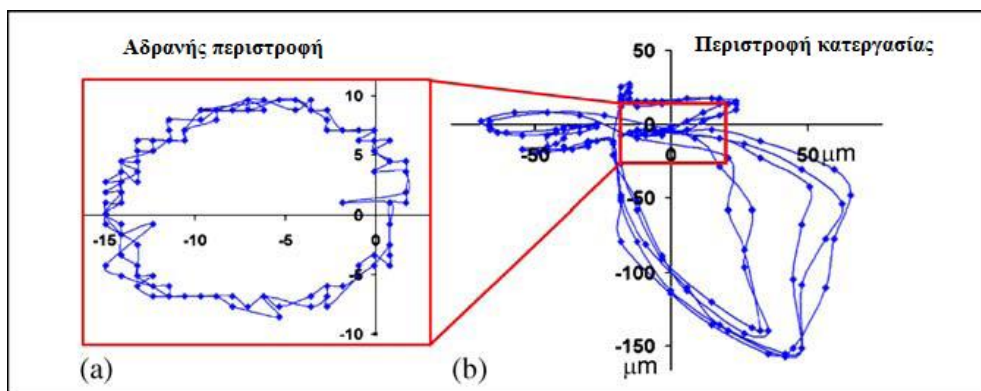
Μία πειραματική μελέτη με την εργαλειοθήκη HSK63 διεξήχθη από τους συγγραφείς (δείτε την Σχήμα 6.21), επειδή αυτό το στέλεχος είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στις εφαρμογές φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί έλεγχοι για την μελέτη της ακαμψίας των διεπιφανειών ατράκτου-στελέχους και εργαλείου-εργαλειοθήκης, μετρώντας την μετατόπιση του εργαλείου  $\delta$  με δύο αισθητήρες χωρητικότητας και εφαρμόζοντας μία σταθερή ισχύ  $F$ .

Στον πρώτο έλεγχο, οι αισθητήρες χωρητικότητας τοποθετήθηκαν μετρώντας την μετατόπιση του στελέχους σε δύο ξεχωριστά σημεία. Στον δεύτερο έλεγχο, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν και οι δύο μετρώντας τις μετατοπίσεις του εργαλείου σε δύο σημεία του εργαλείου και τέλος, στον τρίτο έλεγχο, ένας από τους αισθητήρες μέτρησε την μετατόπιση της εργαλειοθήκης ενώ ο άλλος μέτρησε την μετατόπιση του εργαλείου.

Η ακτινική και η γωνιακή ακαμψία του κάθε στοιχείου, μπορεί να αποκτηθεί από την μέτρηση των  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  και  $\delta_3$ , σε συνδυασμό με την τοποθέτηση των αισθητήρων χωρητικότητας και του σημείου εφαρμογής ισχύος. Η επίδραση της ακαμψίας της ίδιας της μηχανής μπορεί να προστεθεί στους ισοδύναμους συντελεστές που λαμβάνονται. Όπως φαίνεται, στο σχήμα 6.22, όπου φαίνονται οι τιμές γωνιακής  $K_\theta$  και ακτινικής  $K_\delta$  ακαμψίας, η ακαμψία εργαλειοθήκης-μηχανής εξαρτάται από την διάμετρο του εργαλείου. Πρέπει να ληφθεί υπόψη πως η ακαμψία είναι διαφορετική για κάθε άξονα μηχανής και χρησιμοποιώντας την χαμηλότερη τιμή υποδηλώνει την εκτίμηση της χειρότερης περίπτωσης ακαμψίας.



Σχήμα 6. 22 – Ισοδύναμη ακτινική και γωνιακή ακαμψία για διαφορετικές διαμέτρους εργαλείων.



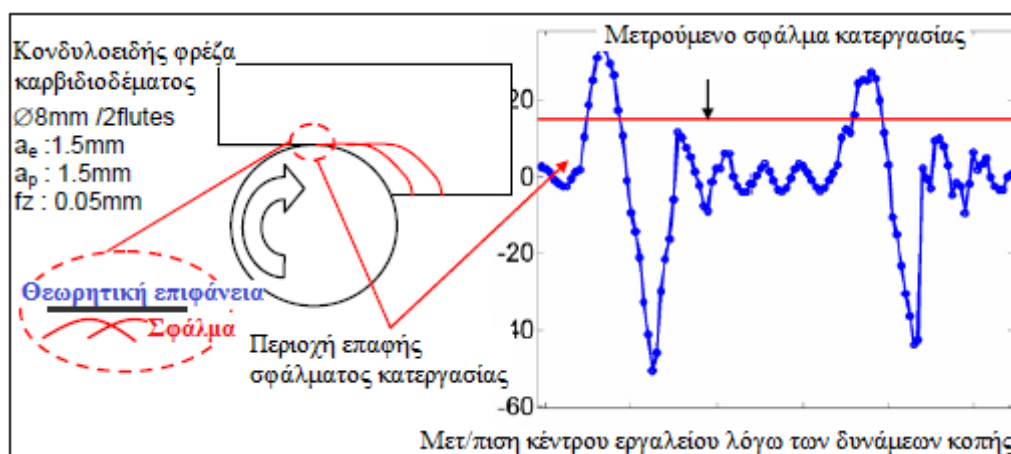
Σχήμα 6. 23 – α) Αρχική εκκεντρότητα. β) Μετατόπιση του άξονα του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, κονδυλοειδής φραιζα διαμέτρου 8mm.

Για τα άκαμπτα εργαλεία, η απόκλιση του εργαλείου είναι χαμηλότερη από την αρχική εκκεντρότητα του εργαλείου, έτσι το σφάλμα απόκλισης λόγω των δυνάμεων κοπής μπορεί να αγνοηθεί. Παρ' όλα αυτά, για λεπτά εργαλεία, οι δυνάμεις κοπής προκαλούν απόκλιση της άκρης του εργαλείου μέχρι 10 φορές της τιμής εκκεντρότητας. Στο [σχήμα 6.23](#), παρουσιάζεται η πραγματική μετατόπιση μίας κονδυλοειδούς φραιζας διαμέτρου 8mm, που μετράται από δύο αισθητήρες χωρητικότητας, ο ένας για τον άξονα X και ο άλλος για τον Y. Στο [σχήμα 6.23a](#) το εργαλείο εκτελείται χωρίς μηχανική κατεργασία, έτσι η μετατόπιση αντιστοιχεί στην αρχική εκκεντρότητα. Το εργαλείο στο [σχήμα 6.23b](#) κατεργάζεται ένα σκληρό εργαλείο χάλυβα, με την απόκλιση του εργαλείου να είναι μεγαλύτερη από 100μm. Για να εκτιμηθεί το σφάλμα που παράγεται από την ευελιξία εργαλείου-εργαλειοθήκης-μηχανής, είναι επίσης απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το μέγεθος της ισχύος κοπής. Έτσι, μπορούμε να διαχωρίσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις για τις διαδικασίες κατεργασίας.

**Λειτουργίες περιστροφής:** Οι λειτουργίες αυτές παρουσιάζουν συνεχή φόρτιση θραυσμάτων που οδηγούν σε μία συνεχή δύναμη κοπής. Συνεπώς, το σφάλμα που προκαλείται από την απόκλιση της άκρης του εργαλείου μπορεί να προβλεφθεί σχετικά εύκολα, χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη τιμή ακαμψίας του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των ευαίσθητων και μη-ευαίσθητων σφαλμάτων (δείτε το [Σχήμα 6.14](#)).

**Λειτουργίες φραιζαρίσματος:** Το σφάλμα που προκαλείται από την απόκλιση του εργαλείου είναι πολύ πιο δύσκολο να αξιολογηθεί. Η επιπεδοποίηση εμπλέκει ποικίλες ισχύεις κοπής, ώστε η απόκλιση του εργαλείου να είναι επίσης μεταβλητή κατά μήκος κάθε περιστροφής. Συνήθως, η απόκλιση του εργαλείου είναι ένα οιονεί στατικό φαινόμενο, ώστε η απόκλιση να είναι ανάλογη με την ισχύ κοπής αλλά εξαρτώμενη από τον χρόνο. Από την άλλη πλευρά, η επιπεδοποίηση είναι μία λειτουργία τριών διαστάσεων.

Όσον αφορά σε αυτό, το σφάλμα στην επιφάνεια του εξαρτήματος που προκλήθηκε από την απόκλιση του εργαλείου εξαρτάται από την στιγμή στην οποία το εργαλείο κόβει την θεωρητική επιφάνεια του επεξεργαζόμενου τμήματος, ενώ αυτό που συμβαίνει στην υπόλοιπη περιστροφή του εργαλείου, δεν θα έχει καμία επίδραση στην ακρίβεια του εξαρτήματος. Στην περίπτωση του ομόρροπου φραιζαρίσματος, η στιγμή που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι όταν η αιχμή κοπής εξέρχεται από το επεξεργαζόμενο κομμάτι; στην περίπτωση του αντίρροπου φραιζαρίσματος, είναι όταν η αιχμή κοπής εμπλέκεται μέσα στο επεξεργαζόμενο κομμάτι, όπως είναι η περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 6.24. Στα δεξιά αυτής του σχήματος, αναπαριστάται η μετατόπιση του άξονα του εργαλείου και το σφάλμα απόκλισης του εργαλείου. Το σφάλμα επιφάνειας παράγεται όταν η αιχμή κοπής εμπλέκεται μέσα στο επεξεργαζόμενο κομμάτι, και η υπόλοιπη περιστροφή δεν προκαλεί κάποιο σφάλμα στην επιφάνεια του επεξεργαζόμενου κομματιού.



Σχήμα 6. 24 – Σφάλμα που προκαλείται από την απόκλιση του εργαλείου για μία περίπτωση αντίρροπου φραιζαρίσματος: η στιγμή της εμπλοκής της αιχμής κοπής είναι όταν η απόκλιση του εργαλείου προκαλεί το σφάλμα κατεργασίας.

Υπάρχουν κάποιες έρευνες που εξηγούν τον υπολογισμό των σφαλμάτων λόγω απόκλισης του εργαλείου συμπεριλαμβάνοντας μερικές λύσεις αλλά είναι δύσκολο να εφαρμοστούν. Πρώτα, είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι δυνάμεις κοπής την στιγμή που το εργαλείο έρχεται σε επαφή με την θεωρητική επιφάνεια του εξαρτήματος. Επιπλέον, ο υπολογισμός της ισχύος κοπής πρέπει να γίνεται με την πραγματική φόρτιση θραύσματος, καθώς η απόκλιση του εργαλείου μειώνει την θεωρητική πυκνότητα του θραύσματος. Από την άλλη πλευρά, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ισοδύναμης ακαμψίας του ολοκληρωμένου συστήματος μηχανή-εργαλειοθήκη-εργαλείο, το οποίο θα ήταν απαραίτητο να υπολογιστεί για κάθε συνδυασμό εργαλείου και εργαλειοθήκης. Τέλος, θα ήταν απαραίτητο να αντισταθμιστούν τα αξιολογημένα σφάλματα στο σύστημα CAM ή απευθείας στο CNC.

Η πρακτική λύση είναι η χρήση εργαλειομηχανών, εργαλειοθηκών και εργαλείων που είναι όσο τον δυνατόν πιο άκαμπτα. Η ακαμψία του εργαλείου εξαρτάται από την λεπτότητα, έτσι ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η διάμετρος του εργαλείου και να ελαχιστοποιηθεί η προεξοχή. Μία άλλη πρακτική λύση είναι να μειωθεί το φορτίο θραύσματος για τις λειτουργίες φινιρίσματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ισχύς κοπής, και συνεπώς η απόκλιση του εργαλείου. Πάλι, αυτή η λύση έχει ένα μειονέκτημα μίας χαμηλότερης παραγωγικότητας, αλλά μπορεί να ελαχιστοποιήσει μεταγενέστερες λειτουργίες φινιρίσματος.

## 6.4 Διαδικασίες Επαλήθευσης

Ο στόχος επαλήθευσης της μηχανής είναι να γνωρίζει και να μετρά όλα τα σφάλματα της, για να κατανοούνται και να τεκμηριώνονται οι δυνατότητες της. Ένας σημαντικός σκοπός των διαδικασιών επαλήθευσης είναι η ανίχνευση συστηματικών σφαλμάτων παρέχοντας την απαραίτητη πληροφορία για την αντιστάθμισή τους. Έτσι, ο ορισμός των τυπικών διαδικασιών έχει υπάρξει παράγοντας κλειδί για την αύξηση της ακρίβειας της μηχανής.

Από γενικής απόψεως, ο έλεγχος της εργαλειομηχανής και οι διαδικασίες επαλήθευσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο τύπους. Πρώτα, οι έλεγχοι γεωμετρικής επαλήθευσης που μετρούν και ρυθμίζουν την εργαλειομηχανή σε συνθήκες λειτουργίας χωρίς φορτίο. Δεύτερον, η κατεργασία των εξαρτημάτων ελέγχου, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν είτε από τον κατασκευαστή της μηχανής ή από τον πελάτη για να επαληθευτεί η απόδοση της μηχανής κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής της λειτουργίας.

### 6.4.1 Πρότυπες Διαδικασίες για την Επαλήθευση της Εργαλειομηχανής

Τα τεστ γεωμετρικής επαλήθευσης ελέγχουν την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα της εργαλειομηχανής, με μία σειρά από απλά τεστ τοποθέτησης, που λειτουργούν γενικά κάτω από συνθήκες χωρίς φορτίο. Τα πρότυπα καθορίζουν τον τρόπο μέτρησης, δίνοντας αποδεκτές ανοχές για τους γραμμικούς και περιστροφικούς άξονες.

Οι διαδικασίες ελέγχου εγκαθιδρύουν μία σειρά από σημεία στόχων, η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα αποκτώνται μετρώντας πολλές προσεγγίσεις σε κάθε σημείο στόχου. Τα αποτελέσματα είναι η ευθύτητα, ο παραλληλισμός και η τετραγωνικότητα των γραμμικών αξόνων, η συγκέντρωση σφαλμάτων των περιστροφικών αξόνων, κλπ. Αυτά τα σφάλματα μετρώνται με υψηλής ακρίβειας συσκευές μέτρησης όπως λείζερ συμβολόμετρα, σκόπευτρα ή βαθμονομημένους κανόνες, ώστε οι μετρήσεις να είναι αρκετά απλό να εκτελέσουν και οι πληροφορίες πολύ ακριβείς.

