



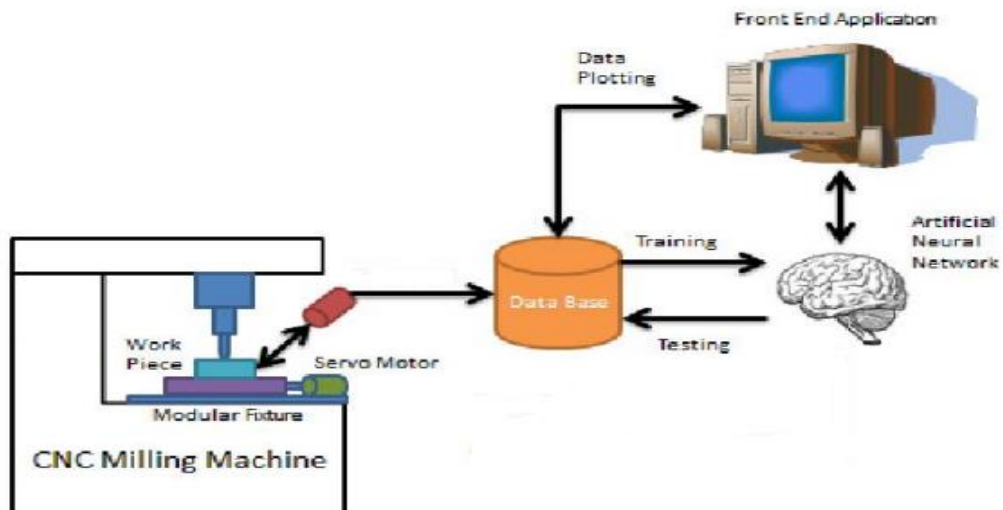
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής και της επιφανειακής τραχύτητας κατά το φρεζάρισμα σκληρυμένου χάλυβα με χρήση νευρωνικών δικτύων»



ΒΕΛΑΪΤΗΣ ΗΛΙΑΣ

AM: 02111631

Επιβλέπων : Μαρκόπουλος Άγγελος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2019

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, καθώς και για τις βάσεις και τα ερεθίσματα που μου έδωσε μέσω των διδασκόμενων μαθημάτων κατά την κανονική περίοδο φοίτησης μου στο ΕΜΠ, δίνοντας μου έτσι την αφορμή να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο διπλωματικής.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Κάρκαλο για την αμέριστη βοήθεια και τις καίριες παρατηρήσεις του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, τόσο στο υπολογιστικό μέρος όσο και κατά τη συγγραφή της, καθώς και στην εκπόνηση των απαραίτητων πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου καθώς και συγκεκριμένα κοντινά μου πρόσωπα για την αμέριστη συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη φοίτησή μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής και της επιφανειακής τραχύτητας κατά το φρεζάρισμα σκληρυμένου χάλυβα με χρήση νευρωνικών δικτύων.

Διπλωματική εργασία

Του

Βελαΐτη Ηλία

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται πρόβλεψη των τιμών των δυνάμεων κοπής και της επιφανειακής τραχύτητας κατά τη διάρκεια του φρεζαρίσματος μέσω νευρωνικών δικτύων και αξιολόγηση της απόδοσής τους μέσω σύγκρισης με τα αποτελέσματα των μοντέλων παλινδρόμησης βάση των πειραματικών τιμών που έχουν συλλεγεί από την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή στα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του φρεζαρίσματος, καθώς και στις μεθόδους πρόβλεψης.

Στο Κεφάλαιο 2 ,γίνεται ανασκόπηση σε διάφορες πειραματικές μελέτες φρεζαρίσματος χάλυβα με έμφαση στο φρεζάρισμα σκληρυμένων χαλύβων πράγμα το οποίο βοήθησε στην επιλογή των πειραματικών συνθηκών.

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και η ανάλυση παλινδρόμησης. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων έγινε με τη μέθοδο Taguchi και διεξήχθησαν 16 πειράματα. Έπειτα με την ανάλυση παλινδρόμησης υλοποιείται πρόβλεψη των μετρούμενων μεγεθών της κατεργασίας και έπειτα με την ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) προσδιορίστηκε ο βαθμός επίδρασης κάθε παραμέτρου της κατεργασίας στα μετρούμενα μεγέθη. Τέλος, βρίσκεται το ποσοστιαίο σφάλμα MAPE για την αξιολόγηση του μοντέλου.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την ανάλυση στα νευρωνικά δίκτυα. Χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα δύο ειδών, το MLP και το RBF στα οποία γίνεται προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους δηλαδή των αλγόριθμων εκπαίδευσης και τον αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Μέσω αυτών γίνεται η πρόβλεψη των δυνάμεων και των τιμών της τραχύτητας και έπειτα πραγματοποιείται σύγκριση των ποσοστιαίων σφαλμάτων τους με τα σφάλματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 εξάγονται γενικά συμπεράσματα με βάση τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
SECTION OF MANUFACTURING
TECHNOLOGY**

Prediction of cutting forces and surface roughness during milling of hardened steel using neural networks.

Diploma Thesis
of
Velaitis Ilias

Abstract

In this diploma thesis, we estimate the values of cutting forces and surface roughness during milling through neural networks and evaluate their performance by comparing them with the results of the regression models based on the experimental values collected from the experiments.

In Chapter 1, a brief introduction is made to the characteristics and conditions prevailing during milling as well as to the prediction methods.

In Chapter 2, we review several experimental steel milling studies with emphasis on milling of hardened steels, which helped to select experimental conditions.

In Chapter 3, the experimental layout and the experimental results as well as the regression analysis are presented. The design of the experiments was done by the Taguchi method and 16 experiments were carried out. Then the regression analysis predicts the measured processing quantities and then the degree of effect of each parameter on the measured sizes was determined by the variance analysis (ANOVA). Finally, there is the MAPE percentage error for model evaluation.

Chapter 4 describes the analysis in neural networks. Neural networks of two types, MLP and RBF, are used in which their characteristics are defined, namely the training algorithm and the number of neurons in the hidden layout. Through these, the forces and roughness values are predicted, and their percentage errors are then compared to the regression analysis errors to evaluate their performance.

Finally, Chapter 5 generates conclusions based on the comparisons are made.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	10
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	10
1.2 Γενικά στοιχεία για τις εργαλειομηχανές.....	10
1.3 Ιστορική εξέλιξη στα CNC.....	11
1.4 Πλεονεκτήματα CNC.....	12
1.5 Συνήθη βήματα διαδικασίας φρεζαρίσματοςCNC.....	12
1.6 Είδη φρεζομηχανών.....	13
1.6.1 Οριζόντια φρεζομηχανή.....	13
1.6.2 Φρεζομηχανή κάθετου άξονα.....	19
1.7 Ηλεκτρονικά μέρη φρεζομηχανών.....	20
1.8 Αρχή Λειτουργίας.....	20
1.9 Είδη φρεζαρίσματος.....	21
1.10 Τρόποι κοπής και αποβολή αποβλίτου.....	23
1.10.1 Κοπή.....	23
1.10.2 Απόβλιτο.....	24
1.11 Κοπτικά Εργαλεία.....	25
1.11.1 Υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων.....	25
1.11.2 Είδη κοπήρα.....	26
1.12 Κατεργασία με υγρό κοπής.....	28
1.13 Κατεργασία Χωρίς Υγρό Κοπής (Dry Machining).....	29
1.14 Βασικά Στοιχεία Μηχανικής Κατά το Φρεζάρισμα.....	30
1.15 Φθορά Κοπτικών Εργαλείων.....	31
1.16 Τρόποι Συγκράτησης Ακατέργαστων Τεμαχίων.....	33
1.17 Μετωπικό Φρεζάρισμα και κατάλληλα κοπτικά εργαλεία.....	35
1.17.1 Τι είναι το φρεζάρισμα.....	35
1.17.2 Κοπτικά εργαλεία στο μετωπικό φρεζάρισμα.....	35
1.17.3 Τοποθέτηση τεμαχίου εργασίας.....	38
1.18 Μέθοδος Taguchi.....	39
1.18.1 Εισαγωγικές έννοιες.....	39
1.18.2 Εισαγωγή στον παραμετρικό σχεδιασμό.....	39
1.18.3 Η μεθοδολογία της μεθόδου.....	40
1.18.4 Τα Βήματα του Taguchi.....	42
1.18.5 Μέτρα απόδοσης του Taguchi.....	43
1.19 Λίγα λόγια για την ανάλυση Παλινδρόμησης.....	44
1.20 Νευρωνικά Δίκτυα.....	45
1.20.1 Ιστορική Αναδρομή.....	47

1.20.2 Τεχνητός Νευρώνας	47
1.20.3 Μαθηματικό μοντέλο ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	48
1.20.4 Συναρτήσεις Ενεργοποίησης	49
1.20.5 Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων.....	51
1.20.6 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα MLP.....	53
1.20.7 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα RBF.....	55
1.20.8 Εφαρμογές των Νευρωνικών Δικτύων.....	55
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση φρεζαρίσματος σκληρυμένου χάλυβα.....	57
3. Πειραματική διάταξη και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	75
3.1. Διεξαγωγή Πειραμάτων και πειραματικά αποτελέσματα.....	75
3.1.1 Περιγραφή Πειραμάτων.....	75
3.1.2. Πειραματική Διάταξη.....	75
3.1.3 Αποτελέσματα του πειράματος.....	78
3.2 Ανάλυση στο Minitab.....	79
3.2.1. Regression analysis και περιγραφή διαγραμμάτων Main effects plot for means.....	80
3.2.2 Ανάλυση γραφημάτων/επιφανειών.....	88
3.2.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων του μοντέλου Παλινδρόμησης (Regression Model).....	96
3.2.4. Εύρεση του MAPE στο μοντέλο παλινδρόμησης.....	97
4. Αποτελέσματα μοντέλων νευρωνικών δικτύων και αξιολόγηση ΤΟΥΣ.....	99
4.1. Αποτελέσματα με χρήση νευρωνικού δικτύου MLP	99
4.1.1 Ορισμός του MSE.....	99
4.1.2 Λειτουργία του κώδικα (Script).....	101
4.1.3.. Εύρεση του καλύτερου Νευρωνικού Δικτύου.....	103
4.1.4. Εύρεση τελικής τιμής του MAPE και του MSE για κάθε Νευρωνικό Δίκτυο.....	105
4.2 Αποτελέσματα με χρήση νευρωνικού δικτύου RBF.....	106
4.3 Παρουσίαση και Σύγκριση των τελικών Αποτελεσμάτων του Μοντέλου Παλινδρόμησης και των Νευρωνικών Δικτύων (MLP & RBF).....	108
5. Συμπεράσματα.....	111
Βιβλιογραφία.....	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο άνθρωπος, το μόνο έλλογο ον του πλανήτη, διαπίστωσε από την εμφάνιση του στη Γη ότι υστερούσε σε μυϊκή δύναμη από τα ζώα. Για εκατομμύρια χρόνια επιβίωνε όπως και οι άλλοι οργανισμοί, ψάχνοντας για τροφή και στέγη στη φύση. Όμως 2 εκατομμύρια χρόνια πριν ο homo sapiens άρχισε να χρησιμοποιεί κάποια εργαλεία για να κάνει τη ζωή του ευκολότερη και να μπορεί να αμύνεται ενάντια στις απειλές που εμφανιζόντουσαν. Τα πρώτα υλικά για τα εργαλεία του ήταν πέτρες και ξύλα με αποτέλεσμα αυτή η εποχή να ονομαστεί εποχή του λίθου. Οι πρώτες απλές μηχανές που ξεκίνησαν από εκείνη την περίοδο ήταν ο μοχλός που πολλαπλασίασε την μυϊκή δύναμη του ανθρώπου για να μετακινήσει ένα βαρύ αντικείμενο. Την εποχή του σιδήρου και μετά από το 1200 π.Χ. οι εφευρέσεις και οι μηχανές άρχισαν να αυξάνονται ραγδαία. Σπουδαίες προσωπικότητες της αρχαιότητας που έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη της μηχανικής, ήταν ο Αριστοτέλης και ο Αρχιμήδης (Κτιστάκη).

1.2 Γενικά στοιχεία για τις εργαλειομηχανές

Εργαλειομηχανές ή μηχανικά εργαλεία ονομάζουμε τις μηχανές, με τις οποίες επεξεργαζόμαστε τα διάφορα κομμάτια και τους δίνουμε την μορφή που επιθυμούμε. Συνήθως λειτουργούν με επαναλαμβανόμενο τρόπο και έτσι καθιστούν την παραγωγή μεγαλύτερη, δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια στις κατασκευές και ελαττώνουν την χειρωνακτική εργασία αντικαθιστώντας έτσι τα εργαλεία χεριού.

Εργαλειομηχανές υπάρχουν για όλες τις εργασίες. Για την εργασία π.χ. του μηχανουργού είναι η φρέζα, ο τόρνος κλπ, ενώ για τον ξυλουργό είναι η πριονοκορδέλα, η ξεχονδριστήρα κλπ.

Τις εργαλειομηχανές τις διακρίνουμε σε 2 μεγάλες κατηγορίες: στις εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως και στις εργαλειομηχανές ειδικής χρήσεως ή ειδικές εργαλειομηχανές. Γενικής χρήσεως ονομάζουμε τις μηχανές που είναι κατασκευασμένες για να εκτελούν διάφορες εργασίες της κατηγορίας τους, όπως π.χ. μια φρέζα στην οποία μπορούμε να αποκόψουμε υλικό από ένα τεμάχιο από μία συγκεκριμένη του επιφάνεια. Άλλες τέτοιες εργαλειομηχανές είναι ο τόρνος, το δράπανο, η πλάνη, το πριόνι κτλ. Ειδικής χρήσεως ονομάζουμε τις μηχανές που έχουν κατασκευασθεί για μία ορισμένη εργασία π.χ. μια εργαλειομηχανή μελετημένη μόνο για να κόβει δόντια σε οδοντοτροχούς και άλλα πολλά.

Παρόλα αυτά, τόσο οι μηχανές γενικής χρήσεως όσο και οι ειδικής χρήσεως, λειτουργούν ακολουθώντας τις ίδιες αρχές. Ανάλογα με τον τρόπο κίνησής τους οι εργαλειομηχανές κατατάσσονται σε περιστροφικής κίνησης (τόρνος, δράπανο, φρεζομηχανή) και ευθύγραμμης κίνησης (πλάνη, πριόνι). Η κίνηση τους προέρχεται από

ηλεκτροκινητήρες και μεταδίδεται με λουριά ή με οδοντωτούς τροχούς (Εμμανουήλ, 2012).

1.3 Ιστορική εξέλιξη στα CNC

Την περίοδο του πολέμου των Ιαπώνων με τους Αμερικάνους, ο αριθμητικός έλεγχος (NC) ήταν ο γρηγορότερος και παράλληλα ο πιο εύκολος τρόπος για την παραγωγή εξαρτημάτων για αεροπλάνα..Ο μεγάλος φόρτος της παραγωγής και η ανάγκη για επισκευή αεροσκαφών και για ανταλλακτικών έκανε δύσκολη τη ζωή των μηχανικών της αεροπορικής βιομηχανίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την κόπωση των τεχνιτών και τη συνεχή παραγωγή χωρίς συντήρηση, το οποίο οδηγούσε σε πολλά κατασκευαστικά λάθη(π.χ. ελαττωματικά ή επικίνδυνα προϊόντα).

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών οδήγησε στην ανάπτυξη των τεχνικών σχεδίασης και παραγωγής προϊόντων με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών μέσω. Οι τεχνολογίες CAD (Computer Aided Design) και CAM (Computer Aided Manufacturing) ξεκίνησαν τη δεκαετία του '60 από τις εταιρίες Renault, Citroen. Ford, GM και Boeing (Κυριάκου, 2013).

Παρακάτω φαίνεται πιο αναλυτικά η ιστορική εξέλιξη της εφαρμογής του αριθμητικού ελέγχου στις εργαλειομηχανές:

- **1949** Το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT) έδωσε εντολή στον John Pearson να ασχοληθεί με την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών.
- **1952** Κατασκευή μιας Cincinnati Hydrotel, η οποία είναι πρώτη μηχανή αριθμητικού ελέγχου με κατακόρυφη άτρακτο, ταυτόχρονη κίνηση σε τρεις άξονες (3D γραμμική παρεμβολή), 400 περίπου διόδους στη μονάδα ελέγχου και ανάγνωση δεδομένων από διάτρητη ταινία.
- **1954** Η εταιρία Bendix άρχισε βιομηχανική παραγωγή εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου
- **1958** Εμφανίστηκε η πρώτη γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου η APT (Automatically Programmed Tool) σε συσχετισμό με υπολογιστή IBM 704.
- **1960** Αντικαταστάθηκαν ρελέ και δίοδοι της μονάδας ελέγχου με τρανζίστορ.
- **1965** Αυτοματοποιήθηκε η αλλαγή εργαλείων
- **1968** Εφαρμόστηκαν ολοκληρωμένα κυκλώματα με άμεσο αντίκτυπο στο μέγεθος της μονάδας ελέγχου.
- **1968** Εμφανίστηκε το πρώτο DNC (σημαίνει κατακεντρωμένος (DISTRIBUTED) και όχι άμεσος (DIRECT) - Standard Omnicontrol φυσικά σε υπολογιστή IBM.
- **1969** Υλοποιήθηκε η αυτόματη αλλαγή παλετών.
- **1971** η εταιρία MCS δημιούργησε λογισμικό CAD/CAM με την εμπορική ονομασία ADAM (Automated Drafting And Manching) που βασίστηκε στην γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.
- **1972** Δημιουργήθηκε η πρώτη γενιά CNC σε mini υπολογιστές.
- **1976** Άρχισαν να χρησιμοποιούνται πολλαπλοί επεξεργαστές στην αρχιτεκτονική των μονάδων ελέγχου, πράγμα που διευκόλυνε τη διεύρυνση των λειτουργιών που

είναι εφικτές στην ίδια την εργαλειομηχανή (κυρίως ο προγραμματισμός της μηχανής).