Πολλοί κατασκευαστές εργαλειομηχανών προσπαθούν να απλοποιήσουν τις προδιαγραφές ακρίβειας και αξιοπιστίας των μηχανών τους, δεδομένης μίας αριθμητική τιμής, αλλά συχνά ο χρήστης την λαμβάνει χωρίς κάποια αναφορά σχετικά με τις συνθήκες ελέγχου. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι μία κακή πρακτική, επειδή η αριθμητική αξία της ακρίβειας μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις διαδικασίες μέτρησης. Για παράδειγμα, η ακρίβεια είναι διαφορετική όταν μετρώνται λιγότερα σημεία ελέγχου, ή αν πραγματοποιούνται μετρήσεις σε μία προς τα εμπρός κατεύθυνση αντί να γίνουν αμφίδρομες μετρήσεις. Η επαναληψιμότητα μπορεί επίσης να ποικίλλει ανάλογα με τον αριθμό των μέτρων σε κάθε σημείο ελέγχου. Το γεγονός ότι οι τιμές ακρίβειας και επαναληψιμότητας μπορεί να διαφέρουν σημαντικά, κάνει πολύ δύσκολη τη σύγκριση της απόδοσης των διαφορετικών εταιριών κατεργασίας.

Για να γενικευτεί ο ίδιος ορισμός της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας, έχουν παρουσιαστεί μερικά διεθνή πρότυπα. Τα πιο σημαντικά είναι τα ISO 230-2, JISB6201-1993 και ASMEB5.54. Αυτά τα πρότυπα εγκαθιδρύουν και τους διαδικαστικούς ελέγχους και τις στατιστικές παραμέτρους που πρόκειται να μετρηθούν, για τον υπολογισμό της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας για τις γραμμικές και τις περιστροφικές κινήσεις της μηχανής. Εν τούτοις, υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των προτύπων, κυρίως στον αριθμό των σημείων στόχου και των μετρήσεων που χρειάζονται για να προσδιοριστεί η τιμή ακρίβειας της μηχανής.

Το ISO 230-2 είναι πιθανών το πιο αποδεκτό πρότυπο στον κόσμο, συμπεριλαμβάνοντας μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο έλεγχος σύμφωνα με το πρότυπο ISO 230-2 έχει τις παρακάτω βάσεις:

Ομοιόμορφη θερμοκρασία: Όλοι οι έλεγχοι πρέπει να εκτελούνται σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον των 20°C. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 6.2.5, μπορεί να εισάγουν σφάλματα θερμοικής διαστολής, τα οποία αποφεύγονται χρησιμοποιώντας μία θερμοκρασία αναφοράς για όλους τους ελέγχους.

Κύκλος προθέρμανσης: Όλοι οι έλεγχοι συμπεριλαμβάνουν έναν κύκλο προθέρμανσης που προσομοιώνει τις συνθήκες της μηχανής. Άλλα πρότυπα ή διαδικασίες δεν συμπεριλαμβάνουν κύκλο προθέρμανσης, έτσι τα σφάλματα που προκλήθηκαν από τις πηγές θέρμανσης της μηχανής δεν μπορούν να ανιχνευτούν.

Μονής και διπλής κατεύθυνσης προσεγγίσεις: Όλοι οι έλεγχοι συμπεριλαμβάνουν προσεγγίσεις μονής και διπλής κατεύθυνσης στα σημεία στόχους. Η ακρίβεια των προσεγγίσεων μονής κατεύθυνσης φαίνεται σημαντικά καλύτερη από τα αποτελέσματα διπλής κατεύθυνσης, επειδή μερικά σφάλματα δεν συμπεριλαμβάνονται. Αλλά οι άξονες της μηχανής εργάζονται κατά έναν τρόπο διπλής κατεύθυνσης, έτσι, αυτή είναι η πραγματική κατάσταση και η χρήσιμη τιμή για έναν χρήστη της μηχανής.

Αριθμός σημείων-στόχων: Οι γραμμικοί άξονες απαιτούν τουλάχιστον 5 σημεία στόχους ανά μέτρο, και οι περιστροφικοί άξονες τουλάχιστον 3 ανά 90 βαθμούς.

Αριθμός μετρήσεων ανά σημείο στόχο: Κάθε τεστ απαιτεί τουλάχιστον 5 δοκιμές ανά σημείο στόχο και ανά προσέγγιση της κατεύθυνσης. Συνεπώς, υπάρχουν πολλά μέτρα για κάθε σημείο στόχο, τα οποία επιτρέπουν τον στατιστικό υπολογισμό των σφαλμάτων ζώνης. Το σφάλμα ζώνης που χρησιμοποιείται στο ISO 230-2 είναι  $\pm 2$  φορές η τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

Η απόσταση μεταξύ των σημείων στόχων πρέπει να είναι διαφορετική για να επιτευχθούν μη-ομοιόμορφες τοποθεσίες. Το σφάλμα τοποθέτησης για ένα σημείο στόχου  $i$  και έναν έλεγχο  $j$  προσδιορίζεται ως  $x_{ij}$ . Το πρότυπο διαχωρίζεται μεταξύ των προσεγγίσεων μονής κατεύθυνσης, σε θετικές και αρνητικές κατευθύνσεις προσδιορίζοντας τα  $x_{ij}\uparrow$  και  $x_{ij}\downarrow$ , για κάθε προσέγγιση. Αν επιλέγονται  $m$  σημεία στόχου και διεξάγονται  $n$  έλεγχοι για κάθε σημείο στόχου, η μέση τιμή των σφαλμάτων τοποθέτησης υπολογίζεται ως:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \text{ and } \bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (6.6)$$

Η απόκλιση διπλής κατεύθυνσης υπολογίζεται ως η μέση τιμή μεταξύ των σφαλμάτων τοποθέτησης μονής κατεύθυνσης:

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (6.7)$$

Το σφάλμα λόγω της αναστροφής της κίνησης μεταξύ της θετικής και αρνητικής προσέγγισης μετρίεται ως:

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (6.8)$$

Από την άλλη πλευρά, οι πρότυπες αποκλίσεις για κάθε σημείο στόχου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$s_i \uparrow = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2 \text{ and } s_i \downarrow = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2 \quad (6.9)$$

Το ISO 230-2 χρησιμοποιεί μία ζώνη σφάλματος  $\pm 2$  φορές την τυπική απόκλιση, έτσι ώστε η επαναληψιμότητα για έναν έλεγχο μονής κατεύθυνσης για κάθε σημείο στόχου είναι  $R_i \uparrow = 4s_i \uparrow$  και  $R_i \downarrow = 4s_i \downarrow$ . Η επαναληψιμότητα για την προσέγγιση διπλής κατεύθυνσης είναι ελαφρώς πιο περίπλοκη να υπολογιστεί:

$$R_i = \max(2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow) \quad (6.10)$$

Έτσι, η επαναληψιμότητα για τον άξονα της εργαλειομηχανής, R, υπολογίζεται ως η μέγιστη επαναληψιμότητα για κάθε σημείο στόχου:

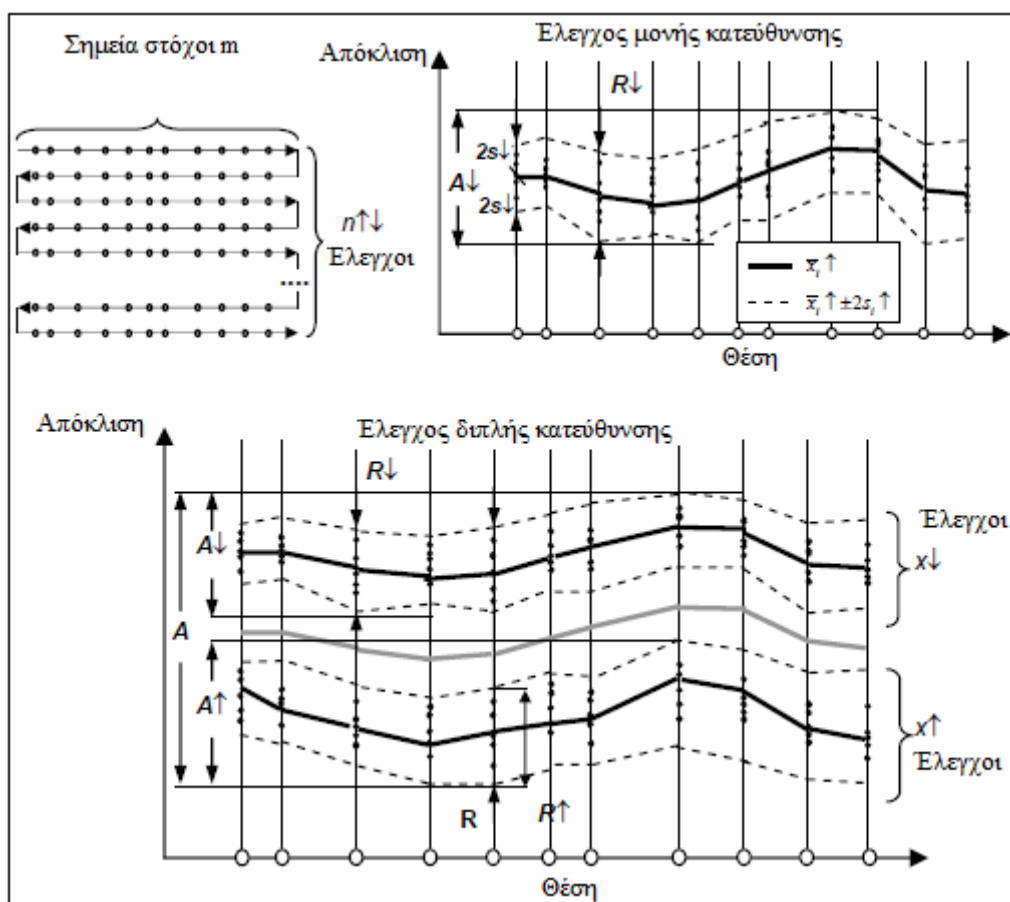
$$\begin{aligned} R \uparrow &= \max(R_i \uparrow) \\ R \downarrow &= \max(R_i \downarrow) \\ R &= \max(R_i) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Η ακρίβεια του άξονα εργαλειομηχανής είναι καθορισμένη επίσης με μία ζώνη σφάλματος  $2\sigma$  και είναι καθορισμένη από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} A \uparrow &= \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow) \\ A \downarrow &= \max(\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow) \\ A &= \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow) \end{aligned} \quad (6.12)$$

Το σχήμα 6.25 αναπαριστά την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα για ελέγχους μονής και διπλής κατεύθυνσης, όπως προσδιορίζονται από το πρότυπο ISO 230-2. Τα σημεία στόχου διαχωρίζονται μη-ομοιόμορφα και οι μετρήσεις γίνονται σε θετικές και αρνητικές κατευθύνσεις. Μόλις κάθε σφάλμα τοποθέτησης έχει υπολογιστεί, αξιολογείται η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα για κάθε έλεγχο μονής κατεύθυνσης. Το σφάλμα ζώνης υπολογίζεται με το κριτήριο  $2\sigma$ . Τέλος, συνδυάζοντας το αποτέλεσμα των δύο κατευθύνσεων, υπολογίζεται η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα του άξονα της εργαλειομηχανής.

Το Ιαπωνικό Βιομηχανικό Πρότυπο JISB6201 παρουσιάζει έναν μη-στατιστικό υπολογισμό της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας. Οι έλεγχοι σε κάθε άξονα βασίζονται σε τρία σημεία ελέγχου κατά μήκος του πλήρους άξονα, δύο τελικά σημεία και ένα μέσο σημείο της διαδρομής του άξονα. Η προσεγγιστική κίνηση είναι μόνο μίας κατεύθυνσης και η πραγματική θέση του άξονα μετρώνται χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο λείζερ και συγκρινόμενα με την ένδειξη θέσης του CNC. Το σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ δύο τιμών. Η ακρίβεια μετράται με το μέγιστο από τα τρία σφάλματα τοποθέτησης, υπολογιζόμενο ως  $\pm 1/2$  του σφάλματος τοποθέτησης. Με τον ίδιο τρόπο, η τιμή της επαναληψιμότητας μετράται με μία σειρά από ελέγχους για κάθε σημείο στόχου. Πρέπει να γίνουν τουλάχιστον επτά προσεγγίσεις για κάθε σημείο ελέγχου. Θεωρώντας πως υπάρχουν μόνο τρία σημεία ελέγχου, η επαναληψιμότητα υπολογίζεται με 21 μετρήσεις και προσδιορίζεται με  $\pm 1/2$  της μέγιστης τιμής επαναληψιμότητας που μετράται σε ένα από τα τρία σημεία στόχου.



Σχήμα 6. 25 – Προσδιορισμός της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας ακολουθώντας την διαδικασία του προτύπου ISO 230-2 για ελέγχους μονής και διπλής κατεύθυνσης.

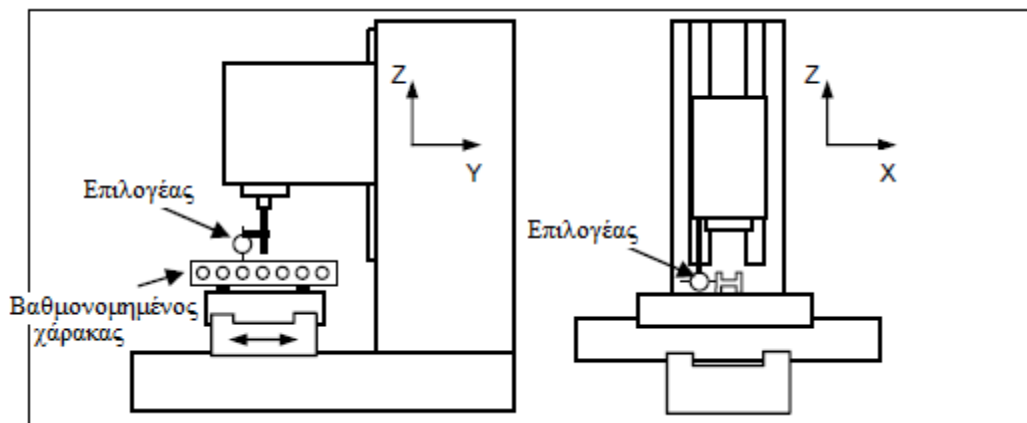
Η εκτίμηση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας με το πρότυπο JISB6201 οδηγεί σε χαμηλότερες αριθμητικές τιμές από ότι το ISO 230-2, λόγω του χαμηλού αριθμού των σημείων στόχων και του μη-στατιστικού υπολογισμού δεδομένων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ISO είναι πολύ πιο χρήσιμα υπό τη μορφή εργαλειομηχανών πραγματικής ακρίβειας, επειδή τα λειτουργικά σφάλματα των εργαλειομηχανών χρησιμοποιούνται για να ακολουθήσει στατιστική κατανομή.

Το ISO 230 είναι ένας γενικός οδηγός για πολλά πρότυπα ISO που προσδιορίζουν πιο συγκεκριμένους ελέγχους για κάθε τύπο εργαλειομηχανής. Έτσι, το ISO 230-1 περιγράφει τις γενικές έννοιες της ευθύτητας, της στρογγυλότητας, και της ορθοκανονικότητας, προσδιορίζοντας τις βασικές μεθόδους μέτρησης. Το ISO 230-2, όπως περιγράφηκε πριν, προσδιορίζει την μέτρηση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας. Υπάρχουν διαφορετικά πρότυπα ISO για τους τόνους CNC (ISO 13041), για τα κέντρα κατεργασίας (ISO 10791), τις μηχανές φραιζαρίσματος τύπου γέφυρας (ISO 8636), τις μηχανές καλωδίου EDM (ISO 14137), των κάθετων μηχανών λείανσης (ISO 1985) και πολλών άλλων τύπων μηχανών. Για παράδειγμα, το σχήμα 6.26 δείχνει την μέτρηση ευθύτητας του άξονα Y για ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας, ακολουθώντας τις οδηγίες ISO 10791-2. Η ευθύτητα μετράται σε δύο κάθετα επίπεδα (XY και XZ) για να αποκτήσουν την χωρική ευθύτητα. Στην περίπτωση αυτή, οι έλεγχοι διεξάγονται με έναν βαθμονομημένο χάρακα και έναν επιλογέα.

Οι προτεινόμενοι έλεγχοι τοποθέτησης μετρούν ξεχωριστά τους άξονες της μηχανής, προσδιορίζονται μόνο μερικά αποτελέσματα για την παραμόρφωση των αξόνων, όπως την ορθοκανονικότητα ή την συγκέντρωση του περιστροφικού άξονα, αλλά δεν υπάρχει πληροφορία όσον αφορά στις δυνατότητες περιγράμματος της μηχανής. Για το λόγο αυτό,

επιπρόσθετα με τα πρότυπα, μία δεύτερη ομάδα ελέγχου συμπεριλαμβάνει μερικές διαδικασίες «ημί-προτύπων» για την μέτρηση των σφαλμάτων παρεμβολής περιγράμματος. Ένα από τα πιο επεκταμένα τεστ για τον έλεγχο παρεμβολής στους άξονες είναι ο έλεγχος σφαίρας-ράβδου (Ball-bar). Αναπτύχθηκε αρχικά στα μέσα του 1980 από τον Jim Bryan για τα εργαστήρια Lawrence Livermore, ως μέσο ελέγχου των περιστροφικών τόνων διαμαντιού υψηλής ακρίβειας. Από τα τέλη του 1980, οι επιτροπές ASME B5 και ISO 230 τον συμπεριλαμβάνουν στα προτεινόμενα όργανα για την εκτέλεση των ελέγχων επαλήθευσης. Η συσκευή σφαίρας-ράβδου είναι στην ουσία ένα αισθητήριο μετατόπισης, που κρατιέται μεταξύ δύο σφαιρών ακριβείας. Οι σφαίρες τοποθετούνται πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής και στην «μύτη» της ατράκτου. Μόλις εγκατασταθεί η σφαίρα-ράβδος, το τυπικό τεστ είναι να εκτελεστεί μία κυκλική παρεμβολή της τράπεζας της εργαλειομηχανής, με αναφορά στην άτρακτο της εργαλειομηχανής. Θεωρητικά, αν εκτελεστεί μία τέλεια κυκλική κίνηση, η απόσταση μεταξύ των δύο σφαιρών παραμένει σταθερή και ο αισθητήρας δεν ανιχνεύει κάποια μετατόπιση. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές αποκλίσεις από την τροχιά λόγω της έλλειψης ευθύτητας και ορθοκανονικότητας μεταξύ των δύο παραμορφωμένων αξόνων, της αντίδρασης των σφαιρικών κοχλιών, των σφαλμάτων παρεμβολής του CNC, των επιδράσεων κόλλησης-ολίσθησης πάνω στους οδηγούς, κλπ.

Η αισθητήρια βέργα ανιχνεύει την σχετική μεταβολή των σφαιρών οι οποίες αναπαριστώνται από ένα εύκολο στην κατανόηση πολικό σχήδιο. Επιπλέον, ένα κοινό τεστ σφαίρας-ράβδου παίρνει περίπου 15 λεπτά για να ελεγχθεί η παρεμβολή μεταξύ των δύο αξόνων, όπου πολλές πηγές σφάλματος μπορούν να ανιχνευθούν.



Σχήμα 6. 26 – Έλεγχος ευθύτητας για τον Y άξονα ενός κάθετου κέντρου κατεργασίας, ακολουθώντας το πρότυπο ISO 10791-2.

#### 6.4.2 Εξαρτήματα Ελέγχου

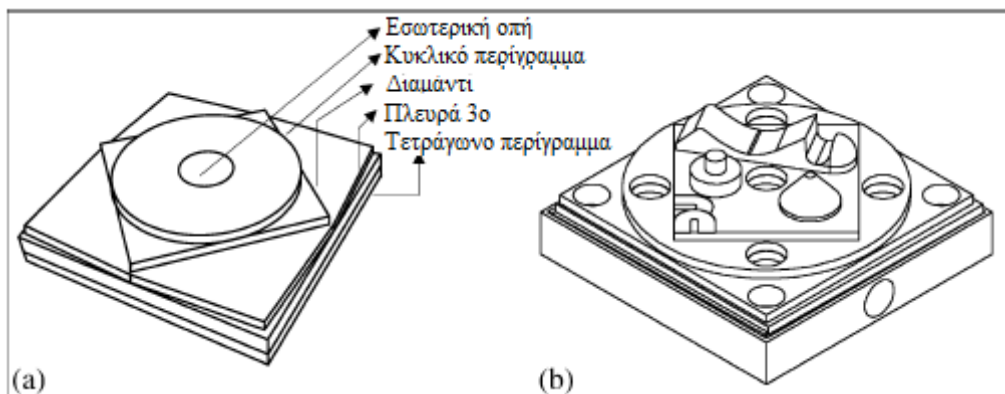
Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, τα πρότυπα ISO, JIS ή ASME προσδιορίζουν τους ελέγχους χωρίς φορτίο για να μετρήσουν το σφάλμα τοποθέτησης των μηχανών. Αλλά αυτοί οι έλεγχοι απέχουν πολύ από τις πραγματικές συνθήκες κατεργασίας. Υπάρχουν κάποιες λειτουργίες, όπως διάτρηση, οι οποίες είναι παρόμοιες με μία παρεμβολή σημείου-προς-σημείο (point-to-point), αλλά γενικά, η λειτουργία κατεργασίας εμπλέκει δύο ή περισσότερες παρεμβολές αξόνων. Μερικά τεστ, όπως τα τεστ κυκλικότητας, μετρούν τα σφάλματα περιγράμματος σε συνθήκες χωρίς φορτίο. Η πληροφορία αυτών των ελέγχων συμπεριλαμβάνει τα σφάλματα παραμόρφωσης μεταξύ δύο ή περισσότερων αξόνων.

Η πληροφορία αυτή είναι πολύτιμη κυρίως για τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών, επειδή αποτελεί σχετικά δεδομένα αντιστάθμισης των δυναμικών των αξόνων της μηχανής. Ωστόσο, οι χρήστες εργαλειομηχανών χρειάζονται την πραγματική απόδοση κατά τη διάρκεια λειτουργιών κατεργασίας. Αυτό γιατί η τελευταία ομάδα ελέγχου της επαλήθευσης συμπεριλαμβάνει «εξαρτήματα ελέγχου» για να ελέγχει την συμπεριφορά των κέντρων

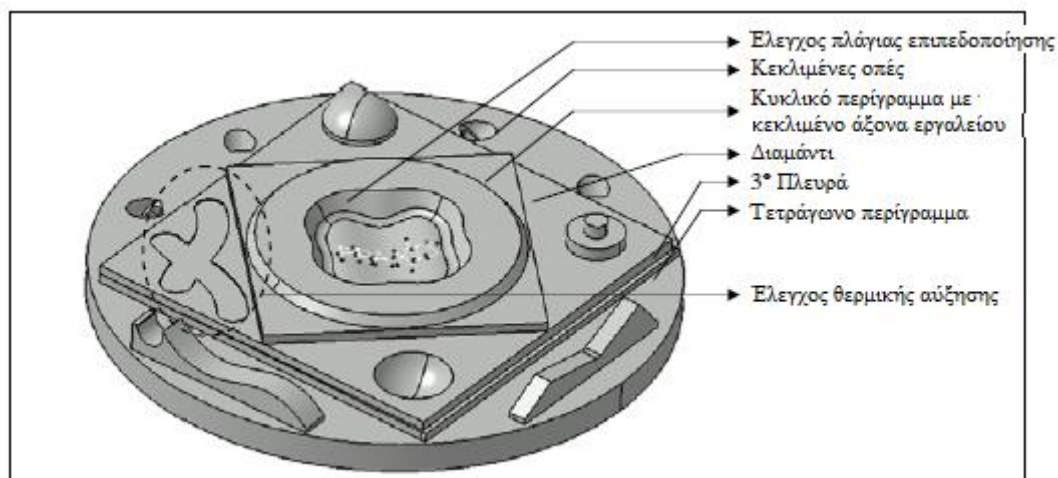
φραιζαρίσματος κατά τη διάρκεια πραγματικών συνθηκών. Η επιπεδοποίηση υποδηλώνει την παρεμβολή των τριών από τους πέντε άξονες.

Το πιο γνωστό εξάρτημα ελέγχου είναι το NAS 979, το οποίο αναπτύχθηκε το 1969 και αποτελεί την βάση του επεξεργαζόμενου κομματιού που περιγράφεται από το ISO 10791-7:1998 (Σχήμα 6.27a). Η γεωμετρία αυτού του εξαρτήματος είναι ένας συνδυασμός ενός κύκλου, ενός τετραγώνου, ενός περιγράμματος σχήματος διαμαντιού και μίας γωνίας 3° τετραπλευρικής όψης. Το πρότυπο προσδιορίζει δύο διαφορετικά μεγέθη για το εξάρτημα ελέγχου: μήκους 320mm και 160mm του εξωτερικού τετραγώνου. Για να αποκτηθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα, το πρότυπο προτείνει την κατεργασία του εξαρτήματος ελέγχου σε ένα μεσαίο σημείο των αξόνων X, Y, Z της μηχανής. Επιπλέον, η πρώτη ύλη και οι συνθήκες ελέγχου πρέπει να διευθετηθούν μεταξύ του κατασκευαστή της εργαλειομηχανής και του τελικού χρήστη, αλλά το πιο κοινό υλικό είναι μία μίξη αλουμινίου, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα τροφοδοσίας με την ελάχιστη φθορά του εργαλείου. Μόλις κατεργαστεί το εξάρτημα ελέγχου, το πρότυπο προσδιορίζει μία σειρά από χαρακτηριστικές μετρήσεις όπως είναι η ορθοκανονικότητα, ο παραλληλισμός, η κυκλικότητα, κλπ. Οι μετρήσεις πρέπει να διεξάγονται σε μία συντονισμένη μηχανή μέτρησης.

Ωστόσο, ο έλεγχος ISO 10791-7 δεν συμπεριλαμβάνει περίπλοκες επιφάνειες, ενώ πολλοί χρήστες απαιτούν υψηλή ακρίβεια στις 3D εφαρμογές περιγράμματος. Αυτό γιατί διαφορετικά εξάρτημα ελέγχου έχουν σχεδιαστεί τα τελευταία χρόνια, όπως τα λεγόμενα εξάρτημα Mercedes ή NCG.



Σχήμα 6. 27 – a) Γεωμετρία του εξαρτήματος ελέγχου ISO 10791. b) Γεωμετρία του εξαρτήματος ελέγχου NC-Gesellschaft.



Σχήμα 6. 28 – Νέο εξάρτημα ελέγχου σχεδιασμένο από τον Fatronik και το Πανεπιστήμιο BasqueCountry για τα κέντρα κατεργασίας φραιζαρίσματος πέντε αξόνων.

Αυτά τα εξαρτήματα ελέγχου είναι ευρέως διαδεδομένα λόγω της ζήτησης των πελατών και μπορούν να βρεθούν σε πολλά καταστήματα παρουσιάζοντας τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής, αλλά κανένα από αυτά δεν συμπεριλαμβάνονται ακόμη στους κανονισμούς του προτύπου ISO.

Τα περισσότερα από τα σχεδιασμένα εξαρτήματα ελέγχου είναι για κέντρα κατεργασίας φραιζαρίσματος τριών αξόνων, ωστόσο, η ζήτηση για κέντρα φραιζαρίσματος πέντε αξόνων αυξάνεται ραγδαία και υπάρχει έλλειψη συγκεκριμένων εξαρτημάτων και τεστ επαλήθευσης για αυτού του είδους τις μηχανές. Στην πραγματικότητα, το ISO 230 προσδιορίζει μερικές γενικές οδηγίες για τον έλεγχο ακρίβειας του περιστροφικού άξονα τοποθέτησης, αλλά δεν υπάρχουν τεστ που να αξιολογούν το σφάλμα παρεμβολής μεταξύ δύο περιστροφικών αξόνων ή τον συνδυασμό γραμμικών-περιστροφικών αξόνων. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί κάποια ερευνητικά έργα για να ολοκληρώσουν τα τρέχοντα πρότυπα και συμπεριλαμβάνουν διαδικασίες ειδικών ελέγχων πολλαπλών αξόνων. Για παράδειγμα, το σχήμα 6.28 δείχνει το σχεδιασμό ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος ελέγχου για κέντρα φραιζαρίσματος πέντε αξόνων.