- **1980** Ο προγραμματισμός της εργαλειομηχανής υποστηρίζεται από γραφικά με κάποιο είδος προσομοίωσης στην ίδια την μονάδα ελέγχου.
- **1985** Ξεκίνησε η δημιουργία 'ανοιχτών' συστημάτων και τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας για την ενσωμάτωση των εργαλειομηχανών σε περιβάλλον CIM.
- **1988** δημιουργήθηκε το λογισμικό Pro Engineer, το πρώτο σύστημα CAD/CAM που βασιζόταν στην παραμετρική μοντελοποίηση, ενώ τη δεκαετία του '90 δημιουργήθηκαν τα mid-rang συστήματα όπως το SolidWorks, το SolidEdge, το TopSolid, το Autodesk, το Inventor κλπ.
- **1990** Εμφανίστηκαν ψηφιακά interfaces μεταξύ μονάδας ελέγχου και μονάδας κίνησης που βελτίωσαν πολύ την ακρίβεια και τη δυναμική συμπεριφορά των αξόνων.
- **1993** Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά λειτουργικό σύστημα Windows στην μονάδα ελέγχου.

1.4 Πλεονεκτήματα CNC

- Μεγάλη ακρίβεια
- Μείωση πιθανότητας ανθρωπίνου λάθους.
- Σύνθετες μηχανουργικές κατεργασίες.
- Λιγότερος χρόνος παραγωγικής προετοιμασίας.
- Ασφαλέστερη χρήση εργαλειομηχανής.
- Συχνότερη χρήση της μηχανής.
- Βέλτιστο επίπεδο παραγωγικότητας.
- Μικρότερη ανάγκη ελέγχου.

(Κυριάκου, 2013)

1.5 Συνήθη βήματα διαδικασίας φρεζαρίσματος σε CNC

- Σχεδιασμός: Σκέψη, ορισμός και σχεδιασμός τεμαχίου
- CAD: Αποτύπωση της σκέψης στον υπολογιστή σχεδιάζοντας το τεμάχιο σε πρόγραμμα 3D
- CAM: Μετασχηματισμός του 3D σχεδίου με την χρήση του υπολογιστή στην γλώσσα της μηχανής
- Έλεγχος: Κατεύθυνση των κινήσεων της μηχανής
- Κατεργασία: Κατασκευή του τεμαχίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

(Κυριάκου, 2013)

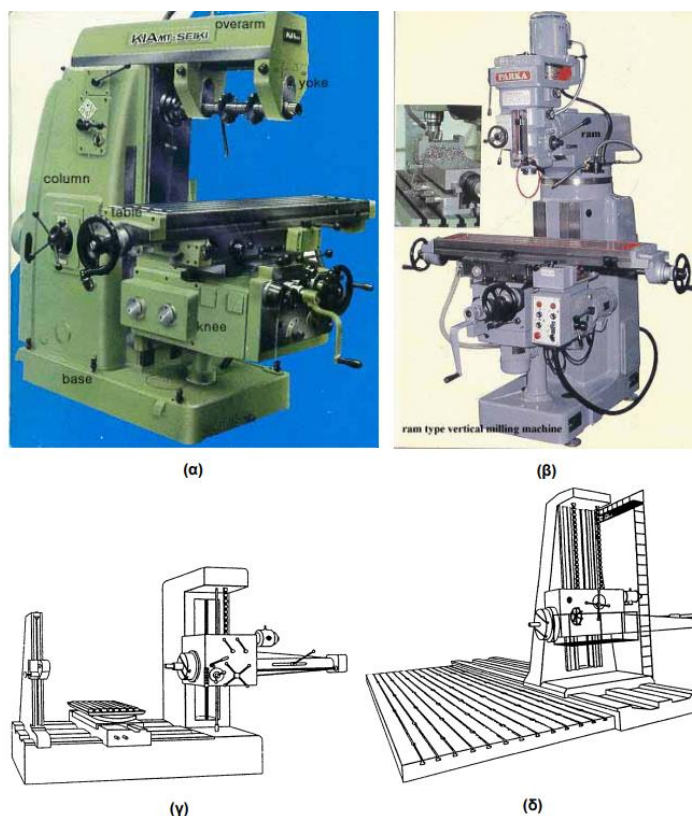
1.6 Είδη φρεζομηχανών

Το φρεζάρισμα είναι μία κατεργασία αποκοπής υλικού. Η κίνηση παρέχεται ή από κεντρικό άξονα (ομαδική κίνηση) ή από ατομικό ηλεκτροκινητήρα (ατομική κίνηση). Η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια μίας εργαλειομηχανής, της οποίας το όνομα είναι φρεζομηχανή. Υπάρχουν διάφορα είδη φρεζομηχανών αλλά τα πιο γνωστά είναι α) η οριζόντια β) η κάθετου άξονα και γ) η φρεζοπλάνη ή αλλιώς το φρεζοδράπανο (εικόνα 1.1) (Μανωλάκος, 2011).

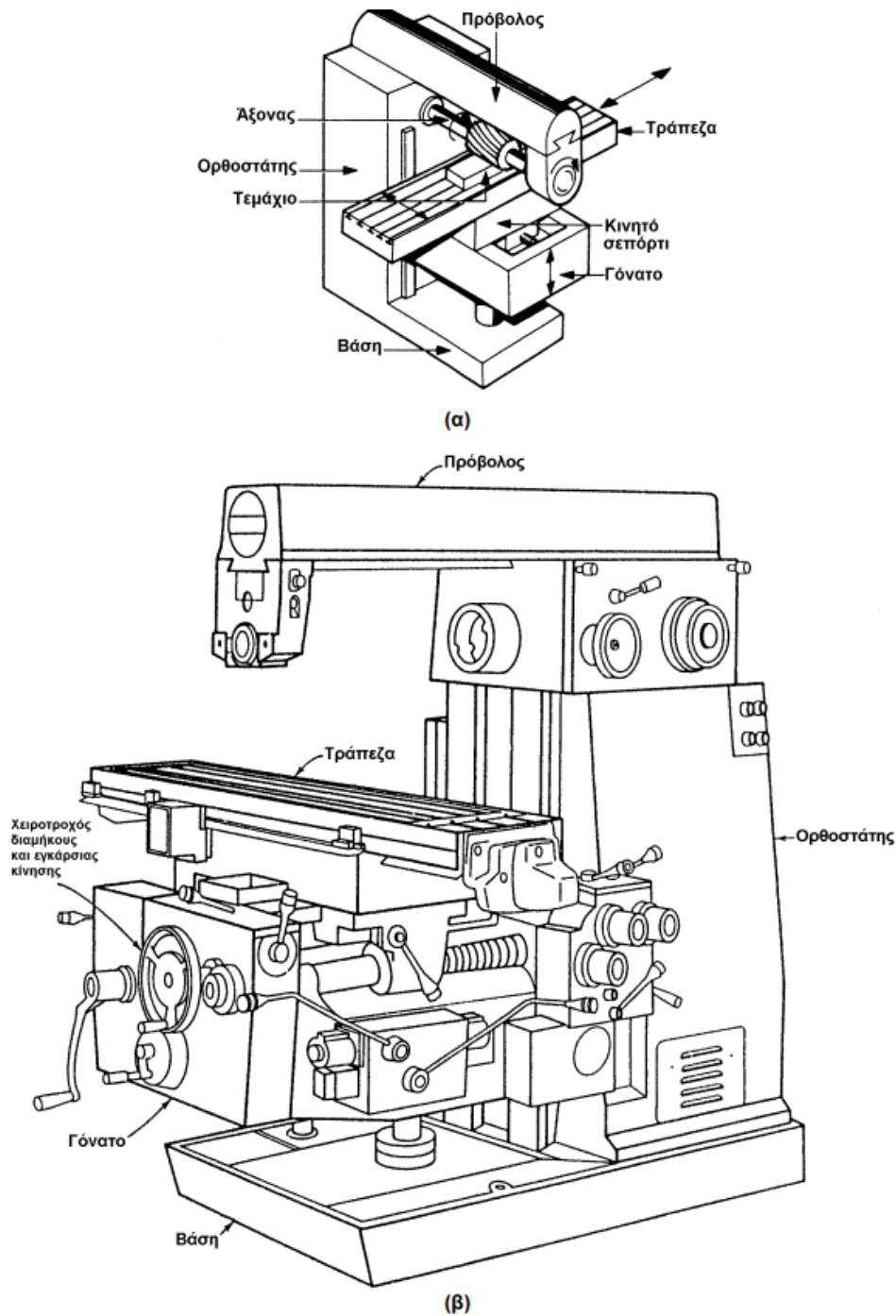
1.6.1 Οριζόντια φρεζομηχανή

Η οριζόντια φρεζομηχανή (εικόνα1.2) αποτελείται από 4 κύρια μέρη τα οποία είναι:

- Βάση
- Σώμα
- Κύρια άτρακτος-εργαλειοφόροι άξονες
- Συγκρότημα τράπεζας



Εικόνα 1.1: (α) Οριζόντια φρεζομηχανή (β) Φρεζομηχανή κάθετου άξονα (γ) Φρεζοδράπανο δ) Φρεζοδράπανο χωριστής κλίνης (Μανωλάκος, 2011)



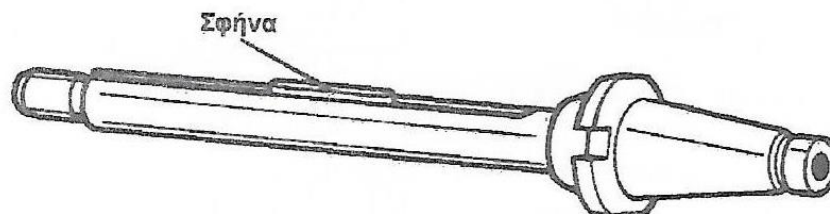
Εικόνα 1.2: Οριζόντια φρεζομηχανή: (α) Δομικά μέρη και κινήσεις (β) Λεπτομερής απεικόνιση(Μανωλάκος, 2011)

Ας δούμε τώρα πιο αναλυτικά το κάθε μέρος μιας οριζόντιας εργαλειομηχανής. **Η βάση** είναι μία άκαμπτη βαριά πλάκα με νευρώσεις που στηρίζει τα υπόλοιπα κύρια μέρη,

δηλαδή είναι το κατώτατο μέρος της εργαλειομηχανής. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις όπου η εργαλειομηχανή είναι μικρή, η βάση είναι συνήθως ενοποιημένη με το κυρίως σώμα.

Έπειτα έχουμε το σώμα ή αλλιώς κορμός/ορθοστάτης της εργαλειομηχανής. Στις οριζόντιες εργαλειομηχανές, το μπροστινό τμήμα του κορμού φαίνεται να είναι επίπεδο, κατακόρυφο και φέρει ισχυρούς ολισθητήρες (γλίστρες) , πάνω στους οποίους μετακινείται το συγκρότημα της τράπεζας που όπως θα δούμε και πιο κάτω, εκεί στερεώνουμε τα τεμάχια προς επεξεργασία. Για τη στήριξη της κύριας ατράκτου υπάρχουν 2 εξωτερικά και 1 εσωτερικό έδρανα στο πάνω τμήμα, ενώ για την στήριξη του εργαλειοφόρου άξονα, ο πρόβολος, ο οποίος βρίσκεται στην ανώτατη θέση, εφοδιάζεται με 1 ή 2 κουζινέτα. Επίσης, στο εσωτερικό του κορμού βρίσκεται το κιβώτιο ταχυτήτων όπου για την κίνηση του υπάρχει ο Ηλεκτρονικός υπολογιστής της εργαλειομηχανής, ο οποίος βρίσκεται στο πίσω τμήμα της.

Στη συνέχεια εξετάζουμε την κύρια άτρακτο(εικόνα 1.3),η οποία είναι διάτρητη σε όλο το μήκος της. Στο εμπρόσθιο μέρος καταλήγει σε μία κολουροκωνική τρύπα μέσα στην οποία εφαρμόζει ο εργαλειοφόρος άξονας ή η κωνική ουρά της φρέζας.Η στήριξη της βασίζεται σε 2 ή 3 έδρανα, που είναι συνήθως ρουλεμάν. Παρόλα αυτά, για την παραλαβή των οριζόντιων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή, υπάρχουν και κάποια αξονικά έδρανα (Μανωλάκος, 2011).



Εικόνα 1.3: Κύρια άτρακτος/ άξονας (Μανωλάκος, 2011)

Οι εργαλειοφόροι άξονες (εικόνα 1.4) στερεώνονται όπως θα δούμε στην άτρακτο με κωνική εφαρμογή. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, η φρέζα συγκρατείται είτε στην άτρακτο απ' ευθείας με κωνική εφαρμογή είτε προσαρμόζονται πάνω σε σφιγκτήρες («τσιμπίδες») που είναι στερεωμένη στην άτρακτο. Ο κώνος μπορεί να είναι είτε Morse, που εξασφαλίζει συγκεντρικότητα και παραλαμβάνει τη μεταφερόμενη ροπή στρέψης, είτε κώνος 7:24 ο οποίος εξασφαλίζει μόνο συγκεντρικότητα.

Η τυποποίηση της κωνικότητας στις φρεζομηχανές τα παλαιότερα χρόνια ήταν μόνο Μπράουν και Σαρπ (Brown and Sharpe) που είχε κλήση 1/2" ανά πόδα. Η αντίσταση

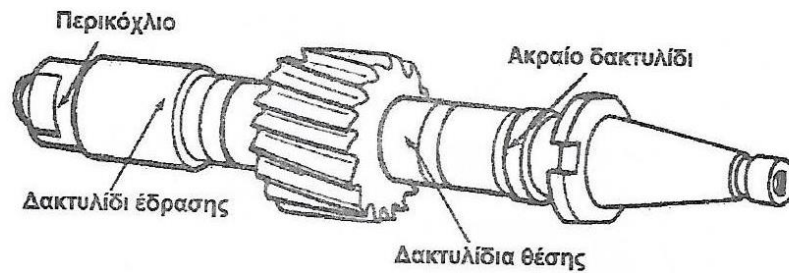
τριβής, στην περίπτωση αυτή, αρκούσε ώστε ο εργαλειοφόρος άξονας μαζί με το φορτίο, να μην μπορεί να περιστραφεί.

Με τα σημερινά δεδομένα οι φρεζομηχανές έχουν κωνικότητα με κλίση 3 1/2" ανά πόδα, με αποτέλεσμα η αποσύμπλεξη των εργαλειοφόρων αξόνων από την κωνική εφαρμογή τους στην άτρακτο να γίνεται όλο και πιο εύκολα και παράλληλα όλο και πιο γρήγορα. Ο σκοπός της κωνικότητας, όμως, στους άξονες αυτούς είναι να κεντράρει τον άξονα. Στο μπροστινό μέρος της ατράκτου υπάρχουν 2 σφήνες οι οποίες σηκώνουν το φορτίο περιστροφής .

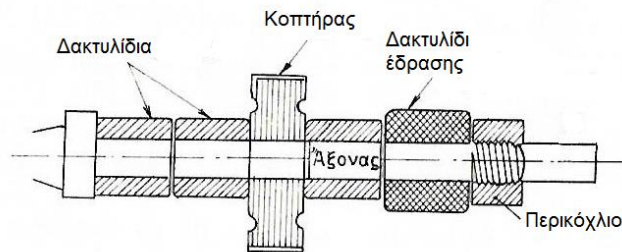
Στη φωλιά, με τη βοήθεια μίας ράβδου έλξης (ντίζας), στηρίζεται ο εργαλειοφόρος άξονας. Η βέργα αυτή περνά από το πίσω μέρος της ατράκτου και βιδώνεται στο εσωτερικό σπείρωμα του εργαλειοφόρου άξονα. Αφού βιδωθεί η βέργα στον εργαλειοφόρο άξονα, σφίγγεται το κύριο παξιμάδι της και ύστερα το ασφαλιστικό παξιμάδι (κόντρα). Επιπλέον, οι εργαλειοφόροι άξονες έχουν σε όλο το μήκος τους σφηνόδρομο. Οι σφηνόδρομοι αυτοί είναι απαραίτητοι για την περιστροφή των κοπτήρων όταν αυτοί έχουν μεγάλη διάμετρο και όταν έχουν μεγάλο φορτίο. Αντίθετα, για τους κοπτήρες με μικρή διάμετρο ή γενικά κοπτήρες ελαφράς κοπής, ο σφηνόδρομος δεν έχει καμία χρήση. Σε μία τέτοια περίπτωση δηλαδή, τα δαχτυλίδια είναι αυτά που συγκρατούν τους κοπτήρες.