Σε αυτό το σημείο, μερικά χαρακτηριστικά βοηθούν στην αξιολόγηση της τοποθέτησης των περιστροφικών αξόνων, ενώ άλλα προσανατολίζονται στην αποτίμηση της ακρίβειας των λειτουργιών φραιζαρίσματος πολλαπλών αξόνων. Ο σχεδιασμός νέων εξαρτημάτων ελέγχου και μεθόδων ελέγχου και, το πιο σημαντικό, η τυποποίηση και γενίκευση, αποτελούν τον μοναδικό δρόμο αξιολόγησης της απόδοσης της εργαλειομηχανής και της σύγκρισης των εργαλειομηχανών.

## **6.5 Ένας Σύντομος Επίλογος**

Έχουν παρουσιαστεί οι βασικές αρχές και μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό της ακρίβειας και την συναρμολόγηση των εργαλειομηχανών, μαζί με τις διαδικασίες επαλήθευσης για την εκτίμηση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας μίας μηχανής. Η ακρίβεια είναι εύκολο να προσδιοριστεί αλλά δύσκολο να καθοριστεί αριθμητικά, λαμβάνοντας υπόψη πως η «πραγματική τιμή» μίας διάστασης δεν είναι ποτέ γνωστή. Το πρότυπο ISO 230 προσδιορίζει τις βασικές έννοιες, όταν γίνονται προσπάθειες μέτρησης της ακρίβειας.

Η ιστορία των εργαλειομηχανών είναι η ιστορία της ακρίβειας των εργαλειομηχανών. Οι πιο ακριβείς δίνουν τώρα σφάλματα κάτω από ένα micron. Αλλά σίγουρα αυτή η τιμή θα βελτιωθεί στα επόμενα είκοσι χρόνια. Στο κεφάλαιο του βιβλίου αυτού, που αφιερώθηκε στις μηχανές μικρό-φραιζαρίσματος, έχουν βρεθεί νέες έννοιες και εφαρμογές των εκτεθειμένων.



## **7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Εξελίξεις στους Τόρνους και στα Κέντρα Φραιζαρίσματος**

### **Περίληψη Κεφαλαίου:**

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις τελευταίες εξελίξεις στους τόρνους και στις σχετικές τεχνολογίες περιστροφής, και στην βιομηχανία. Θα περιγραφεί η εξέλιξη των βιομηχανικών κατασκευαστικών τάσεων και η επιρροή τους στην διαμόρφωση των τόρνων και των κέντρων περιστροφής, όπως και οι τεχνολογικές εξελίξεις. Αυτές οι τάσεις θα συνδεθούν επίσης με τους βασικούς τομείς εφαρμογών, τις ιδιαιτερότητες τους, τις συγκεκριμένες μηχανές και τις τεχνολογίες που αφιερώθηκαν σε αυτές. Λόγος θα γίνει επίσης και για τις πιο σημαντικές πρόσφατες εξελίξεις στα στοιχεία της επεξεργασίας και της μηχανής.

### **7.1 Εισαγωγή**

Ο τόρνος είναι ιστορικά η βασική μηχανή για κάθε κατασκευαστή κυλινδρικών εξαρτημάτων, από τα πιο χαμηλά επίπεδα μικρών μαγαζιών έως τις υψηλές γραμμές παραγωγής, όπως και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, στα σχολεία, τα ινστιτούτα και τα πανεπιστήμια.

Από τις πιο απλές χειροκίνητης λειτουργίας μηχανές, που φτιάχτηκαν από ένα επεξεργαζόμενο κομμάτι κεφαλής και διπλό φορτίο, κρατώντας ένα μονό εργαλείο, η εξέλιξη μπορεί να θεωρηθεί ως αυξητική με την πάροδο των ετών, μέσα από την εισαγωγή των ηλεκτρονικών, αριθμητικών ελέγχων (NC) και των μηχανικών στοιχείων με βελτιωμένη απόδοση υπό τη μορφή ακρίβειας, ταχύτητας, ισχύος και παραγωγικότητας, τοποθετημένα μέσα σε ένα κέλυφος.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία τόρνων έχει κινηθεί περισσότερο από ένα βήμα μπροστά, υπό την ενθάρρυνση των απαιτήσεων βιομηχανικής παραγωγής από τους βασικούς κατασκευαστικούς τομείς, πηγαίνοντας από τους απλούς τόρνους, στα σημερινά πολύπλοκα κέντρα που είναι ικανά να κατασκευάσουν ολοκληρωτικά ένα επεξεργαζόμενο κομμάτι σε μία εγκατάσταση, σε σειρά μέχρι το τελευταίο εξάρτημα.

Για τον σκοπό αυτό, τα τρέχοντα κέντρα φραιζαρίσματος αναβαθμίζουν τις διαδικασίες φραιζαρίσματος, διάτρησης, ακόμη και μηχανικές και θερμικές επεξεργασίες επιφάνειας, όπως σκλήρυνση με λείζερ, ή γυάλισμα με ρολό. Επιπλέον, αυτές οι πολύπλοκες διαδικασίες υποστηρίζονται από την εφαρμογή πολύπλοκων, πολλαπλού σκοπού και πολλαπλών διαδικασιών εργαλείων κοπής και υποβοηθούμενων διαδικασιών μέσω τεχνολογιών υψηλού επιπέδου, όπως λείζερ και υπερηχητικοί κραδασμοί, και υψηλού βαθμού νοημοσύνη και αυτοκίνηση που αναπτύχθηκε και αναβαθμίστηκε σε NC τελευταίας γενιάς.

Από την πλευρά διαμόρφωσης της μηχανής, οι τόρνοι πολλαπλού σκοπού ή πολλαπλών εργασιών ή τα κέντρα φραιζαρίσματος εξοπλίζονται με πολλαπλές κεφαλές επεξεργαζόμενων κομματιών, πυργίσκους, κεφαλές φραιζαρίσματος με έναν ή δύο άξονες περιστροφής, επιπρόσθετες συσκευές λείανσης και υψηλής ταχύτητας, μικρού χρόνου συστήματα φόρτισης επεξεργαζόμενου κομματιού.

Ερχόμενα σε αυτό το επίπεδο πολυπλοκότητας από την οδήγηση των βιομηχανικών τομέων όπως η αυτοκίνηση, η χερσαία μεταφορά και η αεροναυτική, τα κέντρα

φραιζαρίσματος έχουν αποκτήσει έναν υψηλό βαθμό ευελιξίας και προσαρμοστικότητας, που γίνονται με τη σειρά τους απαραίτητα στοιχεία για την βιομηχανία κεφαλαιουχικών αγαθών και για τους γενικούς σκοπούς των κατασκευαστών.

## 7.2 Διαμόρφωση Μηχανής

Αυτή η ενότητα θα περιγράψει τις γενικές τάσεις στην αρχιτεκτονική και διαμόρφωση των μηχανών, συνδέοντάς τες με τον βασικό σκοπό τους, και τις απαιτήσεις στόχων του τομέα.

Το κεφάλαιο θα αποφύγει τις «συμβατικές» μηχανές γενικού σκοπού, για να εστιάσει στις πιο νέες, τις πιο βελτιωμένες διαφοροποιημένες εξελίξεις, στις νέες οριζόντιες διαμορφώσεις υψηλής παραγωγής, στους οριζόντιους τórνους πολλαπλών εργασιών, στις κάθετες μηχανές υψηλής παραγωγής, στις κάθετες μηχανές μεγάλου μεγέθους, στα κάθετα κέντρα φραιζαρίσματος, και επίσης στις μηχανές πολλαπλής επεξεργασίας συμπεριλαμβάνοντας μη-συμβατικές διαδικασίες ή ειδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές.

### 7.2.1 Τórνοι Υψηλής Παραγωγής

Η πιο αντιπροσωπευτική αγορά για αυτόν τον τύπο μηχανών, είναι σήμερα η βιομηχανία αυτοκίνησης. Η βιομηχανία αυτοκίνησης έχει γίνει το παράδειγμα της υψηλής παραγωγικότητας στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, οδηγώντας του προμηθευτές της, αλλά και τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών, στην ανάπτυξη αξιόπιστων προϊόντων ακρίβειας και υψηλής παραγωγής. Στην περίπτωση των κάθετων και οριζόντιων τórνων, υπάρχουν πέντε βασικά χαρακτηριστικά που μοιράζονται από όλες αυτές τις μηχανές.

Έχουν συμπαγείς μηχανές, για την ελάχιστη απασχόληση του επιδαπέδιου χώρου. Είναι εξοπλισμένοι με μία ή δύο «κουκουβάγιες» και δύο, τρεις ή τέσσερις πυργίσκους για τον ελάχιστο χρόνο επεξεργασίας, και για την μέγιστη παραγωγικότητα.

Μέγιστη σχετικότητα δίνεται στην χειραγώγηση, την φόρτωση και την εκφόρτωση των επεξεργαζόμενων κομματιών, εφαρμόζοντας μία τεράστια ποικιλία λύσεων, από τους εξωτερικούς μεταφορείς που αναβαθμίζονται με την μηχανή, έως τις καθαρά εσωτερικές λύσεις.

Οι κάθετες μηχανές έχουν υπάρξει πρωτοπόροι στη λύση του αναβαθμισμένου μηχανισμού ανύψωσης των επεξεργαζόμενων κομματιών, ειδικά με την ανάπτυξη των μηχανών με ανώτερες «κουκουβάγιες».



Σχήμα 7. 1 – Λύση μηχανισμού ανύψωσης σε έναν κάθετο τórνο, από Emag.

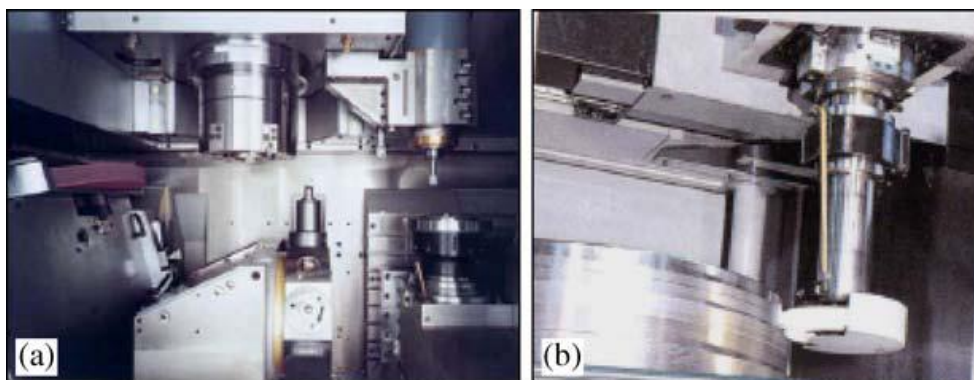
Αυτοί οι τórνοι αναπτύχθηκαν ειδικά για τον σκοπό αυτό, συν το πλεονέκτημα της ευκολότερης εκκένωσης των θραυσμάτων. Οι λύσεις για τα εξαρτήματα όπως δίσκους φρένων ή παρόμοιων εξαρτημάτων, αναπτύχθηκαν το 1990 από πολλούς κορυφαίους κατασκευαστές όπως τους Emag (Σχήμα 7.1), Weisser και Hesapp, και επεκτάθηκαν αργότερα στους υπόλοιπους κατασκευαστές.

Πρόσφατα, μερικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί στους κάθετους τórνους για μακριά και λεπτά εξαρτήματα, όπως στελέχη, τα οποία ήταν τυπικά οριζόντιες εφαρμογές. Στους οριζόντιους τórνους η λύση φόρτισης εκτελούνταν από εξωτερικά στοιχεία. Τελευταία, έχουν αναπτυχθεί μερικές αξιοσημείωτες αναβαθμισμένες λύσεις. Μεταξύ τους, οι πατενταρισμένες λύσεις της Weisser (Σχήμα 7.2), που εφαρμόζει την συνηθισμένη έννοια pickup των κάθετα ανεστραμμένων τórνων, σε οριζόντια διαμόρφωση, και της Index, που εφαρμόζει την λειτουργία pickup μέσω πυργίσκων εργαλείων, που κρατούν ειδικά τσοκ για το κράτημα του επεξεργαζόμενου κομματιού. Έχουν μία υψηλή ταχύτητα των «κουκουβαγιών» και υψηλά δυναμικά στους άξονες μετατόπισης για ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης. Για τον σκοπό αυτό, οι μηχανές εξοπλίζονται με ήλεκτρο-ατράκτους υψηλής ταχύτητας στις κουκουβάγιες, οδηγούς κίνησης επανακυκλοφορίας γραμμικών σφαιρών ή ράβδων στους μετατοπισμένους άξονες και, σε μερικές περιπτώσεις όπως στην Gildemeister, γραμμικούς κινητήρες για μετατόπιση του άξονα.

Βασικά, εκτελούν μόνο λειτουργίες φραιζαρίσματος, έτσι, με επιλεκτικές απλές λειτουργίες όπως διάτρηση ή βασική επιπεδοποίηση, εκτελούνται από μηχανοκίνητα εργαλεία, εγκατεστημένα στον πυργίσκο. Παρ' όλα αυτά, μία από τις τελευταίες εξελίξεις υπήρξε η συμπερίληψη των κεφαλών λείανσης για να ολοκληρωθεί η διαδικασία κατεργασίας. Αυτή η τάση εφαρμόστηκε στις κάθετες και στις οριζόντιες μηχανές, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7. 2 – Λύση μηχανικής ανύψωσης (pickup), από Weisser.



Σχήμα 7. 3 – Τροχοί λείανσης συμπεριλαμβανόμενοι στους τórνους. α) Κάθετοι από Index β) Οριζόντιοι από Mazak.

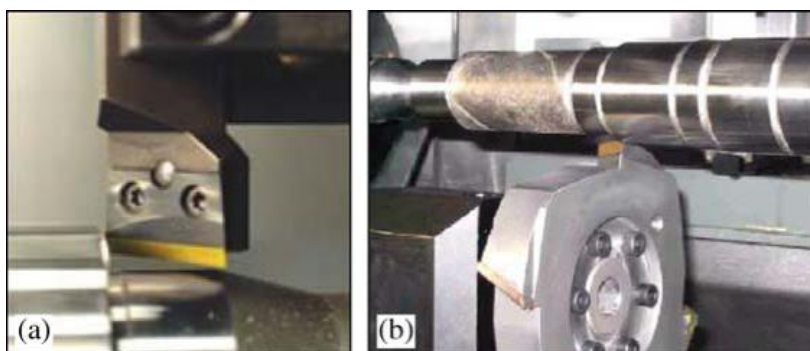
### 7.2.1.1 Διαδικασίες Υψηλής Παραγωγής: Σκληρή Τόρνευση - Λείανσης

Το υψηλής ποιότητας φινίρισμα των εξαρτημάτων είναι συνήθως προαπαιτούμενο στις γραμμές υψηλής παραγωγής, και συγκεκριμένα στην υψηλή γραμμή παραγωγής αυτοκίνησης. Επιπλέον, τα σκληρυμένα εξαρτήματα χάλυβα είναι πολύ κοινά στην βιομηχανία της αυτοκίνησης, ειδικά στα εξαρτήματα μηχανής, τα οποία υπόκεινται στις κινήσεις υψηλής ακριβείας, και στα υψηλά μηχανικά φορτία και στα φορτία επαφής.

Η κατεργασία υψηλής παραγωγής αυτών των εξαρτημάτων προκάλεσε συζήτηση μεταξύ της λείανσης και της τόρνευσης σαν λειτουργίες φινιρίσματος, ειδικά μετά από την ανάπτυξη της τεχνολογίας «σκληρής τόρνευσης». Ουσιαστικά, η σκληρή τόρνευση είναι η τόρνευση σκληρυμένου χάλυβα χρησιμοποιώντας CBN (αζωτούχο βόριο κυβικής κρυσταλλικής δομής) ή κεραμικά εργαλεία στους υψηλής ακαμψίας και ακρίβειας τόνους.

Οι κατασκευαστές τόνων έχουν υπερασπιστεί την λύση τους, που υποστηρίζεται από την υψηλότερη ευελιξία και την οικονομικότερη λύση, ενώ οι κατασκευαστές μηχανών λείανσης βάσισαν την επιχειρηματολογία τους στην υποτιθέμενη υψηλότερη ακρίβεια, σταθερότητα και παραγωγικότητα της διαδικασίας λείανσης. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της σκληρυμένης τόρνευσης έχει βρεθεί με τα χρόνια ως μη κατάλληλη για εξαρτήματα με απαιτήσεις σφράγισης, λόγω του έλικα που παράγεται στην επιφάνεια από οποιαδήποτε διαδικασία τόρνευσης. Αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε πρόσφατα με την εφαρμογή ειδικών εργαλείων για την ελαχιστοποίηση αυτού του χαρακτηριστικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4.

Και οι κατασκευαστές τόνων και εκείνοι των μηχανών λείανσης, έχουν κατευθύνει την συζήτηση σε μία ενδιάμεση λύση, αναπτύσσοντας μικτές λύσεις τα τελευταία χρόνια, που ενσωματώνουν την «αντίθετη» διαδικασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3. Σήμερα, είναι συνηθισμένο να συνδυάζονται οι διαδικασίες όπως η σκληρή τόρνευση και η λείανση, στην ίδια μηχανή, ανάλογα με τα εξαρτήματα και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που πρόκειται να κατεργαστούν.



Σχήμα 7. 4 – Σκληρή τόρνευση. α) Από Sumitomo. β) Από Weisser.

### 7.2.2 Κέντρα Φραιζαρίσματος: Μηχανές Πολλαπλών Εργασιών

Οι μηχανές πολλαπλών εργασιών έχουν γίνει η πιο σημαντική εξέλιξη των τόνων τα τελευταία δέκα χρόνια, κρατώντας μία προνομιούχα θέση στον κατάλογο πολλών κορυφαίων κατασκευαστών.

Η αφετηρία των κέντρων φραιζαρίσματος ή των μηχανών πολλαπλών εργασιών μπορεί να βρεθεί στην εφαρμογή των επιπρόσθετων μηχανοκίνητων εργαλείων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στους τόνους για πολλά χρόνια. Η τάση της αγοράς προς

την υψηλότερη ευελιξία και την αναδιαμόρφωση των μηχανών έχει διευκολύνει την γρήγορη επεκταμένη ανάπτυξη των λύσεων σε αυτή την γραμμή.

Είναι δύσκολο να οριοθετηθούν ή να μαρκαριστούν τα πεδία εφαρμογών και η διαμόρφωση των μηχανών πολλαπλών εργασιών, αφού σήμερα οι μεταβολές και οι συνδυασμοί των χαρακτηριστικών, οι αναβαθμισμένες συσκευές και οι διαδικασίες είναι σχεδόν άπειρες. Οι ικανότητες φαντασίας και ανάπτυξης των κατασκευαστών των εργαλειομηχανών, έχουν κάνει σχεδόν κάθε συνδυασμό δυνατό, στις κάθετες και οριζόντιες διαμορφώσεις.

Τα πρώτα βήματα στα κέντρα φραιζαρίσματος αποτελούνταν από συμβατικούς τόννους που συμπεριλάμβαναν μία κεφαλή φραιζαρίσματος αντί ενός πυργίσκου, με έναν ή δύο επιπρόσθετους άξονες να εκτελούν παρεμβλλόμενες λειτουργίες φραιζαρίσματος.

Τα κέντρα πολλαπλών εργασιών «τόρνευση-διάτρηση-επιτεδοποίηση», με τους πρότυπους άξονες B, C, X, Y και Z, επιτρέπουν την ολοκληρωμένη κατεργασία των πολύπλοκων και με ακρίβεια επεξεργαζόμενων κομματιών. Ο στόχος της ολοκληρωμένης κατεργασίας και μέτρησης ενός ευρέος φάσματος επεξεργαζόμενων κομματιών με ελάχιστες ρυθμίσεις σε μόνο μία μηχανή έχει επιτευχθεί. Από την παρεμβολή έως πέντε αξόνων, ακόμη και οι επιφάνειες ελεύθερης μορφής μπορούν να κατεργαστούν εύκολα. Για να συνοψίσουμε, οι αξιώσεις για αυτού του τύπου τις μηχανές είναι:

- Η μείωση του χρόνου διαδρομής «floor-to-floor». Ο αριθμός των μηχανών που εμπλέκονται στην διαδικασία κατεργασίας είναι δραστικά μειωμένος. Η σειρά αναμονής μπροστά από τις μηχανές ή η μετακίνηση μεταξύ των ξεχωριστών μηχανών, μειώνονται στο ελάχιστο. Η οργάνωση και ο σχεδιασμός απλοποιείται υπερβολικά. Το κόστος συσσώρευσης των ημι-φινιρισμένων εξαρτημάτων μειώνεται.
- Αυξημένη ευελιξία. Στις μηχανές πολλαπλών εργασιών οι χρόνοι εγκατάστασης είναι συνήθως χαμηλοί όταν αλλάζουν σε κάποιον άλλο σφινκτήρα ή εξάρτημα. Τα ακριβά και πολύπλοκα εξαρτήματα δεν είναι απαραίτητα. Λόγω των τεχνολογικών ικανοτήτων, αυτές οι μηχανές προσφέρουν πολλές δημιουργικές δυνατότητες στο τμήμα σχεδιασμού του πελάτη.
- Αύξηση στην χρήση. Η μείωση του χρόνου εγκατάστασης, ισοδυναμεί με μία σημαντική αύξηση στις ώρες παραγωγής. Η ολοκληρωμένη κατεργασία σημαίνει πως οι διαδικασίες κατεργασίας δεν διακόπτονται από χειροκίνητες παρεμβάσεις, οι οποίες περιορίζουν τις διακοπές από διαλείμματα.
- Μείωση του ανθρώπινου δυναμικού. Η μείωση των μηχανών που εμπλέκονται στην διαδικασία παραγωγής, μειώνει αυτόματα τις απαιτήσεις προσωπικού για λειτουργία, έλεγχο, μεταφορά κομματιών εξαρτημάτων και προγραμματισμού της εργασίας. Η ολοκληρωμένη διαδικασία κατεργασίας συνδυάζει προηγούμενα ξεχωριστές διαδικασίες σε μόνο μία λειτουργία, διευκολύνοντας τη λειτουργία μίας πολλαπλής μηχανής.
- Αύξηση στην ποιότητα. Λόγω της έλλειψης των πολλαπλών σφινκτέρων, όπως στην διασπασμένη κατεργασία, όχι μόνο μειώνονται οι δαπάνες των εξαρτημάτων αλλά επίσης αποφεύγονται τα σφάλματα σύσφιξης και προσαρμογής.

Αυτές οι μηχανές έχουν αναπτυχθεί σε μεγαλύτερα μεγέθη, ικανότητες ισχύος και την ενσωμάτωση διαφορετικών λύσεων και διαδικασιών. Μερικά από τα πιο πρόσφατα και πιο σημαντικά παραδείγματα θα παρουσιαστούν παρακάτω.

### 7.2.2.1 Μηχανές Μεγάλου Μεγέθους για Διαδικασίες Βαρέως Τύπου

Αυτές οι μηχανές, όπως η M150 της WFL (Σχήμα 7.5), μπορούν να κρατήσουν επεξεργαζόμενα κομμάτια μήκους έως 6 μέτρα, με διάμετρο 1 μέτρο, ικανά να εκτελούν βαριές λειτουργίες, ώστε η υψηλή του ροπή, και οι άτρακτοι ισχύος και οι κεφαλές φραιζαρίσματος, να φτάνουν τιμές μέχρι 90-100kW.



Σχήμα 7. 5 – Μηχανή πολλαπλών εργασιών βαρέως τύπου από WFL.

### 7.2.2.2 Νέες Ιδέες στην Έννοια του Διαρθρωτικού Μηχανήματος

Από την πρότυπη διαμόρφωση των μηχανών, συνήθως ένας τόρνος κεκλιμένης τράπεζας ενσωματώνοντας την κεφαλή φραιζαρίσματος, οι κατασκευαστές έχουν εξελιχθεί στην ανάπτυξη βέλτιστων διαμορφώσεων για σκοπούς πολλαπλών έργων, δίνοντας την ίδια σημασία στις λειτουργίες φραιζαρίσματος και τórνευσης. Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα είναι η νέα οικογένεια NT από τον MoriSeiki, που ενοποιεί την έννοια του κέντρου φραιζαρίσματος, μαζί με την οριζόντια τράπεζα ενός τόρνου, όπως φαίνεται στο [σχήμα 7.6](#) και στο σχήμα 1.3 του Κεφαλαίου 1. Η λειτουργικότητα, η ακρίβεια, η μηχανική απόδοση και η εκκένωση των θραυσμάτων εξασφαλίζονται σε αυτή την έννοια της μηχανής.

Επιπροσθέτως με την έννοια της μηχανής, ο MoriSeiki έχει εισάγει νέα χαρακτηριστικά σε αυτές τις σειρές, μία από τις πιο καινοτόμες είναι ο πυργίσκος εργαλείου που ενσωματώνει μία ήλεκτρο-άτρακτο φραιζαρίσματος, όπως φαίνεται στο [σχήμα 7.7](#).



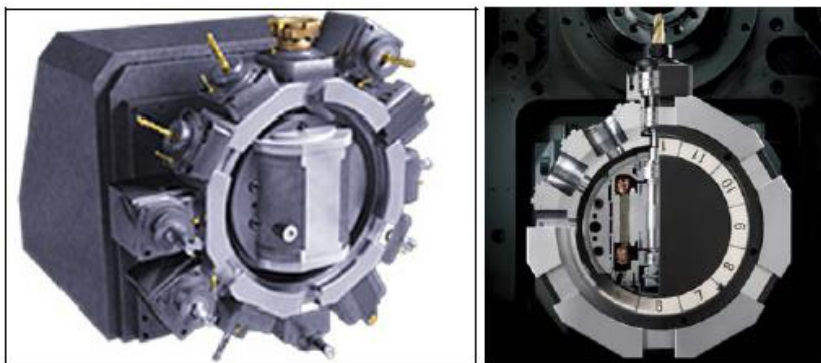
Σχήμα 7. 6 – Η διαρθρωτική διαμόρφωση του MoriSeiki, σειρά NT.

Αυτό το παράδειγμα διαμόρφωσης της μηχανής μικραίνει την απόσταση μεταξύ των κέντρων τórνευσης και φραιζαρίσματος, οδηγώντας σε μία νέα συζήτηση στην βιομηχανία των εργαλειομηχανών. Αυτή η συζήτηση είναι πολύ εκτεταμένη στην

περίπτωση των κάθετων κέντρων τόννευσης και φραιζαρίσματος που είναι εξοπλισμένοι με περιστροφικές τράπεζες. Τα κάθετα κέντρα φραιζαρίσματος αποτελούν την εξέλιξη των πρότυπων κάθετων τόννων, προς μία ολοκληρωτική εγκατάσταση για μία κατεργασία εξαρτήματος.

Για τον σκοπό αυτό, οι κάθετοι τόννοι ενσωματώνουν έναν άξονα κάθετης μετατόπισης, διαμορφωμένο με ένα έμβολο φραιζαρίσματος ή έναν συνδυασμό εμβόλου και κινούμενου πυλώνα. Αυτό το έμβολο μπορεί να ενσωματώσει μία κεφαλή φραιζαρίσματος ή εργαλεία τόννευσης. Στην τελευταία εξέλιξη, ανάλογη με τα κέντρα οριζόντιας τόννευσης, τα εργαλεία τόννευσης κρατιούνται από την ίδια κεφαλή φραιζαρίσματος, κλειδώνοντας την περιστροφή της ατράκτου.