Κάθε εργαλειοφόρος άξονας έχει μία σειρά από δαχτυλίδια με διάφορα πάχη .Τα δαχτυλίδια αυτά συμβάλουν σημαντικά στην τοποθέτηση του κοπτήρα ή των κοπτήρων, με κατάλληλους συνδυασμούς, στην θέση την οποία θέλουμε που βρίσκεται πάνω στον άξονα. Αναλόγως με την ανάθεση της εργασίας, τοποθετείται πάνω στο άξονα κοπτήρας σε κατάλληλη θέση . Αριστερά και δεξιά του μπαίνουν τα δαχτυλίδια και όλα μαζί (δαχτυλίδια και κοπτήρες) σφίγγονται μ ένα παξιμάδι. Τα δαχτυλίδια πρέπει να εφαρμόζουν με ακρίβεια στον άξονα. Γι αυτό το λόγο τα πρόσωπα και η τρύπα τους πρέπει να είναι κατεργασμένα με επιμέλεια. Τα πρόσωπα πρέπει να είναι τελείως παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς τον νοητό άξονα.

Όλοι σχεδόν οι εργαλειοφόροι άξονες, εκτός από μερικές εξαιρέσεις, αντιστηρίζονται σε ειδικά στηρίγματα Κ και Ζ. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, η αντιστήριξη αυτή γίνεται συνήθως πάνω σε κουζινέτα, όπου ο άξονας μπορεί να στηρίζεται είτε με το κυλινδρικό άκρο του Κ, είτε μ ένα δαχτυλίδι Δ. Το δαχτυλίδι αυτό εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Πρώτον, χρησιμεύει σαν δαχτυλίδι συγκρατήσεως του κοπτήρα και δεύτερον γιατί στηρίζει ολόκληρο τον άξονα στο αντιστήριγμά του. Σε βαριές εργασίες αλλά και για να αποφεύγονται οι δονήσεις, χρησιμοποιούμε συνήθως ειδικά στηρίγματα Ζ. Αυτά συνδέουν και σταθεροποιούν το συγκρότημα του τραπεζιού με το συγκρότημα αντιστήριξης του εργαλειοφόρου άξονα (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977).



3D σχήμα



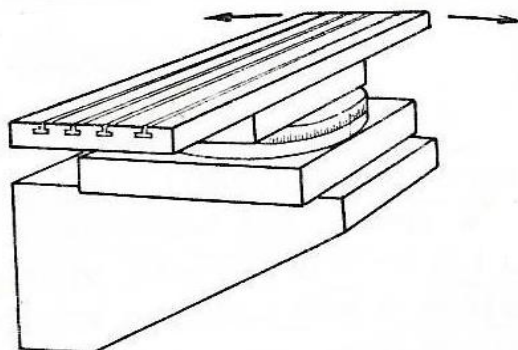
Τομή

Εικόνα 1.4: Εργαλειοφόρος άξονας (Μανωλάκος, 2011)

Το τελευταίο μέρος της οριζόντιας φρεζομηχανής είναι το συγκρότημα της τράπεζας που επάνω σ' αυτό συγκρατούνται τα κατεργαζόμενα κομμάτια είτε ευθείας, είτε με ειδικές συσκευές συγκρατήσεως. Το συγκρότημα αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα: **i)** το φορείο για την κατακόρυφη κίνηση (κονσόλα/ γόνατο) **ii)** το φορείο για την εγκάρσια κίνηση (κινητό σεπόρτι) **iii)** την κυρίως τράπεζα.

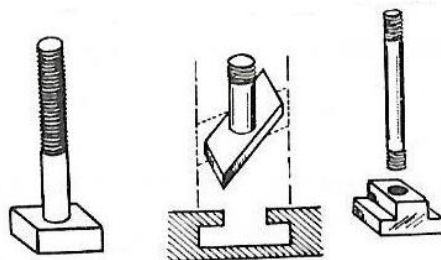
Για την εξασφάλιση της κατακόρυφης κίνησης ολόκληρου του συγκροτήματος, η κονσόλα/ γόνατο κινείται-γλιστρά πάνω σε κατακόρυφους ολισθητήρες που βρίσκονται στο σώμα της φρεζομηχανής. Έπειτα, για την εξασφάλιση της εγκάρσιας κίνησης, το κινητό σεπόρτι κινείται πάνω σε οριζόντιους ολισθητήρες της κονσόλας, οι οποίοι βρίσκονται κάθετα προς το μέτωπο του σώματος. Τέλος, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο στερεώνεται στην κυρίως τράπεζα, κινείται οριζόντια αλλά και παράλληλα προς το μέτωπο της Εργαλειομηχανής πάνω στους ολισθητήρες του εγκάρσιου φορίου.

Ειδικά σε φρεζομηχανές με στρεφόμενη τράπεζα (εικόνα 1.5) παρατηρούνται κινήσεις υπό γωνία 45°. Σ' αυτές, η στροφή σε ορισμένες μοίρες επιτυγχάνεται με ένα δείκτη μοιρών (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977).



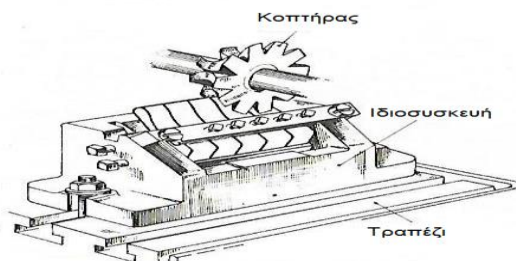
Εικόνα 1.5: Στρεφόμενο τραπέζι φρεζομηχανής universal με δείκτη μοιρών (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977)

Κατά μήκος του τραπεζιού συναντάμε κάτι αυλάκια σχήματος «ταυ» . Μέσα σε αυτά τοποθετούνται οι κεφαλές που έχουν οι βίδες που "σφίγγουν" τα κομμάτια ή τις συσκευές συγκρατήσεως των κομματιών (εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Βίδες συγκρατήσεων τεμαχίων/ κομματιών (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977)

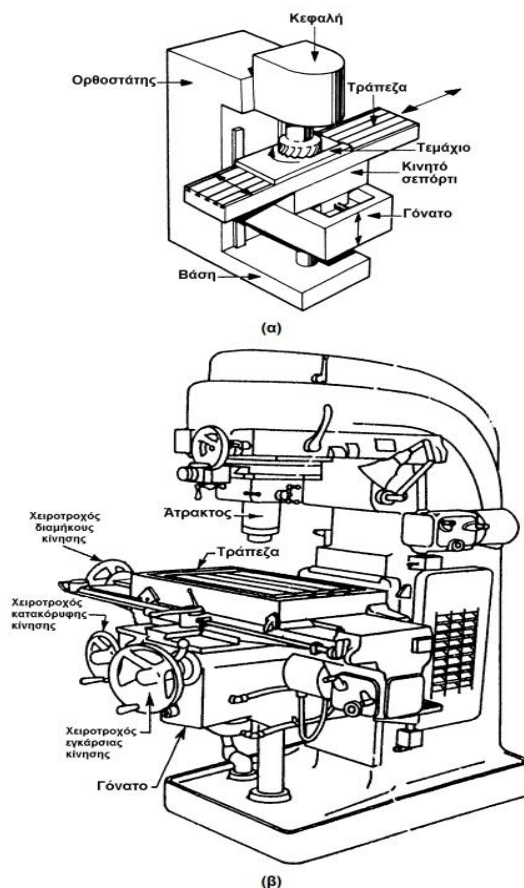
Οι συσκευές συγκρατήσεως, (εικόνα 1.7) με τις οποίες επιτυγχάνεται το γρήγορο δέσιμο και λύσιμο των τεμαχίων, τις ονομάζουμε ιδιοσυσκευές. Αυτές εξαρτώνται συνήθως από τις περιπτώσεις συγκρατήσεως που θα παρουσιαστούν και από τον μηχανικό που θα τις μελετήσει. Μία σταθερή βάση είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της συσκευής που την ξεχωρίζει. Η βάση αυτή βιδώνεται πάνω στο τραπέζι της φρεζομηχανής. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ένα «μέσο» που δένεται πάνω στην βάση που αναφέραμε ταχεία και σωστά (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977).



Εικόνα 1.7: Ιδιοσυσκευή φρεζομηχανής (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977)

1.6.2 Φρεζομηχανή κάθετου άξονα

Έπειτα έχουμε την φρεζομηχανή κάθετου άξονα (εικόνα 1.8), η οποία αποτελείται από τα ίδια μέρη με αυτά της οριζόντιας, μόνο που έχει τις εξής ιδιαιτερότητες τις οποίες θα δούμε παρακάτω:



Εικόνα 1.8: Φρεζομηχανή κάθετης ατράκτου:
(α) Δομικά μέρη και κινήσεις, (β) Λεπτομερής απεικόνιση
(Μανωλάκος, 2011)

Πρώτον, η κύρια άτρακτος βρίσκεται μέσα στην κατακόρυφη κεφαλή και παίρνει κίνηση από τον τελικό άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων μέσω ζεύγους κωνικών οδοντωτών τροχών. Παρακάτω θα δούμε τις διάφορες παραλλαγές κατασκευής της κεφαλής στην εργαλειομηχανή αυτή:

- Με δυνατότητα περιστροφής περί οριζόντιο άξονα και ταυτόχρονη αξονική μετατόπιση της ατράκτου προς τα κάτω
- Με δυνατότητα περιστροφής περί οριζόντιο άξονα χωρίς αξονική μετατόπιση ατράκτου
- Τέλος, σταθερή πάνω στο σώμα της φρεζομηχανής όπου η κύρια άτρακτος έχει τη δυνατότητα περιστροφής

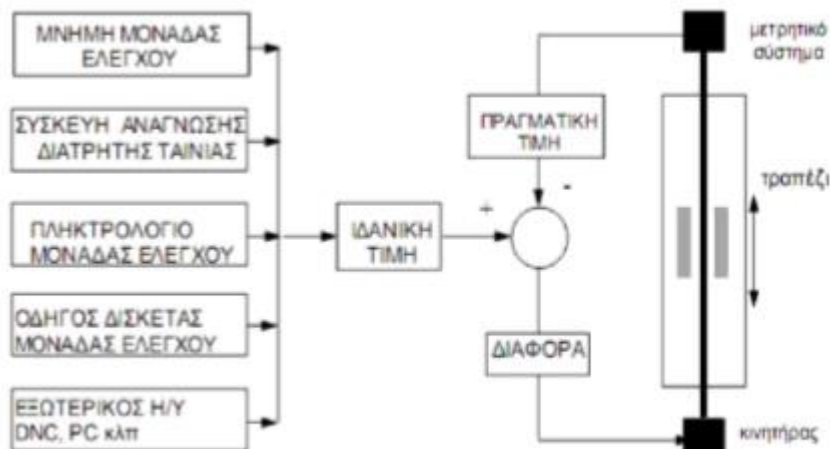
1.7 Ηλεκτρονικά μέρη φρεζομηχανών

Αν και τα κύρια μέρη μιας φρεζομηχανής αναφέρθηκαν προηγουμένως, η λειτουργία μιας φρεζομηχανής CNC προϋποθέτει τα εξής μέρη:

- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου με ένα αριθμό μικροεπεξεργαστών, μνήμης και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για το πρόγραμμα κοπής καθώς και για τον έλεγχο των αξόνων. Επίσης περιλαμβάνει περιφερειακά στοιχεία για την εισαγωγή του προγράμματος στη μηχανή, την εκτύπωση των αρχείων και την παρακολούθηση της λειτουργίας της εργαλειομηχανής.
- Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής όπως και το λειτουργικό λογισμικό συνιστούν βασικά μέρη διαχείρισης του προγράμματος κοπής στη μηχανή (με ενσωματωμένο cam ή μέσω post processor από εξωτερικό cam), της εκτύπωσης αρχείων και πιθανόν της επίβλεψης της λειτουργίας της εργαλειομηχανής.
- Η MCU (Machine Control Unit) προσφέρει την δυνατότητα εκτέλεσης μιας ποικιλίας εργασιών όπως ο προγραμματισμός, η κατεργασία, η διάγνωση, η εποπτεία εργαλείων και μηχανής. Οι MCU προσαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες του κατασκευαστή. Οι σύγχρονες MCU χαρακτηρίζονται ως πιο εκλεπτυσμένες και εν συνεχεία πιο αξιόπιστες ενώ το σύνολο της μηχανουργικής τους επεξεργασίας εξαρτάται σε λιγότερο βαθμό από την ανθρώπινη ικανότητα (Κυριάκου, 2013).

1.8 Αρχή Λειτουργίας

Πρόκειται για ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου ανάδρασης. Το πρόγραμμα «στέλνει» συγκεκριμένες τιμές αναφοράς με τις οποίες γίνεται η σύγκριση με τις πραγματικές τιμές, οι οποίες μετρώνται σε τακτά χρονικά διαστήματα, και η μεταξύ τους διαφορά χρησιμοποιείται για την οδήγηση του συστήματος κίνησης κάθε άξονα ή γενικότερα των πάσης φύσεως ενεργοποιητών (actuators). Στις εικόνες 1.9 και 1.10 φαίνεται η γενική αρχή λειτουργίας μίας προγραμματισμένης εργαλειομηχανής (Κυριάκου, 2013).



Εικόνα 1.9: Γενική αρχή λειτουργίας CNC εργαλειομηχανής (Κυριάκου, 2013)



Εικόνα 1.10: Γενική αρχή λειτουργίας CNC εργαλειομηχανής (Κυριάκου, 2013)

Η ανάδραση θέσης των κινητήρων servo, κατασκευαστικά, είναι σταθερή λόγω της ύπαρξης ενσωματωμένης οπτικής παλμογεννήτριας (optical encoder). Η συσκευή αυτή λαμβάνει χώρα στο πίσω μέρος του κινητήρα και με τις ενδείξεις που αναγράφονται στην οθόνη κρατάνε ενήμερο τον χρήστη για το ποσοστό της περιστροφής του άξονα του κινητήρα.

Ο κύριος σκοπός της ανάδραση θέσης είναι να μηδενίσει την απόκλιση μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θέσης. Η διαδικασία αυτή της «απαλοιφής» της απόκλισης επιτυγχάνεται κυρίως σε υψηλές ταχύτητές όπως επίσης και σε περιπτώσεις αυξημένης ισχύος. Τέλος, στους κινητήρες servo, το σύστημα κλειστού βρόγχου εξασφαλίζει ότι δεν πρόκειται να εμφανιστεί κάποια καθυστέρηση στην κίνηση, εκτός και αν κάποιο αμετακίνητο αντικείμενο εμποδίσει την τροχιά κίνησης (Κυριάκου, 2013).

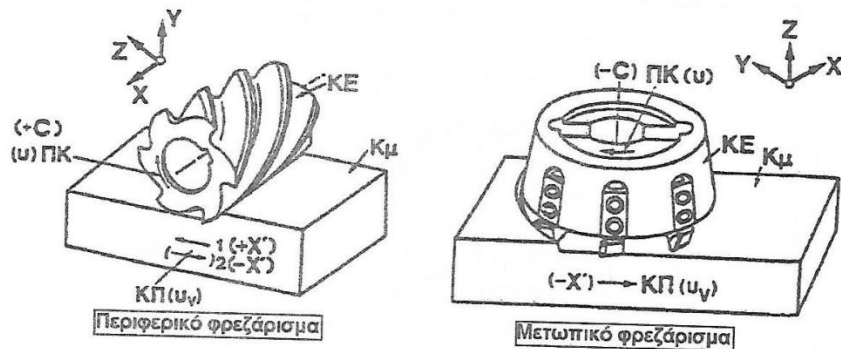
1.9 Είδη φρεζαρίσματος

Το φρεζάρισμα είναι μια κατεργασία αφαίρεσης μεταλλικού υλικού όπου, ανάλογα με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής στους άξονες περιστροφής του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου, μπορούν να παραχθούν πολύπλοκες γεωμετρίες. Η κύρια κίνηση

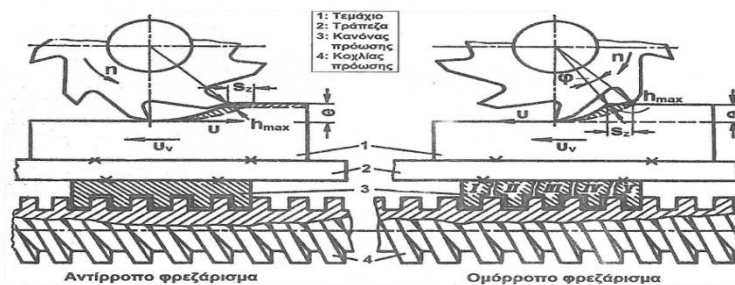
δίδεται στο κοπτικό εργαλείο, το οποίο διαθέτει πολλές κύριες κόψεις ή δόντια, ενώ στο κομμάτι δίνεται η κίνηση προώσεως. Η διατομή του αποβλήτου μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο κοπής του κάθε δοντιού, καθώς κάθε δόντι δεν κόβει συνεχώς αλλά μόνο όταν έρχεται σε επαφή με το κομμάτι κατά την περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου.

Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος διακρίνονται με Α) τη διάταξη του εργαλειοφόρου άξονα και Β) τη σχέση των διανυσμάτων της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας κοπής στο σημείο πρώτης επαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο (εικόνα 1.11).