Αυτά τα κέντρα κάθετης τόννευσης έχουν βρει μία πολύ σημαντική αγορά στην κατεργασία των μεγάλων εξαρτημάτων, της παραγωγής ενέργειας και της χερσαίας μεταφοράς, όντας μερικοί από τις αγορές-στόχους. Το σχήμα 7.8 παρουσιάζει ένα παράδειγμα αυτού του τύπου κέντρων κάθετης τόννευσης, από τον PietroCarnaghi (δείτε επίσης την Σχήμα 1.21, στο Κεφάλαιο 1). Αυτές οι μηχανές κρατούν επεξεργαζόμενα κομμάτια διαμέτρου έως 6-8 μέτρα και η ισχύς περιστροφής μπορεί να αγγίξει τιμές από 200 έως 300kW.



Σχήμα 7. 7 – Ήλεκτρο-άτρακτος φραιζαρίσματος ενσωματωμένη μέσα στον πυργίσκο τόννευσης, από MoriSeiki.



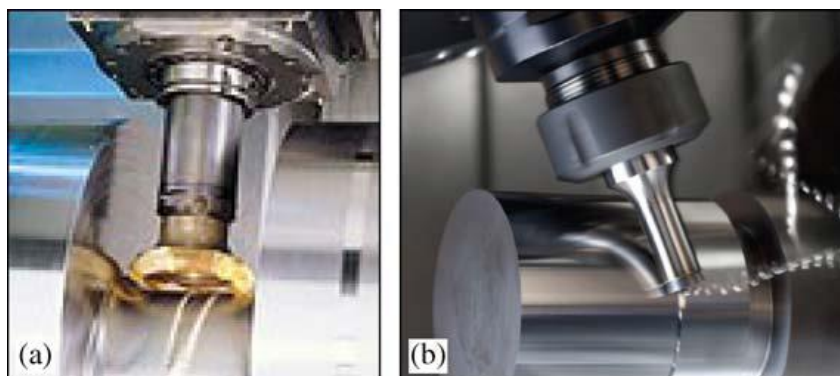
Σχήμα 7. 8 – Κέντρο κάθετης τόννευσης βαρέως τύπου, AC 46 από PietroCarnaghi.

Από τεχνολογικής απόψεως, τα κέντρα κάθετης τόννευσης συνήθως συλλέγουν δύο πολύ δύσκολα υλοποιήσιμες συμβατές απαιτήσεις: μεγάλα μεγέθη επεξεργαζόμενου κομματιού και στενές ανοχές.

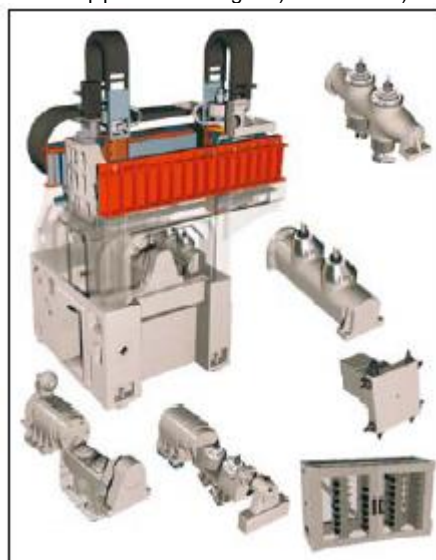
Τα στοιχεία αεροναυτικής τουρμπίνας (δακτύλιοι, περιβλήματα, στεγανοποιήσεις, ...) και κιβώτια ταχυτήτων παραγωγής αιολικής ενέργειας είναι τυπικές εφαρμογές

μεσαίου μεγέθους κέντρων κάθετης τórνευσης, τα οποία οδηγούν σε πολύ υψηλές απαιτήσεις υπό τη μορφή ποιότητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας, μαζί με το μεγάλο μέγεθος και τα υψηλά ποσοστά που πρόκειται να αφαιρεθούν. Για το λόγο αυτό, οι μηχανές αυτές συνδυάζουν τεχνολογίες υψηλού επιπέδου από μηχανικής πλευράς και από πλευράς ελέγχου: οι υδροστατικοί οδηγοί σε όλους τους άξονες, συμπεριλαμβάνοντας την κεφαλή περιστροφής, η διαδικασία παρακολούθησης και ελέγχου, τα στοιχεία της μηχανής, η αντιστάθμιση των θερμικών και δυναμικών διαταραχών ή οι online μετρήσεις, αποτελούν τεχνολογίες που βρίσκονται συνήθως στις μηχανές αυτές.

Πέρα από την καθαρή εξέλιξη της διαμόρφωσης της μηχανής, αυτές οι μηχανές πολλαπλών εργασιών έχουν εισάγει καινοτομίες στις διαδικασίες εφαρμογών. Ένα καινοτόμο και σημαντικό παράδειγμα είναι η χρήση φραιζαρίσματος για να εκτελεστούν λειτουργίες που συνήθως γινόταν από την τórνευση, σε μία διαδικασία που ονομαζόταν «turn-milling» ή «spin-milling» από διαφορετικούς κατασκευαστές για να αυξηθεί η παραγωγικότητα της τórνευσης από μία υψηλότερη δυνατότητα αφαίρεσης υλικού. Το σχήμα 7.9 δείχνει μερικά παραδείγματα αυτής της εφαρμογής.



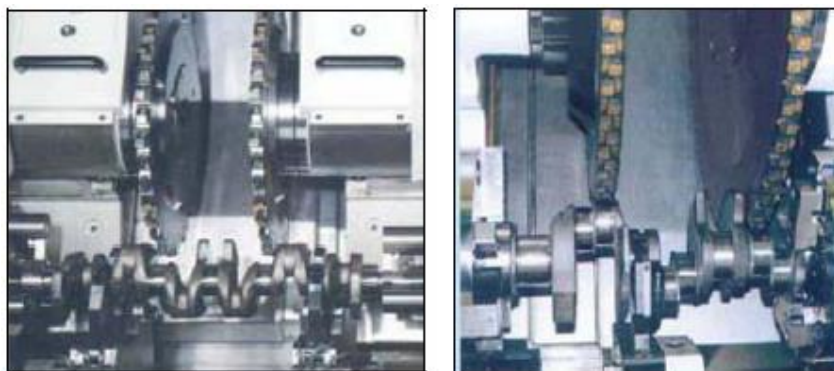
Σχήμα 7. 9 – Λειτουργία «turnmilling». a) Από WFL b) Από MoriSeiki.



Σχήμα 7. 10 – Αναδιαμορφωμένη έννοια μηχανής

Η ευελιξία και η αναδιαμόρφωση που σχετίζονται με την μηχανή πολλαπλών εργασιών έχει επίσης απαιτηθεί από την βιομηχανία, και πολλές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί και είναι σήμερα στην διαδικασία ανάπτυξης. Η αναδιαμόρφωση κατανοείται ως η δυνατότητα αναδιαμόρφωσης μίας μηχανής, από τον ένα σκοπό στον άλλο, υπό τη μορφή υποκατάστασης ή προσθήκης δομοστοιχειωτών στοιχείων. Αυτές οι προσεγγίσεις, όπως είναι το γερμανικό έργο «METEOR» (Σχήμα 7.10)

Αν και δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη ως μία διαδικασία πολλαπλών εργασιών ή μία μηχανή, οι διαδικασίες «turn-milling» ή «turn-broaching» είναι αξιοσημείωτες. Αυτές είναι διαδικασίες υψηλής παραγωγικότητας, προσανατολισμένες κυρίως στην σκληρή κατεργασία της μηχανής στροφαλοφόρων αξόνων ειδικά των εδράνων του άξονα, όσον αφορά στην μεγάλη διάμετρο των εργαλείων φραιζαρίσματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.11.



Σχήμα 7. 11 – Λειτουργία «turn milling» και «broaching», από Boehringer.

### **7.3 Οι Τελευταίες τεχνολογίες που Εφαρμόστηκαν στους Τόρνους και στα κέντρα Τόρνευσης**

Αυτή η ενότητα συνοψίζει τις πιο σημαντικές τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για να εφοδιάσουν τις νέες μηχανές με τις απαιτούμενες αποδόσεις για να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς.

#### **7.3.1 Τεχνολογίες Γενικής Διαμόρφωσης**

Ιστορικά, οι τόρνοι υπήρξαν οι πιο «συντηρητικές» εργαλειομηχανές, χρησιμοποιούμενες κυρίως ως μηχανές γενικού σκοπού και, μέχρι πριν λίγα χρόνια, για να εκτελούν διαδικασίες ξεχονδρίσματος. Οι λειτουργίες φινιρίσματος εκτελέστηκαν από την λείανση, το ακόνισμα ή το στίλβωμα.

Παρ' όλα αυτά, οι τελευταίες πιο προηγμένες μηχανές, π.χ. οι τόρνοι υψηλής παραγωγής και τα κέντρα τóρνευσης, ενσωματώνουν το ίδιο υψηλό επίπεδο μηχανικών τεχνολογιών με άλλες μηχανές, όπως είναι οι μηχανές λείανσης ή τα κέντρα κατεργασίας.

Η αρχιτεκτονική των μηχανών έχει περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Δεν υπάρχει άλλη εργαλειομηχανή που να έχει υποστεί τέτοια εξέλιξη, από την συμβατική διαμόρφωση των τóρνων, τα πολύπλοκα κέντρα τóρνευσης με πολλές «κουκουβάγιες», τους πυργίσκους και τις κεφαλές φραιζαρίσματος, συνδυάζοντας άλλα εργαλεία όπως πηγές λείζερ, κυλινδρικού γυαλίσματος ή υπερηχητικές. Η αρχιτεκτονική της μηχανής έχει εξελιχθεί ώστε να υιοθετεί όλες αυτές τις καινοτομίες.

Τα συστήματα οδήγησης έχουν εξελιχθεί από οδηγούς ολίσθησης της τριβής των συμβατικών τóρνων σε μαζικής χρήσης σφαίρες ανακυκλοφορίας ή κυλινδρικές μονάδες, πιεζόμενα από την δραστική αύξηση στην ταχύτητα και στην επιτάχυνση, που απαιτούνται για την γρηγορότερη κατεργασία, φορτώνοντας και εκφορτώνοντας λειτουργίες.

Στις μηχανές βαρέως τύπου και υψηλής ακρίβειας, όπως είναι οι κάθετοι τόρνοι και τα κέντρα τórνευσης που προσανατολίζονται στις αεροναυτικές και ενεργειακές εφαρμογές, οι υδροστατικοί οδηγοί χρησιμοποιούνται στους περιστροφικούς άξονες και στους άξονες μετατόπισης, παρέχοντας χωρητικότητα υψηλού φορτίου, υψηλά ποσοστά απόσβεσης και ακρίβεια τοποθέτησης που παρέχει ασφάλεια, ακρίβεια, σταθερότητα και παραγωγικότητα στις λύσεις υψηλής προστιθέμενης αξίας για τους τομείς αυτούς.

Οι συμβατικοί κινητήρες για τις βασικές ατράκτους και οι μεταδόσεις έχουν επίσης υποκατασταθεί από αναβαθμισμένες ήλεκτρο-ατράκτους για κουκουβάγιες (δείτε Σχήμα 6.5 στο Κεφάλαιο 6) και από γραμμικούς κινητήρες για την μετατόπιση των αξόνων όταν οι απαιτήσεις ταχύτητας και επιτάχυνσης γίνονται εκτεταμένες για τις συμβατικές μεταδόσεις.

Οι αριθμητικοί έλεγχοι πρέπει επίσης να απαντούν στις υψηλές απαιτήσεις που επιφέρει το επίπεδο πολυπλοκότητας αυτών των μηχανών: στους πολλαπλούς άξονες που πρόκειται να ελεγχθούν και να συγχρονιστούν, στις διαφορετικές διαδικασίες και στους κύκλους κατεργασίας που πρόκειται να προγραμματιστούν και να ελεγχθούν, και στα υψηλά δυναμικά των αξόνων και την εφαρμογή των συσκευών μέτρησης. Λόγω όλων αυτών των ιδιοτήτων, η τελευταία γενιά ελέγχων εφαρμόζεται και μερικοί κατασκευαστές, όπως ο Mazak, έχουν αναπτύξει ή προσαρμόσει τα δικά τους.

### **7.3.2 Συμπληρωματικές Τεχνολογίες Βελτίωσης της Απόδοσης της Μηχανής**

Τα τελευταία χρόνια, μερικές συμπληρωματικές τεχνολογίες έχουν αναβαθμιστεί στους τόρνους για να βελτιώσουν την παραγωγικότητα και την ακρίβεια αυτών των μηχανών. Συνεπώς:

Ο έλεγχος της συμπεριφοράς της μηχανής και τα σφάλματα αντιστάθμισης, συγκεκριμένα, οι κραδασμοί και οι θερμικές επιδράσεις. Η έννοια «θερμικά φιλικό» χρησιμοποιείται από τους περισσότερους κατασκευαστές, με παρόμοιες προσεγγίσεις που καλύπτουν, βασικά, δύο πεδία: τον διαρθρωτικό σχεδιασμό, προσπαθώντας να αγγίξει τους σχεδιασμούς ελάχιστης θερμικής ευαισθησίας, και την μέτρηση των κρίσιμων θερμοκρασιών για να εφαρμοστούν στρατηγικές αντιστάθμισης μέσω του NC.

Όσον αφορά στην πρόληψη των κραδασμών, υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις. Μερικοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει στρατηγικές για να εξαλείψουν τα σημάδια κραδασμών (Ενότητα 3.5.3), με την εφαρμογή των μηχανικών παθητικών αποσβεστήρων ή με στρατηγικές που βασίζονται σε λογισμικό, όπως ο κραδασμός της ταχύτητας περιστροφής.