Τα παραπάνω είδη φρεζαρίσματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες όπου κάθε μία από αυτές έχει τις δικές της υποκατηγορίες. Στην Α) λοιπόν, έχουμε το περιφερικό φρεζάρισμα στο οποίο ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος με την τράπεζα και το μετωπικό φρεζάρισμα στο οποίο ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι κάθετος με την τράπεζα. Στην Β) έχουμε το ομόρροπο, που συμβαίνει όταν τα διανύσματα των 2 ταχυτήτων είναι ομόρροπα (εκκίνηση από μέγιστο πάχος αποβλήτου) και το αντίρροπο που συμβαίνει όταν τα 2 αυτά διανύσματα είναι αντίρροπα (εκκίνηση κοπής από μηδενικό πάχος) (εικόνα 1.12).



Εικόνα 1.11: Είδη φρεζαρίσματος ανάλογα με τη διάταξη του εργαλειοφόρου άξονα(Μανωλάκος, 2011).



Εικόνα 1.12: Είδη φρεζαρίσματος ανάλογα με τη σχέση των διανυσμάτων της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας κοπής στο σημείο πρώτης επαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο (Μανωλάκος, 2011).

Πιο αναλυτικά, στο αντίρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται αντίθετα από τη διεύθυνση της πρόωσης καθώς το κομμάτι κινείται προς το εργαλείο από τη μεριά όπου τα δόντια κινούνται προς τα πάνω. Το πάχος του αποβλήτου στην αρχή της κοπής

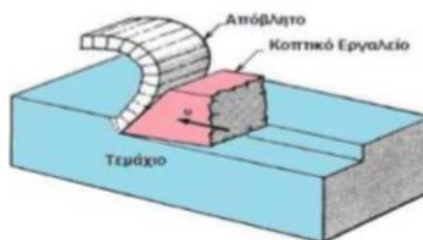
του ενός δοντιού είναι το μικρότερο δυνατό και σταδιακά αυξάνεται, όπου στο τέλος της κοπής του ενός δοντιού είναι το μέγιστο. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται από το κατεργαζόμενο τεμάχιο να έχει τραχιά επιφάνεια, ώστε να αυξάνεται η ζωή του εργαλείου, καθώς τα δόντια έρχονται σε επαφή με το κομμάτι κάτω από την επιφάνεια του κομματιού.

Σε αντίθεση, στο ομόρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται σύμφωνα με την διεύθυνση της πρόωσης του τεμαχίου προς κατεργασία. Το τεμάχιο έρχεται σε επαφή με το εργαλείο από τη μεριά που τα δόντια κινούνται προς τα κάτω. Το απόβλιτο στην αρχή της κοπής του ενός δοντιού είναι το μεγαλύτερο δυνατό και σταδιακά μειώνεται στο ελάχιστο έως το τέλος της κοπής του ενός δοντιού. Το ομόρροπο φρεζάρισμα χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, γιατί αποδίδει καλύτερες επιφάνειες και μεγαλύτερη ζωή του εργαλείου (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977).

1.10 Τρόποι κοπής και αποβολής αποβλίτου

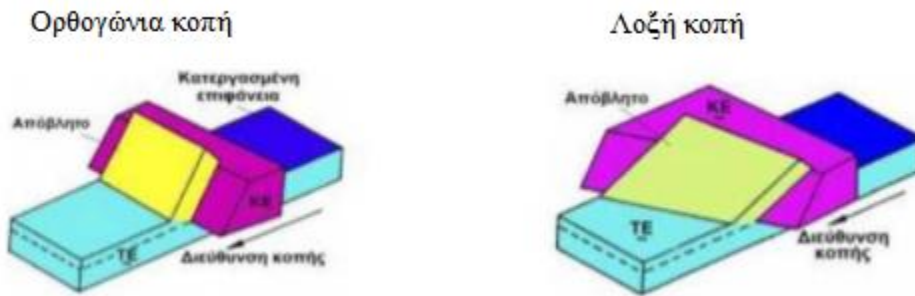
1.10.1 Κοπή

Κατά τη διάρκεια της κοπής, οι 3 βασικοί παράγοντες που απασχολούν τον μελετητή είναι το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και το απόβλιτο που παράγεται. Το απόβλιτο σχηματίζεται λόγω της εισχώρησης του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο και λόγω της κίνησης του ως προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση με μία συγκεκριμένη ταχύτητα (πρόωσης όπως θα δούμε και παρακάτω). Η παραμόρφωση που παρατηρείται και το πάνω μέρος του τεμαχίου που αποκόπτεται ονομάζεται απόβλιτο όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.13 (Κυριάκου, 2013).



Εικόνα 1.13: Κίνηση κοπτικού εργαλείου και σχηματισμός αποβλίτου (Κυριάκου, 2013).

Ανάλογα με την μορφή της ακμής του κοπτικού εργαλείου μπορούμε να έχουμε είτε ορθογώνια, είτε λοξή κοπή (εικόνα 1.14).

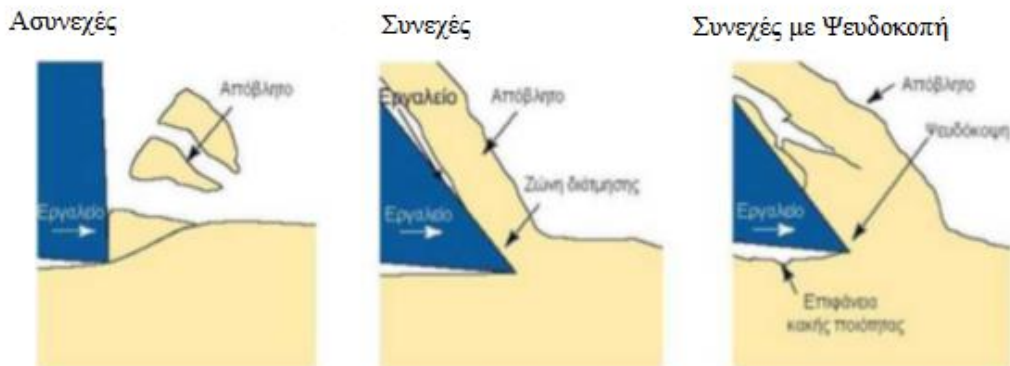


Εικόνα 1.14: Τύποι κοπής (Τοτόνης, 2012)

1.10.2 Απόβλιτο

Οι συνθήκες κοπής μετάλλων εξαρτώνται από 3 μεταβλητούς παράγοντες, το Ρυθμό αφαίρεσης υλικού, τη ζωή του εργαλείου και την τελική επιφάνεια. Η τελική επιλογή των συνθηκών κοπής οφείλει να λαμβάνει υπόψη τις παραπάνω μεταβλητές καθώς και να μεριμνά για το ελάχιστο κόστος, το βέλτιστο Ρυθμό παραγωγής και τη καλύτερη επιθυμητή τελική επιφάνεια ανάλογα με τη κατεργασία.

Η εξέταση του αποβλίτου οδηγεί σε συμπεράσματα για το φαινόμενο της κοπής. Αρχικά ανάλογα με την κατεργασία λαμβάνει διάφορα μεγέθη και μορφές. Τα βασικότερα είδη αποβλίτου είναι το ασυνεχές, το συνεχές και το συνεχές με ψευδοκοπή (εικόνα 1.15).



Εικόνα 1.15: Βασικά είδη αποβλίτου (Κυριάκου, 2013)

Κατά το σχηματισμό του συνεχούς αποβλίτου το μέταλλο παραμορφώνεται συνεχώς πλαστικά σε διάτμηση και το απόβλιτο παίρνει τη μορφή ταινίας, η οποία κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.

Το συνεχές απόβλιτο παράγεται κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων και κραμάτων κυρίως σε υψηλές ταχύτητες κοπής. Η ύπαρξη συνεχούς αποβλίτου σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες κοπής και προκαλεί καλύτερης ποιότητας επιφάνεια, αν και το μήκος του

αποβλίτου ίσως είναι τόσο μεγάλο, ώστε να καθιστά δυσκολότερη την απομάκρυνσή του. Η αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος πραγματοποιείται με τη χρήση του γρεζοθραύστη, ο οποίος προκαλεί τη θραύση του αποβλίτου.

Η παραγωγή του συνεχούς αποβλίτου με ψευδοκοπή σχηματίζεται όπως και το συνεχές απόβλιτο, με τη διαφορά ότι ένα σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο μέταλλο, προσκολλάται πάνω στο κοπτικό εργαλείο, δημιουργώντας την ψευδοκοπή.

Η κοπή γίνεται με το προσκολλημένο υλικό και όχι με την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, καταλήγοντας σε χειροτέρευση της τραχύτητας της επιφάνειας του κομματιού, μείωση του χρόνου ζωής του εργαλείου κοπής και επιρροή στη διαστολή ακρίβεια του κομματιού. Η ψευδοκοπή σχηματίζεται από τον συνδυασμό των τάσεων και των συνθηκών τριβής και θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια αποβλίτου και κοπτικού εργαλείου. Το πρόβλημα επιλύεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής η οποία συνεπάγεται και αύξηση θερμοκρασίας. Στην εικόνα 1.16 παρατηρούνται τα είδη των αποβλίτων σε σχέση με το βάθος κοπής και της ταχύτητας προώσεως (Κυριάκου, 2013).



Εικόνα 1.16: Είδη αποβλίτου ανάλογα με την ταχύτητα προώσεως και του βάθους κοπής. (Κυριάκου, 2013)

1.11 Κοπτικά Εργαλεία

1.11.1 Υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων

Τα παραπάνω είδη φρεζαρίσματος επιτυγχάνονται με τα κοπτικά εργαλεία. Τα κοπτικά εργαλεία ή αλλιώς και "φρέζες" είναι κύλινδροι από βαμμένο χάλυβα οι οποίοι έχουν κοπτικά δόντια και τα χρησιμοποιούμε για να αφαιρέσουμε υλικό.

Τα κοπτικά εργαλεία κατασκευάζονται από ποικίλα υλικά όπως θα δούμε παρακάτω:

•**Ανθρακούχοι χάλυβες:** Από το όνομα του καταλαβαίνουμε ότι είναι χάλυβας σε περιεκτικότητα σε άνθρακα. Αποτελεί το πρώτο υλικό κατασκευής κοπτικών εργαλείων και παράλληλα είναι και το φθηνότερο.

• **Κραματούχοι Ανθρακοχάλυβες:** Έχει κύρια κραματικά στοιχεία Cr, Mn, Mo, V και διατηρεί τη σκληρότητα του σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες.

• **Χυτοκράματα (Στελλίτες):** Είναι μη σιδηρούχα κράματα αποτελούμενα κυρίως από Co αλλά και από Cr, W, C. Είναι ευπαθή σε κρούσεις και δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία ενώ κυκλοφορούν υπό τη μορφή χυτών πλακιδίων.

• **Ταχυχάλυβες:** Αποτελούν υλικό κοπτικού εργαλείου με ευρύτατη εφαρμογή ενώ αποτελείται από W, Cr, Mo, V, Co, C και Fe.

• **Σκληρομέταλλα (βίντια):** Διακρίνονται στα απλά και επενδυμένα σκληρομέταλλα. Αποτελούνται από καρβίδια μετάλλων υψηλού σημείου τήξης κατά βάση από WC και παρασκευάζονται αποκλειστικά με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και πυροσυσσωματώσης.

• **Κεραμικά υλικά:** Παρασκευάζονται και αυτά με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και αποτελούνται κυρίως από σκόνη τεχνητού κοριουνδίου (Al_2O_3). Έχουν πολύ υψηλή σκληρότητα και διατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η χρήση τους σε μηχανές CNC συνεχώς διευρύνεται.

• **Βιομηχανικός Άδαμας:** Είναι ψαθυρό υλικό και ευαίσθητο στις κρούσεις. Επίσης δεν αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες κοπής και έχει το μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από οποιοδήποτε άλλο υλικό. Παρόλα αυτά, έχει πολύ μεγάλη σκληρότητα και μεγάλη αντοχή έναντι φθοράς.











• **CBN(Κυβικός Βοριονιτρίτης):** Χρησιμοποιείται στην κοπή σιδηρούχων μετάλλων με μεγάλες ταχύτητες κοπής. Είναι δεύτερο κατά τάξη σκληρότητας μετά το διαμάντι που παρόλα αυτά υπερέχει αυτού διότι δεν οξειδώνεται στον αέρα και ότι αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες (Μανωλάκος, 2011).

1.11.2 Είδη κοπήρα

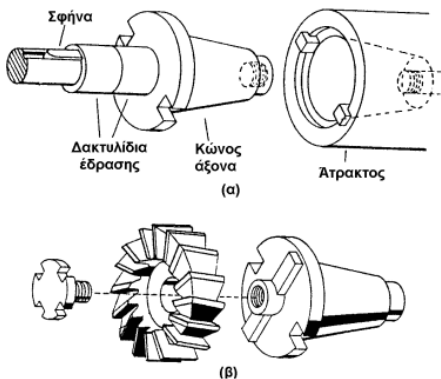
Κατά το φρεζάρισμα η ταχύτητα κοπής δημιουργείται από την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου και η πρόωση από την μετακίνηση του τραπεζιού. Η διεύθυνση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι συνήθως αντίθετη από την διεύθυνση της προώσεως των κομματιών. Έτσι τα δόντια του κοπήρα δίνουν την εντύπωση ότι προσπαθούν να σηκώσουν το κομμάτι προς τα πάνω. Γι' αυτό το απόκομμα δημιουργείται από κάτω προς τα πάνω.

Παρόλα αυτά, το αντίθετο δεν είναι απίθανο να συμβεί, δηλαδή η κοπή να γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Το κομμάτι αυτή τη φορά πιέζεται προς τα κάτω λόγω της κοπής με αποτέλεσμα να εφαρμόζει καλύτερα πάνω στο τραπέζι. Αυτός ο τρόπος κοπής δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα συχνά, παρά μόνο όταν θέλουμε να κόψουμε αυλάκια μεγάλου μήκους και βάθους (συγκριτικά με το πόσο φαρδιά είναι) ή για φρεζάρισμα κομματιών μικρού πάχους επειδή η προς τα κάτω πίεση τους τα στερεώνει καλύτερα.

Στην εικόνα 1.17 παρουσιάζονται τα είδη των κοπτικών εργαλείων φρεζαρίσματος με τις αντίστοιχες ονομασίες ενώ στην εικόνα 1.18 μας δίνονται πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο προσδένονται τα κοπτικά εργαλεία στο εργαλειοφόρο άξονα σε περιφερειακό και το μετωπικό φρεζάρισμα (Λοπρέστη & Μπαχά, 1977) (Μανωλάκος, 2011).

Είδος φραιζαρίσματος	Είδος κοπήρα (φραιζας)	Μορφή κοπήρα	Είδος φραιζαρίσματος	Είδος κοπήρα (φραιζας)	Μορφή κοπήρα
Περιφερικό	Περιφερικός ή κυλινδρικός		Μετωπικό	Μετωπικός	
	Κονδυλοειδής			Πρισματικός (οξείας γωνίας)	
	Αυλάκων (τριπλής τομής ή τρίκοπος)			Μετωπικός (ένθετων οδόντων)	
	Δισκοειδής		Περιφερικό-Μετωπικό	Περιφερικός (κυλινδρικός)-μετωπικός	
	Σχίσματος (πριονόδισκος)				
	Μορφής (μορφοκοπήρας)				

Εικόνα 1.17: Συγκεντρωτικός πίνακας των βασικών κοπτικών εργαλείων φρεζαρίσματος (Μανωλάκος, 2011)



Εικόνα 1.18: Τρόποι πρόσδεσης κοπήρων πάνω στον εργαλειοφόρο άξονα
 (α) Περιφερικό φρεζάρισμα (β) Μετωπικό φρεζάρισμα
 (Μανωλάκος, 2011).

1.12 Κατεργασία με υγρό κοπής

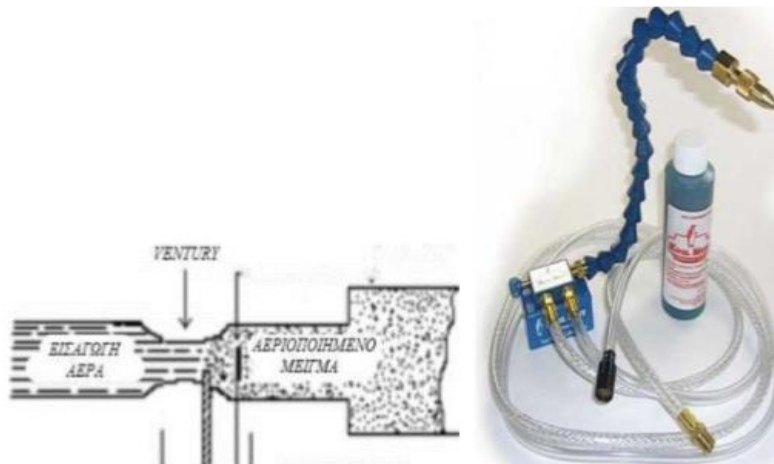
Πριν κάποιες δεκαετίες δεν υπήρχε διαχωρισμός ανάμεσα στην υγρή και στην ξηρή κατεργασία διότι γινόντουσαν όλες με τον ίδιο τρόπο. Αυτό συνέβαινε διότι δεν

εφαρμοζόταν καν ψυκτικό ή λιπαντικό υγρό κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Παρόλα τα οφέλη της χρήσης του καθώς και τα προβλήματα της απουσίας του, για τα οποία δεν υπάρχει αντικατάστασή τους, στις μέρες μας όταν παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες καλό είναι να απαγορεύεται η χρήση του. Τα τελευταία χρόνια, κιάλας, παρατηρείται ένα νέο είδος κατεργασίας η οποία είναι ένας συνδυασμός υγρής και ξηρής και ονομάζεται «σχεδόν ξηρή». Η κατεργασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση της ελάχιστης απαιτούμενης ποσότητας του λιπαντικού. Στα παρακάτω 2 κεφάλαια, θα δούμε αναλυτικά το κάθε ένα είδος κοπής (Κυριάκου, 2013).