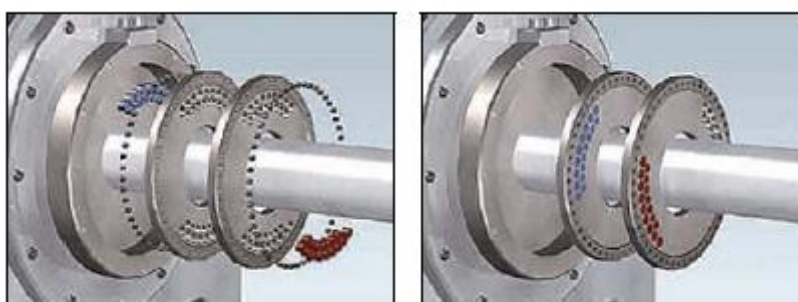
Πιο διαδεδομένες είναι οι εξελίξεις που σχετίζονται με την ισορροπία των εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια κατεργασίας. Αξιοσημείωτος είναι ο λεγόμενος «προσαρμοστικό εξισορροπιστή» από τον MoriSeiki, που φαίνεται στο σχήμα 7.12, ο οποίος μπορεί να ισορροπήσει το πιθανό εξάρτημα αστάθειας κατά τη διάρκεια τórνευσης, χρησιμοποιώντας δύο πλάκες μικρής μάζας που κατανέμονται μη-συμμετρικά.

Άλλες προηγμένες εφαρμογές ισορροπίας έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα για την κατεργασία τροχών των αυτοκινήτων και των τρένων. Στις περιπτώσεις αυτές, η αστάθεια μετρίεται μεταξύ του ξεχονδρίσματος και της λείανσης, και η ισορροπία

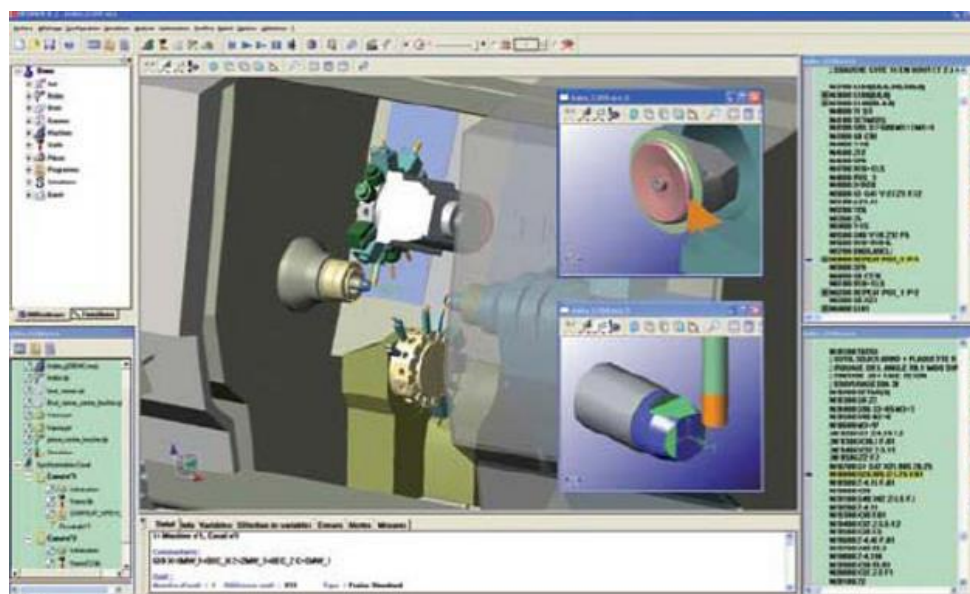
εκτελείται μέσω εκκεντρικής τόννευσης, εξαλείφοντας περισσότερο υλικό στην υπερφορτωμένη πλευρά.

Ο προγραμματισμός και η προσομοίωση των διαδικασιών. Τρεις βασικοί παράγοντες κάνουν αυτές τις τεχνολογίες σχεδόν απαραίτητες για μηχανές πολλαπλών εργασιών: 1) η συμπερίληψη πολλαπλών διαφορετικών διεργασιών, 2) η περίπλοκη διαμόρφωση των μηχανών, με πολλές συσκευές και εργαλεία, και 3) το πολύπλοκο σχήμα των εξαρτημάτων και του υψηλού αριθμού των διαφορετικών λειτουργιών, που συνδυάζονται για μία συνολική κατεργασία σε μία εγκατάσταση.

Για το λόγο αυτό, συγκεκριμένο λογισμικό CAM έχει αναπτυχθεί για κέντρα τόννευσης μηχανών, συνδυάζοντας χαρακτηριστικά τόννευσης και φραιζαρίσματος. Αυτά τα CAM συνδυάζονται με τρισδιάστατες προσομοιώσεις της διαδικασίας (Σχήμα 7.13) για να βελτιώσουν τους κύκλους μηχανής, αποτρέποντας τις συγκρούσεις και τους ανεπιθύμητους κύκλους. Πολλοί κατασκευαστές μηχανών έχουν αναπτύξει τα δικά τους συστήματα.



Σχήμα 7. 12 – «Προσαρμοστικός εξισορροπητής» από τον MoriSeiki.



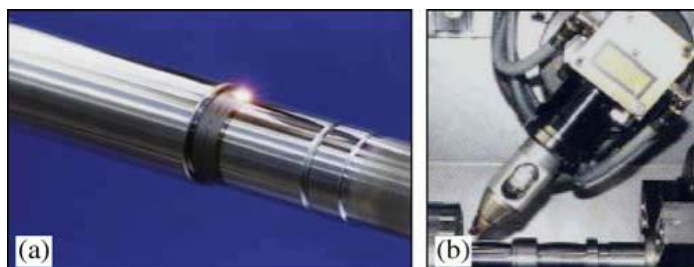
Σχήμα 7. 13 – Προσομοίωση της διαδικασίας πολλαπλών εργασιών, από την SpringTechnologies.

## 7.4 Ειδικές Διαδικασίες Κατεργασίας που Εφαρμόζονται στις Μηχανές Πολλαπλών Εργασιών

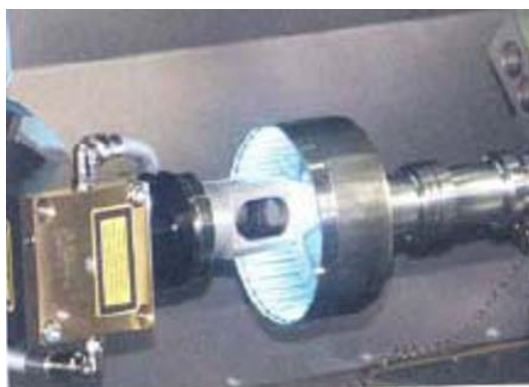
Οι μηχανές πολλαπλών εργασιών αναβαθμίζουν τώρα διαφορετικές διαδικασίες κατεργασίας, όπως για παράδειγμα, οι επεξεργασίες λέιζερ, οι μεταχειρίσεις κρύας μορφοποίησης και άλλες. Οι τρέχουσες εξελίξεις εξηγούνται στις επόμενες ενότητες.

### 7.4.1 Η Εφαρμογή Λείζερ

Τα λέιζερ έχουν μερικές πιθανές εφαρμογές σε συνδυασμό με άλλες διαδικασίες στις μηχανές πολλαπλών εργασιών. Η σκλήρυνση λέιζερ (Σχήμα 7.14) είναι η πιο χρησιμοποιούμενη. Πολλοί κατασκευαστές ενσωματώνουν μία κεφαλή λέιζερ ως επιπρόσθετο εργαλείο, σε διαφορετικές διαμορφώσεις.



Σχήμα 7. 14 – α) Διαδικασία σκλήρυνσης λέιζερ ενσωματωμένη σε ένα κέντρο τόννευσης. β) Σύστημα από την Boehringer.



Σχήμα 7. 15 – Συγκόλληση λέιζερ αναβαθμισμένη σε ένα κέντρο τόννευσης, από την Boehringer.

Η κεφαλή λέιζερ μπορεί να χειραγωγηθεί και να ελεγχθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και ένα εργαλείο φραιζαρίσματος, με δύο άξονες μετατόπισης δύο περιστροφές αν χρειάζονται; έτσι, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν σε περίπλοκα σχηματοποιημένα εξαρτήματα. Το πλεονέκτημα της σκλήρυνσης λέιζερ ενάντια άλλων πιο παραγωγικών μεθόδων, όπως είναι η επταγωγική σκλήρυνση, είναι η ευελιξία τους, και η δυνατότητα εφαρμογής σε μία επιφάνεια εργασίας.

Η συγκόλληση με λέιζερ έχει επίσης ενσωματωθεί από κάποιους κατασκευαστές κέντρων τόννευσης (Σχήμα 7.15). Στην περίπτωση αυτή, το λέιζερ εφαρμόζεται για τα εξαρτήματα συγκόλλησης σε μία ενδιάμεση λειτουργία; επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκλήρυνση, ακόμη και για το φινίρισμα μερικών λεπτομερειών των εξαρτημάτων.

Η υποβοηθούμενη με λέιζερ τόννευση έχει επίσης ερευνηθεί τα τελευταία δέκα με δεκαπέντε χρόνια για την κατεργασία σκληρών υλικών. Αυτή εφαρμογή βασίζεται στην ιδέα πως συνεχείς ακτίνες λέιζερ προκαλώντας θερμότητα στην επιφάνεια εργασίας, παρέχουν μία τοπική ομαλοποίηση του υλικού, βοηθώντας το υλικό να κατεργαστεί χρησιμοποιώντας μία καθορισμένη αιχμή κοπής.

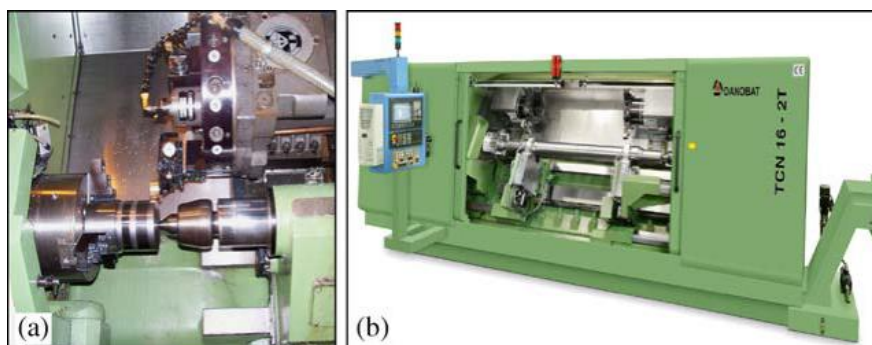
Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν αναφέρει θετικά αποτελέσματα από την υποβοηθούμενη με λέιζερ κατεργασία κεραμικών, ενώ στην περίπτωση των μεταλλικών κραμάτων όπως το ανοξείδωτο ατσάλι που βασίζεται στο νικέλιο ή το κοβάλτιο ή τα κράματα τιτανίου, τα αποτελέσματα είναι αρκετά αντιφατικά. Στους

βιομηχανικούς όρους, η εφαρμογή της υποβοηθούμενης με λέιζερ κατεργασίας είναι σχεδόν αμελητέα.

#### 7.4.2 Τροχός Λείανσης και Βαθύ Τρόχισμα

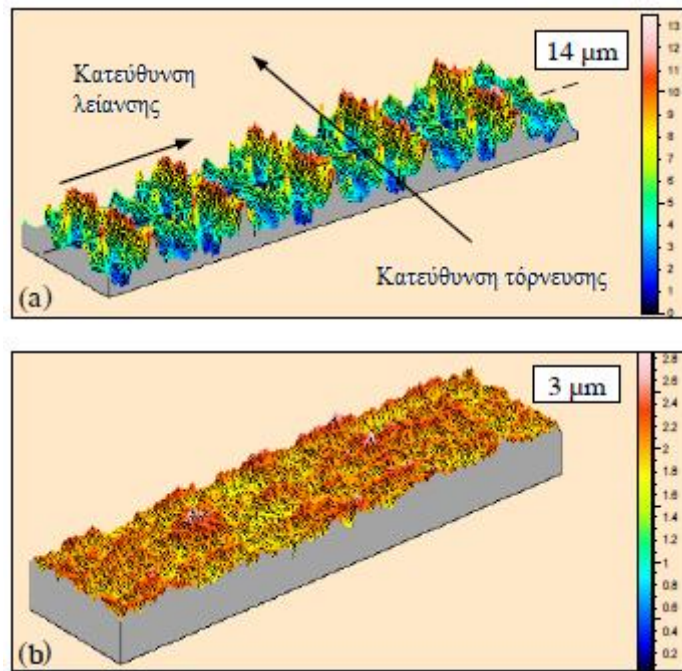
Ο τροχός λείανσης είναι μία κρύα διαδικασία χωρίς πραγματική αφαίρεση του μετάλλου. Είναι μία νέα έννοια στα στοιχεία φινιρίσματος.

Η επιφάνεια των μεταλλικών εξαρτημάτων που λειτουργεί μέσω των λειτουργιών τόννευσης, γλύφανσης ή διεύρυνσης οπών, είναι μία διαδοχή κορυφών και κοιλοτήτων όταν εξετάζεται μέσω μικροσκοπίου. Η λειτουργία του τροχού λείανσης (Σχήμα 7.16) συμπιέζει τις κορυφές μέσα στις κοιλότητες (Σχήμα 7.17), σχηματίζοντας μία ομαλή όψη φινιρισμένης επιφάνειας.



Σχήμα 7. 16 – α) Τροχός λουστραρίσματος. β) Τόρνος όπου εφαρμόζεται ο τροχός στους άξονες τραίνου, από Lealde – Danobat.

Ένα βήμα μπροστά, το βαθύ τρόχισμα είναι ένα από τις πιο πολύτιμες μηχανικές διαδικασίες βελτίωσης της αντοχής της καταπόνησης των δυναμικά φορτισμένων στοιχείων. Εξαλείφει ή τουλάχιστον μειώνει την καταπόνηση, ειδικά στις εγκοπές όπως είναι οι ώμοι, οι οποίοι μπορεί να οδηγήσουν σε ρωγμές καταπόνησης. Η διαδικασία βαθιού τροχίσματος λειτουργεί παρόμοια με τον τροχό λείανσης; ωστόσο, η εργασία είναι διαφορετική. Για να εξασφαλιστεί η ίση ποιότητα των στοιχείων, όλες οι παράμετροι των διαδικασιών πρέπει να ελέγχονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Ο έλεγχος αυτός εκτελείται μηχανικά ή, στα πιο προηγμένα συστήματα, υδραυλικά, ελέγχοντας την πίεση που εφαρμόζεται στον τροχό ή στο σφαιρικό εργαλείο.