Μέχρι και τον 19^ο αιώνα, στις κατεργασίες, πριν την εφαρμογή του ψυκτικού υγρού, εφαρμοζόταν το νερό. Το νερό όμως δημιουργούσε πολλά προβλήματα ειδικά στα εργαλεία κοπής (π.χ. διάβρωση) ενώ η λίπανση που προσέφερε ήταν μη ικανοποιητική, για αυτό και εγκαταλείφτηκε. Σε αντίθεση, το ψυκτικό κοπής «εκμηδενίζει» τα προβλήματα που δημιουργεί το νερό, και προσφέρει στην κατεργασία πολύ καλύτερες συνθήκες (κοπής).

Το ψυκτικό υγρό, όμως, έχει νόημα με την λογική ότι η τιμή της ταχύτητας κοπής είναι σχετικά χαμηλή. Δηλαδή αν συζητάμε για μία ταχύτητα κοπής με μία τιμή από 100 m/min, τότε είναι προφανές η θερμότητα που αναπτύσσεται είναι τόσο υψηλή που η ψύξη ή η λίπανση προσφέρουν ελάχιστη έως και καθόλου βοήθεια στην διεξαγωγή της κατεργασίας.

Παρόλο το γεγονός ότι το ψυκτικό υγρό ή γενικά ένα λιπαντικό είναι σχεδόν απαραίτητο στις μέρες μας, αυτό δε σημαίνει ότι μπορούμε να το χρησιμοποιούμε άσκοπα και χωρίς τον κατάλληλο τρόπο τοποθέτησης. Δηλαδή, η υπερβολική χρήση ή η χρήση αρκετά πιο ψηλά από την απαιτούμενη έχει ως αποτέλεσμα την σπατάλη μεγάλης ποσότητας λιπαντικού άρα και περισσότερα άσκοπα χρήματα με κανένα απολύτως όφελος. Στην εικόνα 1.19 παρατηρείται ένα σύστημα αεριοποιημένου μείγματος λιπαντικού (Κυριάκου, 2013).

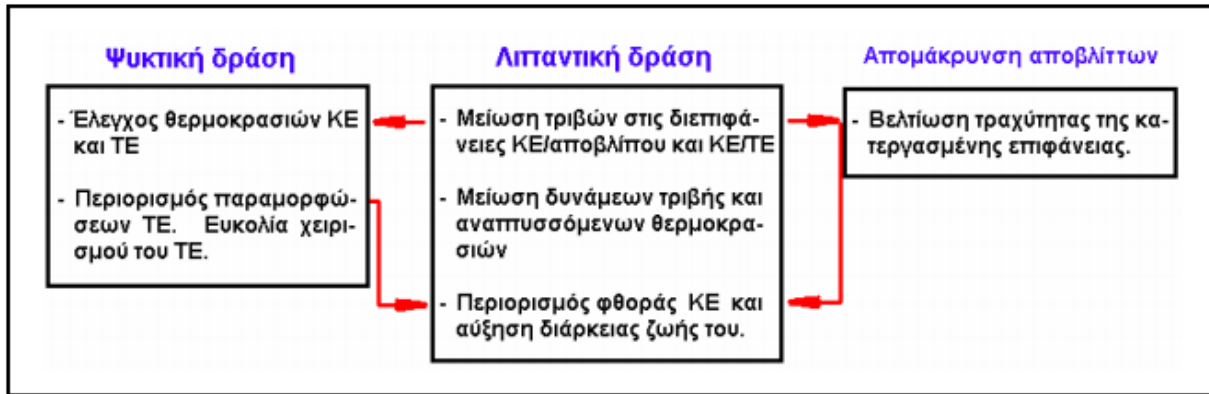


Εικόνα 1.19: Σύστημα αεριοποιημένου μείγματος λιπαντικού (Κυριάκου, 2013)

Συγκεντρωτικά, λοιπόν, έχουμε 3 δράσεις των υγρών κοπής:

- Ψυκτική δράση
- Λιπαντική δράση
- Απομάκρυνση των αποβλίτων

Οι δράσεις αυτές όπως είναι κατανοητό έχουν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στην εικόνα 1.20 (Μανωλάκος, 2011).



Εικόνα 1.20: Αποτελέσματα των δράσεων των υγρών κοπής (Μανωλάκος, 2011)

1.13 Κατεργασία Χωρίς Υγρό Κοπής (Dry Machining)

Όπως αναφέραμε και πριν, η κατεργασία με υγρό κοπής δεν έχει νόημα σε υψηλές τιμές της ταχύτητας κοπής. Στην περίπτωση αυτή τότε εφαρμόζεται η ξηρή κοπή η οποία συγκριτικά είναι πιο δυνατή και (στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων) πιο αξιόπιστη. Παρόλα αυτά, οι θερμικές καταπονήσεις και η συσσώρευση των αποβλήτων εξακολουθούν να είναι πρόβλημα.

Τα προβλήματα αυτά αρχικά αντιμετωπίζονται αρχικά με την σύσταση του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων, έχουμε ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας πράγμα που κάνει την κοπή πιο εύκολη αλλά ταυτόχρονα είναι πολύ πιθανόν να καταστρέψει την ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Για να το αποφύγουμε αυτό, προτιμάται στη ξηρή κοπή τεμάχια τα οποία να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα και μεγαλύτερη μάζα για την ευκολότερη απαγωγή της θερμότητας.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης είναι σωστή επιλογή του κοπτικού εργαλείου. Δηλαδή, απαιτούνται κοπτικά εργαλεία με τη βέλτιστη γεωμετρία για τη μείωση της δύναμης κοπής (αρά και θερμοκρασίας) και επίσης εργαλεία με μεγάλη θερμική αντοχή και σκληρότητα. Κάποια παραδείγματα είναι τα εργαλεία που αποτελούνται από καρβίδιο, κεραμικό και διαμάντι.

Οι εργαλειομηχανές θα μπορούσαν να συμβάλουν στη λύση των προβλημάτων αυτών με την εφαρμογή μιας λειτουργίας απομάκρυνσης αποβλίτου.

Τέλος, οι συνθήκες κοπής μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην επίλυση των προβλημάτων αυτών. Πιο αναλυτικά, πέρα από την ταχύτητα κοπής, με την χρήση υψηλών ταχυτήτων πρόωσης και μεγάλο βάθος κοπής και μεν παράγουν μεγαλύτερο

μέρους αποβλήτου, όμως το απόβλητο απορροφά μαζί του και μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται με αποτέλεσμα να υπάρχει πτώση της θερμοκρασίας (Κυριάκου, 2013).

1.14 Βασικά Στοιχεία Μηχανικής Κατά το Φρεζάρισμα

Πρόωση κοπής s : Είναι η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή εργαλειομηχανής), κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής της κυρίας ατράκτου της εργαλειομηχανής (Spindle) μαζί με εργαλειομηχανή, μετρούμενη σε ίντσες ανά περιστροφή (IPR) ή mm ανά περιστροφή (mm/rev).

Ταχύτητα κοπής: Είναι η στιγμιαία ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο, κατά τη διάρκεια της κοπτικής διαδικασίας, αναγόμενη στην κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου. Μετριέται σε πρόωση επιφανείας ανά λεπτό (Surface Feed Per Minute - SFM) ή σε m/min.

Ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου: Είναι η περιστροφική ταχύτητα του άξονα της εργαλειομηχανής και συνάμα του κοπτικού εργαλείου, μετρούμενη σε περιστροφές ανά λεπτό (Revolutions Per Minute) (RPM).

Ταχύτητα πρόωσης u_v : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακμής του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης.

Αξονικό βάθος κοπής (Axial depth of cut): Είναι το βάθος κοπής του κοπτικού εργαλείου στο υπό κατεργασία τεμάχιο, κατά τη διάρκεια της κοπής. Το βάθος κοπής μετράται κατά μήκος του άξονα του κοπτικού εργαλείου. Τα μεγάλα αξονικά βάθη απαιτούν χαμηλό ρυθμό πρόωσης, διαφορετικά μεταφέρονται στην εργαλειομηχανή υψηλά φορτία, κάτι το οποίο μειώνει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Για να αποφευχθούν αυτά τα φορτία, η κατεργασία διεξάγεται σε διαφορετικά περάσματα (πάσα). Σε αυτή την περίπτωση το κοπτικό εργαλείο μετατοπίζεται σε διακριτά και καθορισμένα βάθη κοπής ανά πάσο.

Ακτινικό βάθος κοπής (axial depth cut): Είναι το βάθος κοπής κατά μήκος της ακτίνας του κοπτικού εργαλείου στο υπό κατεργασία τεμάχιο. Εάν το ακτινικό βάθος κοπής είναι μικρότερο από την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου, τότε κόβει τμηματικά και διεξάγει περιφερικό φρεζάρισμα. Εάν το ακτινικό βάθος κοπής ισούται με τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου, τότε εισχωρεί πλήρως στο υπό κατεργασία τεμάχιο και δημιουργεί θυλάκια (Slots). Τα μεγάλα ακτινικά βάθη κοπής απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς πρόωσης, διαφορετικά το κοπτικό εργαλείο θα καταπονηθεί με υψηλά φορτία και θα μειωθεί ο χρόνος ζωής του.

Για το λόγο αυτό, η κατεργασία εξελίσσεται σε διάφορα στάδια, όσο το κοπτικό εργαλείο κινείται εντός της απόστασης Step-Over και διεισδύει στο επιθυμητό ακτινικό βάθος κοπής.

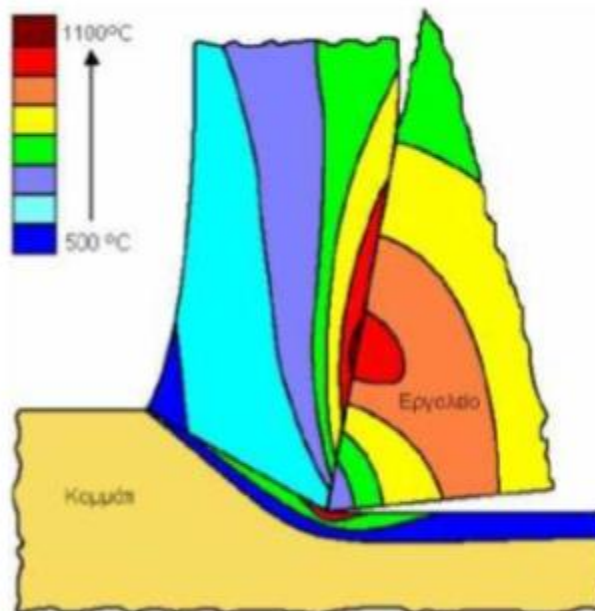
Απόσταση διαδοχικού βηματισμού (step over distance): Η κατεργασία με φρεζάρισμα μιας γεωμετρίας, η οποία είναι μεγαλύτερης έκτασης από το πλάτος του κοπτικού εργαλείου, θα πρέπει να διεξαχθούν διαδοχικές κοπές, οι οποίες εκτελούνται βαθμιδωτά

και διαδοχικά η μια μετά την άλλη, με τρόπο τέτοιο που μοιάζει με διαδοχικούς βηματισμούς του κοπτικού. Η απόσταση διαδοχικού βηματισμού (Step-Over) είναι ταυτόσημη με το ακτινικό βάθος κοπής κάθε πάσου και πρέπει να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της διαμέτρου του κοπτικού (Κυριάκου, 2013) (Τοτόνης, 2012).

1.15 Φθορά Κοπτικών Εργαλείων

Η ταχύτητα κοπής και παραγωγής επηρεάζουν τη ζωή του κοπτικού εργαλείου, η οποία αποτελεί τον σημαντικότερο οικονομικό παράγοντα κοπής μετάλλων. Αν και η μείωση της ταχύτητας κοπής αυξάνει τη ζωή του εργαλείου μειώνει τη ταχύτητα παραγωγής. Εν αντιθέσει η ταχύτητα παραγωγής αυξάνεται από την ταχύτητα κοπής προϋποθέτοντας αφενός περισσότερες αλλαγές φθαρμένων κοπτικών εργαλείων επιφέροντας αφετέρου αύξηση του κόστους.

Οι υψηλές θερμοκρασίες καθώς και η αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ εργαλείου και αποβλίτου φθείρουν το κοπτικό εργαλείο. Η ανάπτυξη των θερμοκρασιών προκύπτουν από τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική λόγω της τριβής στη περιοχή κοπής. Το απόβλιτο δημιουργεί τριβή στην επιφάνεια του εργαλείου και η κατεργασμένο επιφάνεια στο κάτω τμήμα της μύτης του εργαλείου. Το υλικό του εργαλείου οξειδώνεται από τις υψηλές θερμοκρασίες και συνεπώς αυξάνεται η ταχύτητα φθοράς του. Στην εικόνα 1.21 φαίνεται πώς κατανέμεται συνήθως η θερμότητα στην ζώνη κοπής (Κυριάκου, 2013).



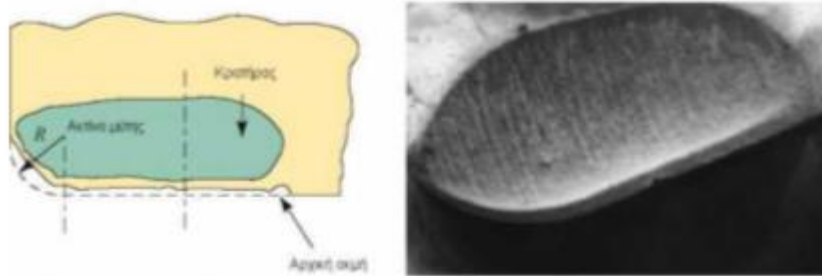
Εικόνα 1.21 : Συνήθης κατανομή θερμότητας στην ζώνη κοπής (Κυριάκου, 2013)

Κατά την κοπή η μείωση της υψηλής θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με τη χρήση ψυκτικών υγρών. Αυτά απομακρύνουν εξίσου το απόβλιτο από τη περιοχή κοπής. Εκτός

αυτού χρήση των υγρών κοπής πραγματοποιείται στις κατεργασίες σκληρών υλικών καθώς και χαμηλών ταχυτήτων κοπής. Με την πάροδο του χρόνου και την τεχνολογική ανάπτυξη το υλικό των κοπτικών εργαλείων έχει βελτιωθεί και έχει επιτρέψει την εφαρμογή τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη ψυκτικών υγρών παρά μόνο πεπιεσμένου αέρα προκειμένου να απομακρύνονται τα απόβλητα..

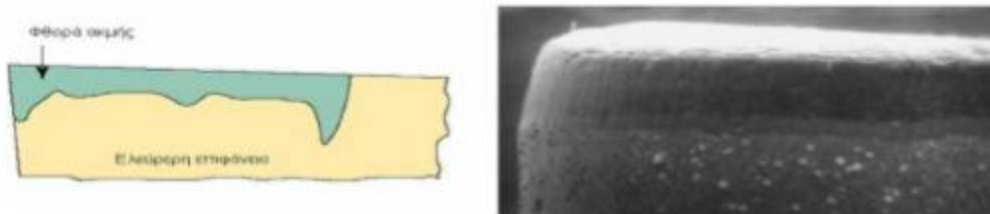
Η φθορά των κοπτικών εργαλείων μπορεί να διακριθεί εύκολα κατά την κατεργασία και πριν την αστοχία του εργαλείου. Δείγματα φθοράς αποτελούν η κατανάλωση περισσότερης ενέργειας, η τραχύτητα της κατεργασμένα επιφάνειας και η αλλαγή γεωμετρία του αποβλήτου.

Η τριβή του αποβλήτου στο κοπτικό εργαλείο μπορεί να το οδηγήσει σε φθορά με τη δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια(εικόνες 1.22 και 1.23). Βασικοί παράγοντες φθοράς είναι η υψηλή ταχύτητα κοπής και η κατεργασία σκληρών υλικών. Τέλος, η ακμή του κοπτικού εργαλείου μπορεί να φθαρεί όταν αυτή τρίβεται με την κατεργασμένο επιφάνεια του κομματιού (Κυριάκου, 2013).



Εικόνα 1.22 : Φθορά κρατήρα (Κυριάκου, 2013)

Η προαναφερθείσα φθορά δύσκολα μπορεί να προληφθεί ενώ εμφανίζεται σε όλα τα εργαλεία.



Εικόνα 1.23 : Φθορά ακμής β (Κυριάκου, 2013).