Σχήμα 7. 17 – α) Τοπογραφία επεξεργαζόμενου κομματιού μετά την τόννευση. β) Τοπογραφία επεξεργαζόμενου κομματιού μετά την τόννευση και την λείανση.



Σχήμα 7. 18 – Βαθύ τρόχισμα των λεπίδων τουρμπίνας, από Ecoroll.

Το βαθύ τρόχισμα βασίζεται στον συνδυασμό των τριών ταυτόχρονων φυσικών επιδράσεων λειτουργίας:

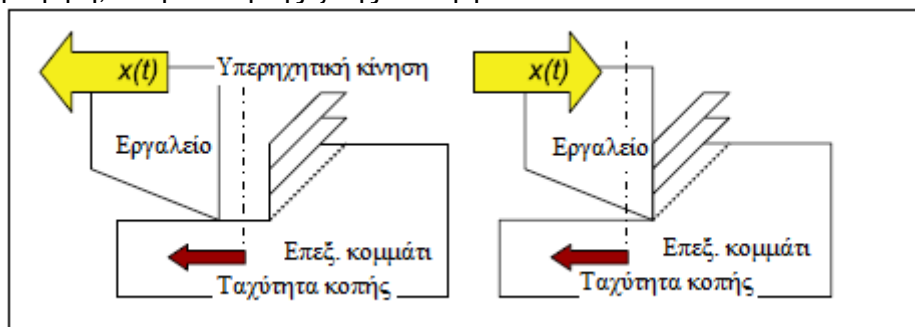
- Ένα βαθύ στρώμα εναπομείνουσας τάσης συμπίεσης πάνω σε μία επιφάνεια στοιχείου.
- Μία αύξηση της δύναμης μέσω ψυχρής λειτουργίας.
- Η ελαχιστοποίηση των μικρό-εγκοπών και η βελτίωση της ποιότητας σκλήρυνσης της επιφάνειας.
- Η τάση συμπίεσης, που παράγεται στο επιφανειακό στρώμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τρόχισσης, παραμένει σε έναν υψηλό βαθμό μετά το τέλος της διαδικασίας αυτής. Οι τάσεις συμπίεσης στην αξονική κατεύθυνση είναι πιο σημαντικές για την βελτιωμένη ισχύ καταπόνησης.

Στο παρελθόν, η βαθιά τρόχιση εφαρμοζόταν μόνο σε ειδικές μηχανές; ωστόσο, σήμερα, λόγω της εξέλιξης στον σχεδιασμό και στην διαμόρφωση των συσκευών βαθιάς τρόχισσης, μπορεί να ενσωματωθεί σε μηχανές όπως οι τόννοι και τα κέντρα τόννευσης. Η συσκευή βαθιάς τρόχισσης μπορεί να ενσωματωθεί στον πυργίσκο του τόννου όπως και οποιοδήποτε άλλο εργαλείο.

Πολλές επιτυχημένες εφαρμογές συνδυασμένης τórνευσης και διαδικασιών βαθιού τροχίσματος έχουν προσφωνηθεί από ερευνητές και βιομηχανικούς κατασκευαστές, από τα εξαρτήματα αυτοκινούμενων μηχανών, όπως τα στελέχη των βαλβίδων, μέσω σιδηροδρομικών εφαρμογών, όπως άξονες τροχών, έως αεροναυτικά εξαρτήματα, όπως δίσκοι τουρμπίνας, λεπίδες (Σχήμα 7.18) και στελέχη ή γρανάζια.

### 7.4.3 Υπερηχητικά Υποβοηθούμενη Τórνευση

Για τα δύσκολα στην κοπή και εύθραυστα υλικά, έχουν διεξαχθεί πολλές ερευνητικές προσεγγίσεις, για την τροποποίηση της μηχανικής σχηματισμού των θραυσμάτων για να βελτιωθούν οι δυνατότητες της διαδικασίας, υπό τη μορφή μείωσης στις ισχύεις και στην τριβή, και μείωση της ζωής του εργαλείου.



Σχήμα 7. 19 – Αρχή του υπερηχητικού κραδασμού, όπου  $x(t)$  είναι η υπερηχητική κίνηση (20-40kHz).

Μία από τις πιο ερευνούμενες τεχνολογίες είναι η εφαρμογή των υπερηχητικών κραδασμών πάνω στο εργαλείο, που επικαλύπτονται στις κινήσεις τροφοδοσίας. Η αρχή πίσω από αυτή την τεχνολογία, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.19, είναι η εφαρμογή ενός υψηλής συχνότητας (συνήθως μεταξύ 20 και 40kHz) χαμηλού πλάτους (5-20μm) γραμμικού ή ελλειπτικού κραδασμού πάνω στο εργαλείο.

Ο υπερηχητικός κραδασμός παρουσιάζεται μέσω μίας γεννήτριας, σε ένα ενδιάμεσο στοιχείο, που ονομάζεται «sonotrode», σχεδιασμένο να έχει έναν φυσιολογικό τύπο στην απαιτούμενη συχνότητα και με τον απαιτούμενο τύπο σχήματος να παράγει κραδασμούς πάνω στο καθορισμένο επίπεδο.

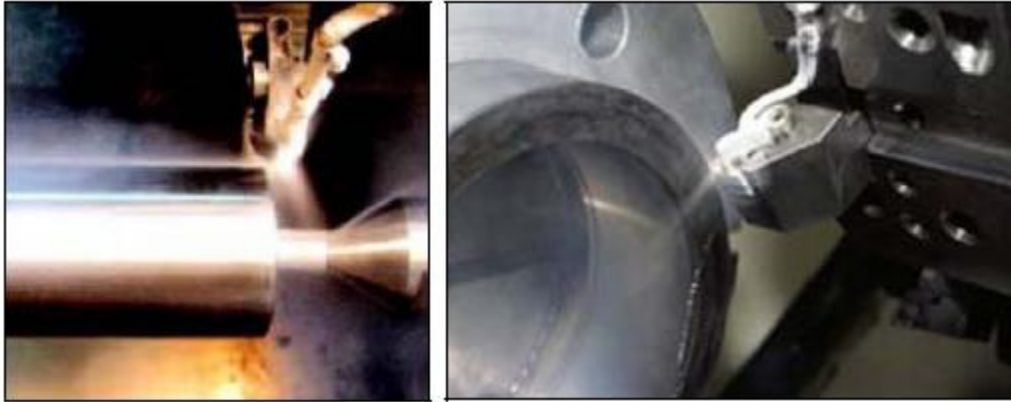
Πολλοί συγγραφείς αναφέρονται στα καλά αποτελέσματα υπό τη μορφή μείωσης του φορτίου και αύξησης της διάρκειας ζωής για ποικίλα υλικά, όπως τα κράματα τιτανίου, ο χαλκός, ή το ανοξείδωτο ατσάλι και το γυαλί. Παρ' όλα αυτά, οι βιομηχανικές εφαρμογές περισσότερο αναφέρονται μόνο στην κατεργασία εύθραυστων υλικών, όπως το γυαλί για οπτικά και τα κεραμικά.

### 7.4.4 Τórνευση Υποβοηθούμενη από Κρυογονικό Αέριο

Αυτή η διαδικασία αποτελείται από την εφαρμογή κρυογονικού αερίου (συνήθως άζωτο), για να βοηθήσει την διαδικασία τórνευσης σκληρών υλικών όπως σκληρυμένου χάλυβα. Η εφαρμογή αυτού του κρυογονικού αερίου ισχυρίζεται να παρέχει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα:

- ο Αυξάνοντας τις ταχύτητες κοπής και τα ποσοστά απομάκρυνσης των υλικών μέχρι και 200% και μειώνοντας τον συνολικό χρόνο κύκλου μηχανής.
- ο Εναλλακτικά, αυξάνοντας την ζωή του εργαλείου έως 250% και μειώνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας της μηχανής για μετάβαση των εργαλείων.
- ο Εμπλουτίζοντας την απομάκρυνση των θραυσμάτων από την περιοχή κοπής και ελαχιστοποιώντας τα υπολείμματα λαδιού στις μηχανές και στα εξαρτήματα.

- Βελτιώνοντας την αξιοπιστία της κοπής με κεραμικά ένθετα, ενώ διατηρούνται οι επιθυμητές ανοχές των διαστάσεων.
- Βελτιώνοντας την ποιότητα των παραγόμενων εξαρτημάτων, αποτρέποντας την μηχανική και χημική υποβάθμιση της κατεργασμένης επιφάνειας.



Σχήμα 7. 20 – Βιομηχανική εφαρμογή Icefly, από την AirProducts.

Μερικοί συγγραφείς έχουν ερευνήσει την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας στην σκληρή τόννευση, επιτρέποντας τη χρήση κεραμικών εργαλείων αντί των CBN, και εξαλείφοντας την ανάγκη συμβατικού ψυκτικού υγρού. Τα πλεονεκτήματα, εκτός από τα παραπάνω, σχετίζονται με μία περιβαλλοντικά χαμηλότερη επίδραση και μία καλύτερη ακεραιότητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται από αυτή την εναλλακτική διαδικασία.

Όσον αφορά στην εφαρμογή στην μηχανή, πρέπει να αναφερθεί πως η εταιρία AirProducts έχει πατεντάρει την τεχνολογία, κάτω από την μάρκα Icefly, συνεργαζόμενη με μερικούς κατασκευαστές μηχανών, όπως Hardinge, για την ανάπτυξη βιομηχανικών εφαρμογών, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.20.

#### 7.4.5 Κατεργασία Υποβοηθούμενη από Ψυκτικό Υψηλής Πίεσης

Τα υψηλής πίεσης ψυκτικά που υποβοηθούν την κατεργασία έχουν ερευνηθεί και εφαρμοστεί στην βιομηχανία των υλικών που είναι δύσκολης κατεργασίας, όπως το τιτάνιο και τα κράματα που βασίζονται στο νικέλιο. Είναι πολύ γνωστή η μηχανική ικανότητα κατεργασίας αυτών των υλικών λόγω πολλών παραγόντων: της χαμηλής τους αγωγιμότητας, της χημικής αντιδραστικότητας με άλλα υλικά, του μηχανισμού διαμόρφωσης κατά τη διάρκεια σχηματισμού των θραυσμάτων και την ένταση της σκληρότητας κατά την κατεργασία.

Αυτοί οι παράγοντες οδήγησαν σε πολύ υψηλή φθορά των εργαλείων, επιβάλλοντας τη χρήση πολύ χαμηλών παραμέτρων κοπής, ειδικά μίας πολύ χαμηλής ταχύτητας κοπής.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, η εφαρμογή ψυκτικού υγρού σε υψηλές πιέσεις (μέχρι 350 bar), που τοποθετείται κατάλληλα στην επιφάνεια μεταξύ της άκρης του εργαλείου και του ολοκληρωμένου κυκλώματος, παράγει ένα φαινόμενο υδραυλικής σφήνας που ομαλοποιεί σημαντικά τον σχηματισμό θραύσματος και την διαδικασία κοπής, μέσω των παρακάτω παραγόντων:

- Σημαντική αύξηση της ταχύτητας κοπής και του ποσοστού τροφοδοσίας. Το ψυκτικό υγρό διευκολύνει στο ράγισμα του θραύσματος, μειώνοντας την τριβή και τις δυνάμεις που παράγονται πάνω στο εργαλείο. Επιπλέον, η επίδραση του ψυκτικού βελτιώνεται, οδηγώντας στην πιθανότητα αύξησης των παραμέτρων κοπής.

- Αύξηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου, λόγω της μείωσης των φορτίων κοπής και των θερμοκρασιών.
- Βελτίωση στην επιφάνεια φινιρίσματος, μέσω της ευκολότερης επιλογής των βέλτιστων συνθηκών κοπής και εξάλειψη των μεγάλων θραυσμάτων, μείωσης της τριβής και των θερμικών επιδράσεων πάνω στην επιφάνεια.

Η τελική επίδραση ή το άθροισμα όλων των παραπάνω, είναι η μείωση του χρόνου του κύκλου και το κόστος ανά εξάρτημα.

Η αεροναυτική κατεργασία εξαρτημάτων είναι ο κυρίαρχος τομέας στην εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής, λόγω της επεκταμένης χρήσης των σχετικών υλικών και της κρίσιμης ποιότητας και τις παραμέτρους παραγωγικότητας της διαδικασίας.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1.** Machine Tools for High Performance Machining  
L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz  
Springer – Verlag London Limited 2009
- 2.** Werkzeugmaschinen  
Manfred Beck, Christian Brecher  
Springer – Verlag Berlin Hedeilberg 2006
- 3.** Global Transfer Lines for Cylinder Blocks. Brochure No. 6101e 20000704  
Cross Hüller 2008
- 4.** Agile Cylinder Head Manufacturing System. Brochure No. 5101e 5000903  
Cross Hüller 2008
- 5.** Workpiece and tool handling in metal cutting machines  
Fleischer J, Denkena B, Winfough B, Mori M 2006  
Cirp Ann-Manuf Techn
- 6.** Automation, transfer machinery, and mass production in the US automobile industry in the post-World War II era.  
Hounshell DA (2000), Enterprise & Society
- 7.** Agile manufacturing systems in the automotive industry. Int J Prod Econ  
Elkins DA, Huang NJ, Alden JM 2004
- 8.** Minimum Quantity Lubrication (MQL) applications  
in automotive power-train machining  
Filipovic A, Stephenson D 2006 - Mach Sci Technol
- 9.** Fertigungstechnik  
Alfred Herbert Fritz · Gónter Schulze (Hrsg.)  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- 10.** Manufacturing Processes 1, Cutting  
Fritz Klocke, Translated by Aaron Kuchle  
Springer Heidelberg Dordrecht London New York
- 11.** Manufacturing Processes 2, Grinding, Honing, Lapping  
Fritz Klocke, Translated by Aaron Kuchle  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- 12.** Fertigungsverfahren 1, Drehen, Fräsen, Bohren  
Fritz Klocke · Wilfried König  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2008, 2002
- 13.** Fertigungsverfahren 2, Schleifen, Honen, Lappen  
Fritz Klocke · Wilfried König  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005

14. Fertigungsverfahren 3, Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung  
Fritz Klocke · Wilfried König  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
15. Fertigungsverfahren 4, Umformen  
Fritz Klocke · Wilfried König  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