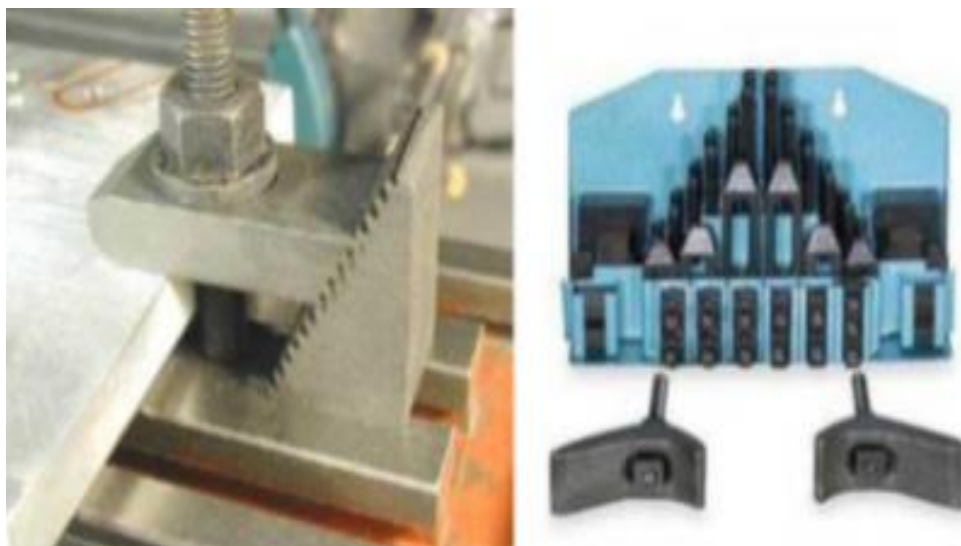
1.16 Τρόποι Συγκράτησης Ακατέργαστων Τεμαχίων

Οι συνήθεις τρόποι συγκράτησης ακατέργαστων τεμαχίων είναι οι εξής:

1. Στη μέγγενη (εικόνα 1.24)
 - Με σιαγόνες που κινούνται και οι δύο ταυτόχρονα
 - Με βάση στρέψεως
 - Με σιαγόνες τύπου V για κυλινδρικά τεμάχια
2. Με κοχλίες (Clamping sets) (εικόνα 1.25)
3. Σε επιτραπέζιο τσοκ (που προσδένεται πάνω στην τράπεζα- Chuck) (εικόνα 1.26)
4. Ηλεκτρομαγνητικό Chuck (εικόνα 1.27) (Κυριάκου, 2013)



Εικόνα 1.24 : Οριζόντια και γωνιακή μέγγενη (Κυριάκου, 2013)



Εικόνα 1.25 : Συγκροτήματα σύσφιξης (Κυριάκου, 2013)



Εικόνα 1.26 : Επιτραπέζιο τσοκ (Κυριάκου, 2013)

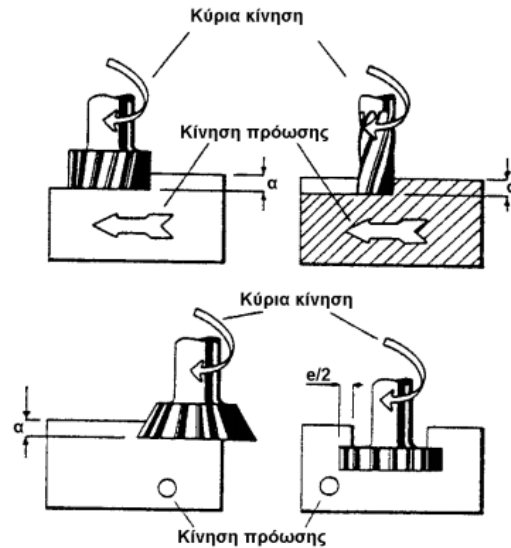
Εικόνα 1.27 : Ηλεκτρομαγνητική πλάκα (Κυριάκου, 2013)

Παρακάτω θα δούμε και πιο αναλυτικά πώς τοποθετούμε το τεμάχιο στο μετωπικό φρεζάρισμα.

1.17 Μετωπικό Φρεζάρισμα και κατάλληλα κοπτικά εργαλεία.

1.17.1 Τι είναι το μετωπικό φρεζάρισμα

Ένα από τα σημαντικότερα είδη φρεζαρίσματος, όπως προαναφέρθηκε, το οποίο αποτελεί αντικείμενο μελέτης, είναι το μετωπικό. Το μετωπικό φρεζάρισμα, γενικά, ορίζεται ως η διαδικασία κοπής επιφανειών που είναι κάθετες στον άξονα κοπής ή οι όψεις ενός τμήματος. Στη παρακάτω εικόνα (1.28) βλέπουμε πως λειτουργεί:



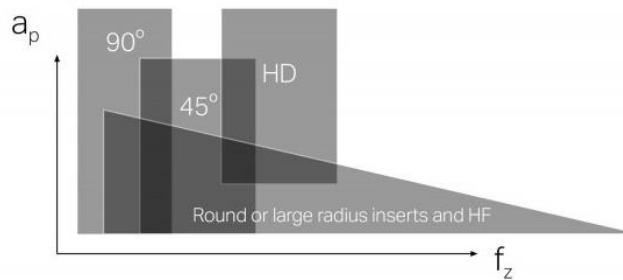
Εικόνα 1.28: Παραδείγματα μετωπικού φρεζαρίσματος (Μανωλάκος, 2011).

Στο μετωπικό φρεζάρισμα παράγονται επίπεδες επιφάνειες και οι μηχανές λειτουργούν στο απαιτούμενο μήκος. Επιπλέον, η πρόωση μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.

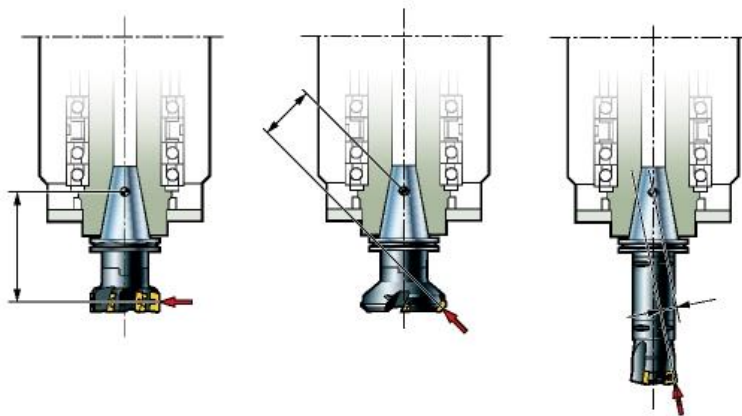
1.17.2 Κοπτικά εργαλεία στο μετωπικό φρεζάρισμα

Στο μετωπικό φρεζάρισμα, τα δόντια στην περιφέρεια του κόπτικού εργαλείου πραγματοποιούν στην ουσία όλη την κοπή. Ωστόσο, όταν ο κοπτήρας είναι σωστά κατασκευασμένος, τα δόντια της επιδερμίδας αφαιρούν μια μικρή ποσότητα υλικού που αφήνεται ως αποτέλεσμα της ελατηρίου του τεμαχίου ή του κοπτήρα, παράγοντας έτσι ένα λεπτότερο φινίρισμα.

Το μετωπικό φρεζάρισμα είναι η πιο συνηθισμένη λειτουργία φρεζαρίσματος και μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών κοπτικών εργαλείων. Οι κοπτήρες με γωνία εισόδου 45° χρησιμοποιούνται συχνότερα, αλλά χρησιμοποιούνται και στρογγυλοί κοπτήρες ένθετων τεμαχίων όπως και πλευρικοί ή μετωπικοί κοπτήρες για ορισμένες συνθήκες. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την κύρια περιοχή εφαρμογής για διαφορετικά σενάρια κοπής, όσον αφορά το βάθος κοπής a_p και προς τη πρόωση ανά δόντι, f_z (Εικόνα 1.29) (Face milling)



Εικόνα 1.29 : a_p : Βάθος κοπής f_z : Πρόωση ανά δόντι (Face milling).



Εικόνα 1.30 : Κατεύθυνση των δυνάμεων κοπής που παράγονται από διαφορετικές γωνίες εισόδου (Face milling).

Ανάλογα με το είδος και τη λεπτομέρεια της κοπής, χρησιμοποιούμε κοπτικά εργαλεία με μεγάλο εύρος γωνιών όπως δηλαδή 10° - 65° αλλά και 90° . Στην εικόνα 1.30, κίόλας, φαίνεται πως επηρεάζονται οι κατεύθυνσης των δυνάμεων κοπής από τα διάφορα είδη γωνιών. Τα πιο δημοφιλή κοπτικά εργαλεία είναι αυτά των 45° και 90° . Παρακάτω βλέπουμε το γιατί:

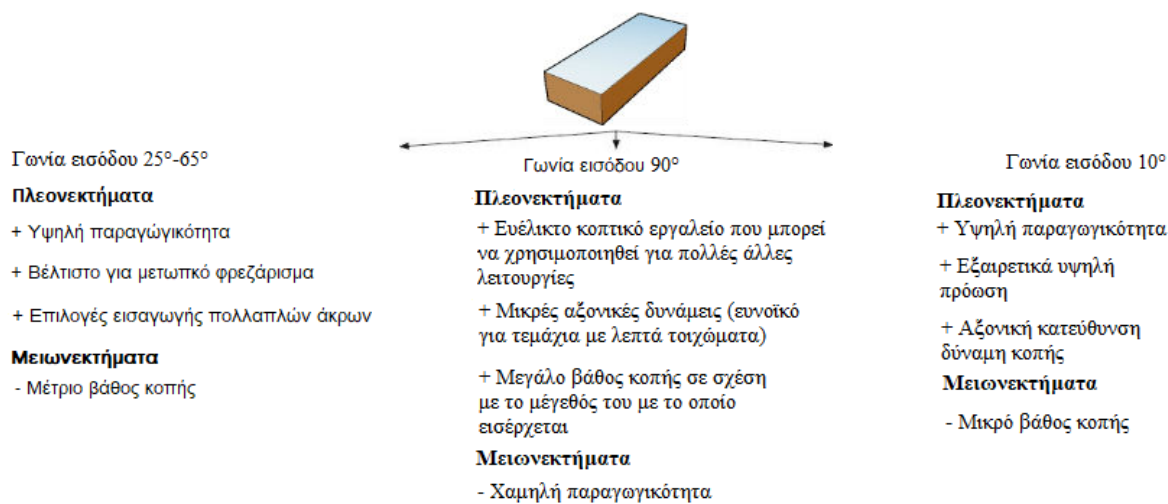
45° γωνία

- Πρώτη επιλογή για γενικούς σκοπούς.
- Μείωση των δονήσεων σε μεγάλες προεξοχές και σε αδύναμες ρυθμίσεις.
- Η δημιουργία λεπτών ριτισμάτων επιτρέπει την αύξηση της παραγωγικότητας.

90° γωνία

- Όπου απαιτείται φόρμα 90°
- Σε τεμάχια με λεπτά τοιχώματα
- Σε ευαίσθητα εξαρτήματα

Μέσα από πειράματα και παραδείγματα, βγήκαν τα εξής συμπεράσματα για τις διάφορες γωνίες που μπορεί να έχει ένας κοπτήρας όσο αφορά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 1.31.

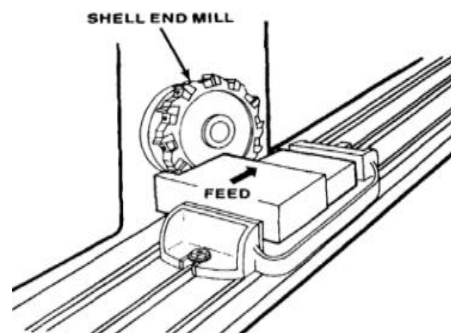


Εικόνα 1.31: Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα σε εύρος γωνιών (Face milling).

Παρατηρείται ότι στο μετωπικό φρεζάρισμα το πιο σύνηθες κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι ο κοπτήρας κελύφους (shell mill). Δεν είναι τυχαίο που ονομάζονται και μετωπικοί κοπτήρες. (εικόνα 1.32)

Οι κοπτήρες κελύφους έχουν πολλά ένθετα στο εξωτερικό άκρο του κόπτη, οπότε όταν ο κοπτήρας χτυπήσει πρώτα το υλικό, αφαιρεί μια μικρή ποσότητα υλικού - ανάλογα με το βάθος κοπής. Καθώς ο κοπτήρας περνάει πάνω από το τεμάχιο εργασίας, τα άλλα δόντια δουλεύουν πραγματικά για να αφαιρέσουν το απόθεμα που έμεινε ως τσουγκράνα ή ως αποτέλεσμα της αναπήδησης του τεμαχίου ή του κοπτικού εργαλείου. Εφόσον όλα τα ένθετα στο εργαλείο είναι επίπεδα και ομοιόμορφα, έχει ως αποτέλεσμα ένα φινίρισμα υψηλής ποιότητας.

Οι κοπτήρες κελύφους είναι επίσης κατάλληλοι για την κοπή των περισσότερων υλικών. Μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις όπου να χρειαστεί να αλλαχθούν ένθετα στον κοπτήρα για την κοπή ενός διαφορετικού υλικού, αλλά το εργαλείο είναι αρκετά ανθεκτικό για να χειριστεί τα περισσότερα υλικά που θα χρειαστεί να κόψει. Στην εικόνα 1.33 φαίνεται πώς λειτουργεί ο κοπτήρας κελύφους στο μετωπικό φρεζάρισμα (TORMACH LABS).



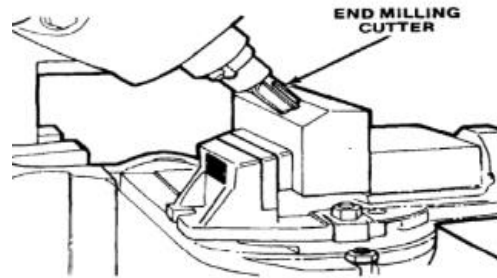
Εικόνα 1.32 : Shell Mill (TORMACH LABS) βοήθεια

Εικόνα 1.33 : Μετωπικό φρεζάρισμα με τη shell mill (Smithy)

Τέλος, υπάρχουν και τα κοπτικά εργαλεία που ονομάζονται κοπτήρες άκρου (end mills) (εικόνα 1.34) , οι οποίοι είναι οι λιγότερο αποτελεσματικοί (όσον αφορά το μετωπικό φρεζάρισμα), αλλά βοηθούν στην πραγματοποίηση του γωνιακού μετωπικού φρεζαρίσματος (εικόνα 1.35).



Εικόνα 1.34: End Mill (Thepsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008).



Εικόνα 1.35:Γωνιακό Μετωπικό Φρεζάρισμα με τη βοήθεια End Mill (Smithy).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κοπτικών εργαλείων end mills είναι τα εξής:

- Τμήμα ατράκτου κοπτικού (Shank)
- Γωνία Ελίκωσης (Helix Angle)
- Ενεργός επιφάνεια-κανάλι κοπής (Φτερό — Flute)
- Εξωτερική Διάμετρος (Outside Diameter)
- Μήκος Κοπής (Cutting Length)
- Συνολικό Μήκος (Overall Length)

(Face milling)

1.17. 3 Τοποθέτηση τεμαχίου εργασίας

Κατά το μετωπικό φρεζάρισμα το τεμάχιο εργασίας πρέπει να συσφίγγεται στο τραπέζι ή στη γωνιακή πλάκα ή να στηρίζεται σε μέγγενη, στήριγμα ή σε κάποια διάταξη. Το μετωπικό φρεζάρισμα μεγάλων επιφανειών γίνεται σε μια κάθετη μηχανή με το τεμάχιο εργασίας να στερεώνεται απευθείας στο τραπέζι φρεζαρίσματος για να απλοποιήσει τις διαδικασίες χειρισμού και σύσφιξης.

Επίσης, μετωπικό φρεζάρισμα πραγματοποιείται σε γωνιακές επιφάνειες πάνω σε μια περιστρεφόμενη μηχανή φρεζαρίσματος κοπτικής κεφαλής. Σε αυτή την περίπτωση, το τεμάχιο εργασίας είναι τοποθετημένο παράλληλα στο τραπέζι και η κεφαλή κοπής περιστρέφεται για να φέρει το άκρο του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια που πρόκειται να παραχθεί.

Κατά τη διάρκεια των εργασιών του μετωπικού φρεζαρίσματος, η πρόωση του κοπτικού εργαλείου πρέπει να είναι ενάντια στο τεμάχιο έτσι ώστε η πίεση της κοπής να

είναι προς τα κάτω, κρατώντας έτσι το κομμάτι στο τραπέζι. Όποτε είναι δυνατόν, η άκρη του τεμαχίου πρέπει να ευθυγραμμίζεται με το κέντρο του κοπτήρα. Αυτή η θέση του τεμαχίου σε σχέση με το κοπτικό εργαλείο θα βοηθήσει στην εξάλειψη της ολίσθησης (Smithy).

1.18 Μέθοδος Taguchi

1.18.1 Εισαγωγικές έννοιες

Οι μέθοδοι Taguchi είναι στατιστικές μέθοδοι ή μερικές φορές αποκαλούνται ισχυρές μέθοδοι σχεδιασμού οι οποίες εφαρμόστηκαν αρχικά στη διαχείριση ποιότητας με στόχο τον έλεγχο και τη βελτίωση των μεταποιημένων προϊόντων και πιο πρόσφατα βλέπουμε εφαρμογές σε επίλυση μηχανικών προβλημάτων, στη βιοτεχνολογία, μάρκετινγκ και διαφήμιση. Από τη δεκαετία του 1920 εφαρμοζόταν παρόμοιες στατιστικές τεχνικές, για την διαχείριση ποιότητας, στην General Electric από τον B.P. Dudding και στα Bell Laboratories από τους W.A. Shewhart, H.F. Dodge και H. G. Romig. Παρόλο που οι πρώτες στατιστικές εφαρμογές στον χώρο της ποιότητας αναπτύχθηκαν πριν από τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο στην Αγγλία και την Αμερική, η βιομηχανία της Δύσης έμεινε πολύ πίσω από την Ιαπωνική βιομηχανία στην γενικευμένη εφαρμογή των στατιστικών μεθόδων για έλεγχο και βελτίωση της ποιότητας. Γι αυτό λοιπόν, ο Δυτικός βιομηχανικός κόσμος, επικεντρώθηκε τα τελευταία χρόνια σε μία προσπάθεια εξερεύνησης των μεθόδων παραγωγής που εφαρμόζονται σε επιχειρήσεις στην Ιαπωνία, ώστε να μπορέσει να δώσει μια εξήγηση στο φαινόμενο που είναι γνωστό με το όνομα «Ιαπωνική επανάσταση», καθώς και την ικανότητα για παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος. Το συμπέρασμα της έρευνας αυτής ήταν ότι η διαχείριση των ποιοτικών ελέγχων των Ιαπωνικών προϊόντων, βασίζεται σε γνωστές στατιστικές μεθόδους που ανακαλήφθηκαν εδώ και 50 χρόνια από επιστήμονες στατιστικολόγους του δυτικού κόσμου.

Οι μέθοδοι Taguchi, ως οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι, αποσκοπούν στην ελάττωση του παραγωγικού κόστους και την ποιοτική βελτίωση των προϊόντων μέσω του στατιστικού ποιοτικού ελέγχου πριν από την έναρξη της μαζικής παραγωγής. Ο εφευρέτης των μεθόδων αυτών, Genichi Taguchi, γεννήθηκε σε μία πόλη της Ιαπωνίας, την Τομακάτση. Σπούδασε μηχανικός κλωστουφαντουργίας και πήρε το διδακτορικό του το 1962 από το πανεπιστήμιο Kyushu. Ο Taguchi εργάστηκε ως μηχανικός της ιαπωνικής βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών, ενώ αργότερα διετέλεσε διευθυντής της Ιαπωνικής Ακαδημίας για την Ποιότητα και έχει τιμηθεί 4 φορές με το βραβείο «Deming». Φαίνεται, λοιπόν, ότι ο Taguchi έχει συντελέσει σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη της Ιαπωνικής βιομηχανίας αναβαθμίζοντας την κλειστή συνεργασία στατιστικολόγων με μηχανικών και συνεπώς τη σωστή χρήση των στατιστικών μεθόδων στη βιομηχανία (Θεοχαρίδου, 2011).

1.18.2 Εισαγωγή στον παραμετρικό σχεδιασμό

Ο Genichi Taguchi (1987) επινόησε μία τεχνική βελτίωσης η οποία χρησιμοποιεί τις μεθόδους του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων (Statistical Design of Experiments) για τον αποτελεσματικό χαρακτηρισμό ενός προϊόντος ή των μέσων παραγωγής (όσον αφορά την ποιότητα), σε συνδιασμό με τη στατιστική ανάλυση της διασποράς τους, με κύρια επιδίωξη την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας με το χαμηλότερο κόστος. Η μέθοδος του Taguchi, με τη βοήθεια του παραμετρικού σχεδιασμού, εφαρμόζει την αρχή της αλλαγής πολλών παραγόντων κάθε φορά, πράγμα που κοστίζει λιγότερο και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα εν γένει (Θεοχαρίδου, 2011).

1.18.3 Η μεθοδολογία της μεθόδου

Ο Taguchi με τη βοήθεια του παραμετρικού σχεδιασμού, στοχεύει στο να μειωθεί η μεταβλητότητα ενός προϊόντος ή ενός συστήματος. Πιο αναλυτικά, ορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος με αρνητικό τρόπο, δηλαδή ως την απώλεια που μεταβιβάζεται στην κοινωνία μας από τη στιγμή που της αποστέλλεται το προϊόν. Η απώλεια αυτή συμπεριλαμβάνει εν γένει και το κόστος, το οποίο προέρχεται από την απόρριψη των προϊόντων που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές, από τα έξοδα του ποιοτικού ελέγχου, από τη συντήρηση ή αντικατάσταση επιστρεφόμενης παραγωγής που πωλήθηκε με εγγύηση και χάσιμο πελατών που προέρχεται από την κακή ποιότητα του προϊόντος. Το σημαντικότερο όμως, είναι ότι σύμφωνα με τον Taguchi, ένα προϊόν προξενεί απώλεια όχι μόνο όταν βρίσκεται εκτός προδιαγραφών, αλλά και όταν παρεκκλίνει του στόχου του. Κάθε πρόγραμμα ποιοτικής βελτίωσης θα πρέπει να έχει βασικό του στόχο την ελαχιστοποίηση της διασποράς της απόδοσης του προϊόντος σε σχέση με το στόχο του. Όσο μικρότερη είναι η διασπορά της απόδοσης, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση από το στόχο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απώλειά του. Η απώλεια αυτή μετρείται από τη συνάρτηση απώλειας (loss function) του Taguchi, η οποία ενοποιεί την απώλεια με τις προδιαγραφές λειτουργίας μέσω μίας τετραγωνικής σχέσης (Θεοχαρίδου, 2011).

Η απώλεια αυτή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της απόκλισης από το στόχο. Η παρακάτω συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση απώλειας (loss function), όπως αναφέραμε και παραπάνω, η $L(y)$:

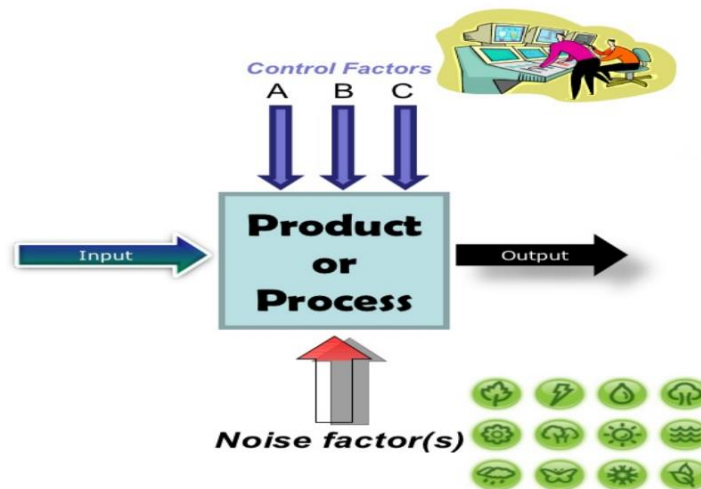
$$L(y) = k (y - t)^2 \quad (1.1)$$

όπου y η απόδοση του προϊόντος, t ο προκαθορισμένος στόχος και k το πηλίκο της απώλειας M προς το τετράγωνο της ανοχής D (προδιαγραφές). Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μία γραφική παράσταση της απώλειας $L(y)$ για την κοινωνία, όταν η απόδοση y αποκλίνει από το επιθυμητό στόχο t .

Σύμφωνα με τον Taguchi, δύο είναι οι κατηγορίες παραγόντων που επηρεάζουν την απόκλιση ενός προϊόντος από τον επιθυμητό στόχο: (i) Οι **ελεγχόμενοι παράγοντες** και (ii) οι **μη ελεγχόμενοι παράγοντες**. Οι ελεγχόμενοι παράγοντες (controllable factors) είναι αυτοί των οποίων οι τιμές μπορούν να αλλάξουν/ρυθμιστούν από τον χρήστη της μεθόδου. Οι παράγοντες αυτοί με τη σειρά τους χωρίζονται σε υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία είναι οι **παράγοντες διασποράς** (variability control factors) οι οποίοι,

όπως λέει άλλωστε και το όνομα τους, είναι αυτοί που επηρεάζουν τη διασπορά του αποτελέσματος. Έπειτα, έχουμε τους **παράγοντες ελέγχου του στόχου** (target control factors) οι οποίοι επιδρούν στο μέσο του αποτελέσματος. Τέλος, οι **παράγοντες κόστους** είναι αυτοί που μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να υπάρχει μία ισορροπία στις οικονομικές απαιτήσεις.

Οι **μη ελεγχόμενοι παράγοντες** ή, όπως είναι γνωστοί, **οι παράγοντες θορύβου** (noise factors) (εικόνα 1.36) είναι αυτοί των οποίων οι τιμές δεν μπορεί να ελέγξει ο χειριστής της μεθόδου και είναι πηγές διασποράς που επηρεάζονται συνήθως από το περιβάλλον της παραγωγής ή τη λειτουργία της. Όπως και οι ελεγχόμενοι παράγοντες, έτσι και οι παράγοντες θορύβου χωρίζονται σε υποκατηγορίες. Υπάρχουν οι **εξωτερικοί παράγοντες θορύβου** οι οποίοι έχουν να κάνουν με οποιεσδήποτε συνθήκες του περιβάλλοντος του χώρου όπως η υγρασία, η θερμοκρασία του χώρου, η ποσότητα σκόνης κτλ και υπάρχουν και οι **εσωτερικοί παράγοντες θορύβου** οι οποίοι έχουν να κάνουν με τα σφάλματα και αποκλίσεις που τυχόν έχουν τα μηχανήματα της διαδικασίας. (Θεοχαρίδου, 2011).



Εικόνα 1.36: Εισαγωγή ελεγχόμενων παραγόντων και παραγόντων ελέγχου στο μοντέλο (Balisnomo, 2009).

Ο Taguchi ανέπτυξε τις πειραματικές του θεωρίες χωρίς κάποια ιδιαίτερη επιρροή εκτός των έργων που έγραψε ο R. A. Fisher το 1954. Η μελέτη του Taguchi για το σχεδιασμό των πειραμάτων (Design of Experiment) είναι ιδιοσυγκρασιακή και συχνά λανθασμένη, αλλά περιέχει πολλά στοιχεία που έχουν τεράστια αξία κάνοντας και αρκετές καινοτομίες. Οι βασικές διαφορές που έχουν εντοπιστεί μεταξύ των σχεδιασμό πειραμάτων του Taguchi και τον κλασικό/ παραδοσιακό σχεδιασμό πειραμάτων είναι 4 και είναι οι εξής:

- Στη μέθοδο Taguchi γυπολογίζονται μόνο οι κύριες επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο παραγόντων. Οι αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης θεωρούνται ως ανύπαρκτες.
- Στη μέθοδο Taguchi οι πειραματιστές καλούνται να προσδιορίσουν ποιες αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι σημαντικές πριν πραγματοποιήσουν το πείραμα, μέσω της εμπειρίας τους και της γνώσης που έχουν στο αντικείμενο.

- Οι ορθογώνιοι σχηματισμοί του Taguchi (θα εξηγηθεί παρακάτω) δεν δημιουργούνται στη τύχη αλλά βασίζονται σε κρίσιμη δειγματοληψία.
- Το παραδοσιακό DOE (design of experiment) μεταχειρίζεται το θόρυβο ως ενοχλητικό (μπλοκάρισμα), αλλά ο Taguchi το καθιστά ως το επίκεντρο της ανάλυσης.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η μέθοδος του Taguchi χρησιμοποιεί ορθογώνιους σχηματισμούς (orthogonal arrays) με παράγοντες σε δύο ή τρεις στάθμες. Ο αριθμός των στάθμεων εξαρτάται από την επίδραση του παράγοντα. Δηλαδή αν η επίδραση ενός παράγοντα είναι γραμμική τότε αριθμός των στάθμεων θα είναι 2 ενώ αντίστοιχα αν η επίδραση του δεν είναι γραμμική τότε ο αριθμός των στάθμεων θα είναι 3. Ας δούμε τώρα και πιο πρακτικά πως λειτουργεί αυτό που είπαμε. Έστω C_i ότι είναι η επίδραση ενός παράγοντα i και η επίδραση του είναι γραμμική, τότε οι δοκιμές του παράγοντα αυτού θα γίνουν στις στάθμες:

$$m_i - s_i \quad \text{και} \quad m_i + s_i$$

όπου m_i και s_i είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της C_i αντίστοιχα. Αν, όμως, η C_i δεν έχει γραμμική επίδραση και έχει π.χ. καμπυλόγραμμη τότε οι δοκιμές του παράγοντα i θα γίνουν σε τρεις στάθμες οι οποίες είναι:

$$m_i - s_i \sqrt{3/2}, m_i, m_i + s_i \sqrt{3/2}$$

Την παραπάνω διαδικασία την υλοποιούμε αφού προσδιορίσουμε τους ελεγχόμενους παράγοντες και τους παράγοντες θορύβου τους οποίους και αντιστοιχούμε σε κατάλληλο ορθογώνιο σχηματισμό. Για τα 2 αυτά είδη παραγόντων έχουμε και τα αντίστοιχα 2 είδη σχηματισμών:

- Τον **εσωτερικό σχηματισμό**, ο οποίος αποτελείται από ελεγχόμενους παράγοντες.
- Τον **εξωτερικό σχηματισμό**, ο οποίος αποτελείται από μη ελεγχόμενους παράγοντες.

Τέλος, υπάρχει ο **διασταυρωμένος σχεδιασμός** ο οποίος είναι ένας συνδυασμός των προαναφερθεισών σχηματισμών. Έστω, δηλαδή, ότι για τον εσωτερικό σχεδιασμό υπάρχουν x παρατηρήσεις και για τον εξωτερικό y , τότε ο σχεδιασμός αυτός (διασταυρωμένος) θα αποτελείται από xy παρατηρήσεις για το λόγο της αντιστοιχίας όλων των αγωγών του εσωτερικού σχεδιασμού στους αγωγούς του εξωτερικού (Θεοχαρίδου, 2011).

1.18.4 Τα Βήματα του Taguchi

Για την υλοποίηση της μεθόδου Taguchi, που έχει ως σκοπό την βελτίωση της ποιότητας ενός προϊόντος, είναι 7 και αποδίδονται αναλυτικά παρακάτω:

1. Αρχικά θέτουμε το πρόβλημα και το διατυπώνουμε με σαφήνεια. Επίσης είναι αρκετά σημαντική η κατανόηση του προς επίλυση αποτελέσματος.
2. Προσδιορισμός του αντικειμενικού σκοπού, των προς μελέτη χαρακτηριστικών και της μεθόδου μέτρησης.
3. Συγκέντρωση των ιδεών προκειμένου η ποιότητα ενός προϊόντος ή μίας διαδικασίας να καταστεί στον βέλτιστο βαθμό. Τα άτομα που συνδέονται με την παραγωγική διαδικασία θα πρέπει να καταλήξουν στην αναγνώριση των ελεγχόμενων και μη ελεγχόμενων παραγόντων.
4. Γίνεται σχεδιασμός του πειράματος.
5. Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων μέσω της υλοποίησης των κατάλληλων πειραμάτων.
6. Παρατήρηση των επιπέδων των ελεγχόμενων παραγόντων και έπειτα από ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων γίνεται προσδιορισμός των αντίστοιχων βέλτιστων (επιπέδων).
7. Εκτίμηση της απόδοσης κάτω από τα βέλτιστα επίπεδα που προαναφέραμε.
(Θεοχαρίδου, 2011)

1.18.5 Μέτρα απόδοσης του Taguchi

Στη μέθοδο Taguchi γίνεται να ομαδοποιήσουμε τις παρατηρήσεις σε κάθε εξωτερικό σχηματισμό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κάποιων μέτρων απόδοσης (performance measures). Τα μέτρα αυτά παρέχουν πληροφορίες για το μέσο και τη διασπορά. Λόγω του ότι η ομαδοποίηση γίνεται μόνο στους εξωτερικούς σχηματισμούς (σχηματισμός για τους παράγοντες θορύβου), τα μέτρα αυτά ονομάζονται μέτρα απόδοσης θορύβου (signal-to-noise ratios) και η στατιστική ανάλυση γίνεται βασισμένη σε αυτά. Ο υπολογισμός της ελαχιστοποίησης της απόδοσης (the smaller the better) γίνεται εφικτός με τη μέθοδο Taguchi ως εξής:

$$SNR_S = -10 \log \sum_{i=0}^n y_i^2 / x \quad (1.2)$$

Το άθροισμα Σ ως προς n εννοεί την άθροιση των τιμών της απόκρισης των συνδυασμών αγωγών του εξωτερικού σχηματισμού. Λόγω του όρου « $-10 \log$ », γίνεται

πάντα προσπάθεια για μεγιστοποίηση του SNR_s . Ο υπολογισμός της μεγιστοποίησης της απόδοσης(the larger the better) γίνεται εφικτός με τη μέθοδο Taguchi ως εξής:

$$SNR_s = \sum_{i=0}^n \frac{1}{(y_i^2/n)} \quad (1.3)$$

όπως και στο προηγούμενο, προσπαθούμε να μεγιστοποιήσουμε το SNR_s . Το y_i είναι το αποτέλεσμα των n μετρήσεων για κάθε συνδυασμό παραγόντων θορύβου.

Το παρακάτω μέτρο z , χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα ενός πειράματος είναι δυαδικό πράγμα που σημαίνει επιτυχία ή αποτυχία :

$$z = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{1-p} \right) \quad (1.4)$$

όπου p είναι το ποσοστό επιτυχίας στις n προσπάθειες (Θεοχαρίδου, 2011).

1.19 Λίγα λόγια για την ανάλυση Παλινδρόμησης

Η ανάλυση παλινδρόμησης είναι ένα σύνολο στατιστικών διαδικασιών για την εκτίμηση σχέσεων μεταξύ μεταβλητών. Οι μεταβλητές είναι 2 ειδών: i) οι ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες δεν επηρεάζονται από καμία άλλη μεταβλητή, ii) οι εξαρτώμενες μεταβλητές των οποίων η τιμή τους εξαρτάται από μία ή και περισσότερες μεταβλητές. Η ανάλυση παλινδρόμησης, λοιπόν, μας δείχνει το πώς μεταβάλλεται η τιμή μίας εξαρτώμενης μεταβλητής , μεταβάλλοντας μόνο την μία ανεξάρτητη μεταβλητή και παράλληλα διατηρώντας τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές σταθερές.

Η εξαρτώμενη μεταβλητή όπως είναι προφανές, ορίζεται μέσω μίας σχέσης με την οποία συνδέεται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση/ συνάρτηση παλινδρόμησης (Regression Equation/ Function). Στην ανάλυση παλινδρόμησης, είναι επίσης ενδιαφέρον να χαρακτηρίσουμε τη μεταβολή της εξαρτώμενης μεταβλητής γύρω από την πρόβλεψη της συνάρτησης παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας μια κατανομή πιθανοτήτων.

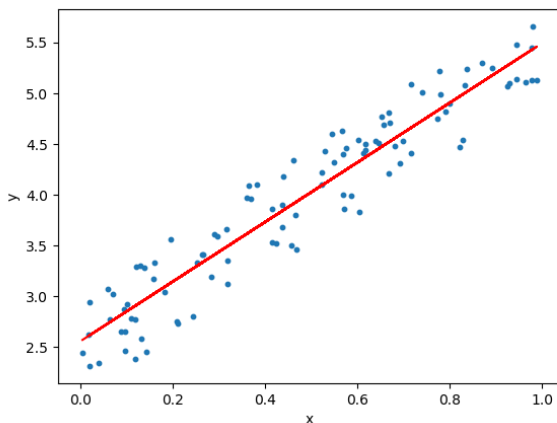
Ο κύριος σκοπός της ανάλυσης παλινδρόμησης είναι η πρόβλεψη των τιμών των εξαρτώμενων μεταβλητών όπως και για την κατανόηση του ερευνητή για το ποιες από τις ανεξάρτητες μεταβλητές σχετίζονται με την εξαρτημένη μεταβλητή και να διερευνήσει τις μορφές αυτών των σχέσεων. Σε περιορισμένες περιπτώσεις, η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθούν αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την επίτευξη της ανάλυσης αυτής. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι είναι η γραμμική παλινδρόμηση και η παλινδρόμηση των ελαχίστων τετραγώνων οι

οποίες είναι και οι δύο παραμετρικές καθώς η συνάρτηση παλινδρόμησης ορίζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό άγνωστων παραμέτρων που εκτιμώνται από τα δεδομένα.

Η απόδοση των μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης στην πράξη εξαρτάται από τη μορφή της διαδικασίας δημιουργίας δεδομένων και από τον τρόπο που σχετίζεται με την προσέγγιση παλινδρόμησης που χρησιμοποιείται. Δεδομένου ότι η πραγματική μορφή της διαδικασίας δημιουργίας δεδομένων δεν είναι γενικά γνωστή, η ανάλυση παλινδρόμησης εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την πραγματοποίηση υποθέσεων σχετικά με αυτή τη διαδικασία. Αυτές οι υποθέσεις είναι μερικές φορές δοκιμαστικές εάν υπάρχει επαρκής ποσότητα δεδομένων. Τα μοντέλα παλινδρόμησης για την πρόβλεψη είναι συχνά χρήσιμα ακόμα και όταν οι παραδοχές παραβιάζονται μέτρια, παρόλο που ενδέχεται να μην λειτουργούν άριστα. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές, ειδικά με μικρά αποτελέσματα ή ζητήματα αιτιότητας που βασίζονται σε δεδομένα παρατήρησης, οι μέθοδοι παλινδρόμησης μπορούν να δώσουν παραπλανητικά αποτελέσματα.

Στην εικόνα 1.37 μας δείχνει το πώς μεταβάλλεται η εξαρτώμενη μεταβλητή (κόκκινη γραμμή) βάση των πραγματικών της τιμών. Οι μπλε κουκίδες που παρατηρούνται γύρω από την κόκκινη ευθεία είναι οι προβλεπόμενες τιμές της μεταβλητής βάση της ανάλυσης παλινδρόμησης. Είναι κατανοητό ότι όσο πιο κοντά είναι μία κουκίδα στην κόκκινη γραμμή, η απόκλιση πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής ελαττώνεται και κατ' επέκταση το σφάλμα μειώνεται.



Εικόνα 1.37: Εικόνα γραμμικής παλινδρόμησης σε ένα σύνολο δεδομένων (Agarwal, 2018).

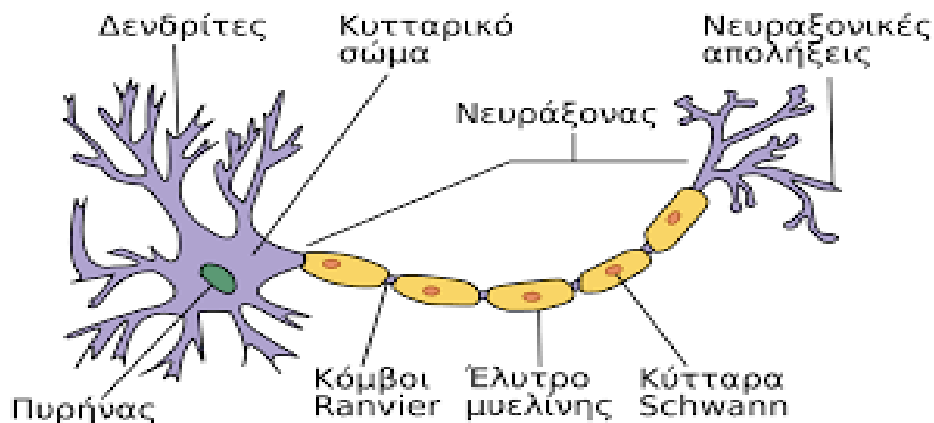
1.20 Νευρωνικά Δίκτυα

Στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπως είναι και η δική μας περίπτωση του μετωπικού φρεζαρίσματος, γίνονται ολοένα και περισσότερες προσπάθειες για την βελτίωση των συνθηκών κοπής (π.χ. ταχύτητα κοπής, πρόωση κτλ). Για την επίτευξη αυτής, αναπτύχθηκαν πολλά στατιστικά και κυρίως μαθηματικά μοντέλα. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Network) αποτελούν ένα τέτοιο μαθηματικό μοντέλο

βελτίωσης.

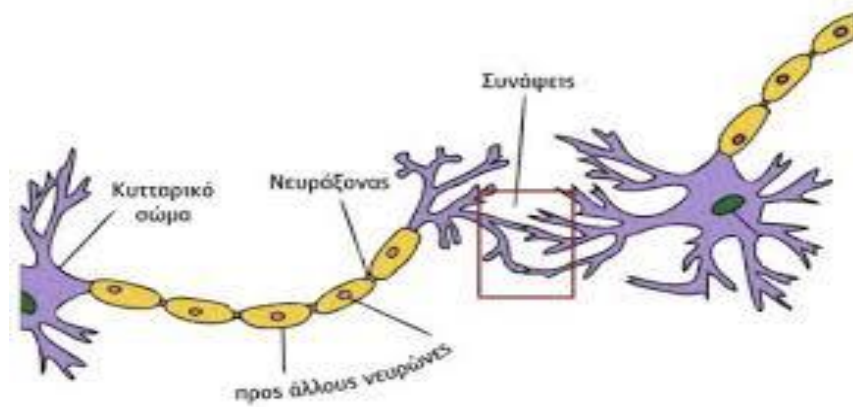
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα προέρχονται από τα αντίστοιχα βιολογικά. Για την ακρίβεια, τα νευρωνικά δίκτυα είναι μία προσομοίωση των αντίστοιχων βιολογικών, οπότε για να γίνει κατανοητή η δομή και η λειτουργία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων θα πρέπει εξ αρχής να κατανοηθούν τα αντίστοιχα βιολογικά. Η κύρια δομική και λειτουργική μονάδα του νευρικού συστήματος είναι το νευρικό κύτταρο που ονομάζεται νευρώνας και εκτελεί τη λειτουργία μεταφοράς και επεξεργασίας πληροφοριών.

Ο νευρώνας αποτελείται από το κυτταρικό σώμα, τον νευράξονα, και τους δενδρίτες. Το σώμα του περιέχει τον πυρήνα του κυττάρου. Ο νευράξονας είναι μια νευρική ίνα που ξεκινάει από το σώμα του κυττάρου και διακλαδίζεται δημιουργώντας δίκτυα με άλλους άξονες και τερματίζει με τις νευραξονικές απολήξεις στο τέλος του νευρώνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.38 (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).



Εικόνα 1.38: Βιολογικός νευρώνας (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).

Οι δενδρίτες είναι οι διακλαδώσεις που προβάλλουν από διάφορα σημεία του άξονα και δημιουργούν δίκτυα και μεταφέρουν και δέχονται ηλεκτρικά σήματα από άλλους νευρώνες. Τα σημεία που οι νευρώνες και οι δενδρίτες διαφορετικών κυττάρων έρχονται σε επαφή και ανταλλάσσουν μηνύματα, λέγονται συνάψεις (εικόνα 1.39). Τα σήματα μεταδίδονται με νευρικές ώσεις με τη βοήθεια χημικών διεργασιών στην περιοχή των συνάψεων. Ένα μόνο νευρικό κύτταρο μπορεί να έχει 30.000 συνδέσεις. Ο εγκέφαλος των θηλαστικών περιέχει από 100 εκατομμύρια ως 100 δισεκατομμύρια νευρώνες, ανάλογα με το είδος. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει περίπου 10^9 νευρικά κύτταρα.



Εικόνα 1.39: Σύναψη βιολογικού νευρώνα (Γεωργούλη, 2015).

Με τρόπο ανάλογο του βιολογικού νευρωνικού κυττάρου κατασκευάζεται και λειτουργεί ο τεχνητός νευρώνας.

1.20.1 Ιστορική Αναδρομή

Μελετώντας τους μηχανισμούς σκέψης και λειτουργίας του εγκεφάλου δημιουργήθηκε η ιδέα του τεχνητού νευρώνα και της τεχνικής νοημοσύνης. Το 1943 ο Warren McCulloch και ο Walters Pitts περιέγραψαν το πρώτο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, παίρνοντας έμπνευση από το βιολογικό νευρικό σύστημα. Το πρώτο μοντέλο είχε δύο εισόδους και μόνο μια έξοδο.

Στο βιβλίο του ο Hebb το 1949 με τίτλο «Organization of Behaviour», περιέγραψε την άποψη ότι η συνδεσιμότητα του εγκεφάλου μεταβάλλεται συνεχώς, αφού ανταποκρίνεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Επίσης διατύπωσε τον κανόνα μάθησης του Hebb σύμφωνα με τον οποίο όσο πιο πολύ ενεργοποιείται μια σύναψη τόσο πιο πολύ ενισχύεται και το δίκτυο βελτιώνει τη μάθηση ως προς το πρότυπο που εμφανίζεται κάθε φορά.

Το 1957 ο Rosenblatt κατασκεύασε χρησιμοποιώντας υλικό (hardware), το μοντέλο του απλού αισθητήρα, perceptron, το πιο παλιό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται ακόμα. Το 1959 οι Widrow και Hoff ανέπτυξαν μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων, το ADALINE και MADALINE που εφαρμόστηκαν πρακτικά και αντιμετώπισαν αποτελεσματικά το πρόβλημα της ηχούς στις τηλεφωνικές γραμμές.

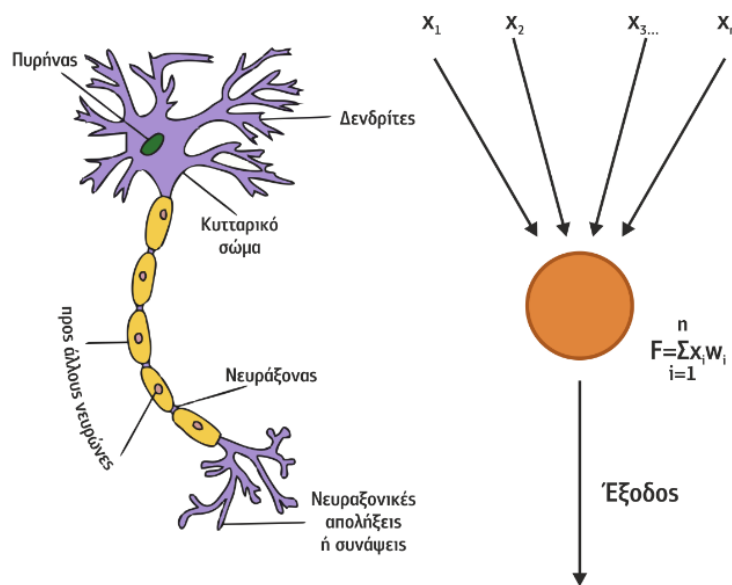
Το 1982 ο Hopfield με τη μελέτη του για τα νευρωνικά δίκτυα αναθέρμανε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και απέδειξε ότι τα νευρωνικά δίκτυα πολλών επιπέδων μπορούσε να αποθηκεύσει οποιαδήποτε πληροφορία. Τις τελευταίες δεκαετίες, με τη βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των αλγορίθμων το ενδιαφέρον για τα ΤΝΔ και τις εφαρμογές τους είναι τεράστιο και η πρόοδος που σημειώνεται από τους ερευνητές είναι ραγδαία (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).

1.20.2 Τεχνητός Νευρώνας

Με τρόπο ανάλογο του βιολογικού νευρωνικού κυττάρου κατασκευάζεται και λειτουργεί ο τεχνητός νευρώνας. Οι τεχνητοί νευρώνες είναι συγκεντρωμένοι σε στρώσεις. Τα διάφορα στρώματα έχουν διαφορετικούς τρόπους μετασχηματισμού στις εισόδους τους. Τα σήματα ταξιδεύουν από το πρώτο στρώμα, «στρώμα εισόδου», μέχρι «στρώμα εξόδου», πιθανόν αφού έχουν διασχίσει τα στρώματα πολλές φορές.

Ο αρχικός σκοπός ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου ήταν να προσεγγίσει και να λύσει τα προβλήματα, με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο ένας ανθρώπινος εγκέφαλος θα μπορούσε. Όμως ο ανθρώπινος εγκέφαλος περιλαμβάνει λειτουργίες μάθησης και αποθήκευσης πληροφοριών που είναι τόσο πολύπλοκες και συμβαίνουν ταυτόχρονα ώστε τα τεχνητά δίκτυα δεν μπορούν να πλησιάσουν, προς το παρόν τουλάχιστον. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα όμως έχουν την ικανότητα να διεκπεραιώνουν με μεγάλη ταχύτητα υπολογισμούς που ο άνθρωπος δεν θα μπορούσε να κάνει σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Πάντως με τον καιρό προσοχή δόθηκε σε διεκπεραίωση συγκεκριμένων εργασιών με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, αποκλίνοντας από την βιολογία και δημιουργώντας ανεξάρτητο τομέα. Στην εικόνα 1.40 παρουσιάζεται ο φυσικός νευρώνας και ο στοιχειώδης τεχνητός νευρώνας (Perceptron) (Γεωργούλη, 2015).



Εικόνα 1.40: Ο φυσικός νευρώνας σε σχέση με τον στοιχειώδη τεχνητό νευρώνα (Perceptron).

1.20.3 Μαθηματικό μοντέλο ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

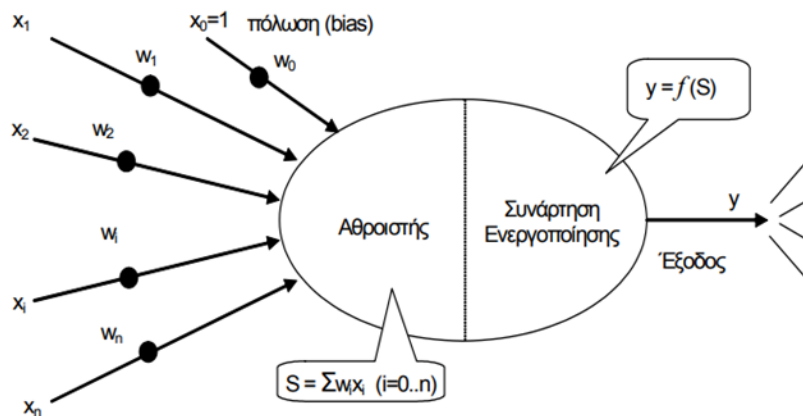
Στο ΤΝΔ υπάρχουν τρία είδη νευρώνων: Οι νευρώνες εισόδου , οι νευρώνες εξόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες ή κρυμμένοι νευρώνες.

- Οι νευρώνες εισόδου μεσολαβούν στα εξωτερικά περιβαλλοντικά ερεθίσματα και στο δίκτυο, δηλαδή εισάγουν στο δίκτυο το σήμα.
- Οι υπολογιστικοί νευρώνες λαμβάνουν τα σήματα από τους νευρώνες εισόδου και πολλαπλασιάζουν το καθένα με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος. Στο τέλος υπολογίζουν το άθροισμα των γινομένων. Το άθροισμα αυτό τροφοδοτεί τη συνάρτηση ενεργοποίησης στο εσωτερικό του κάθε κόμβου.
- Οι νευρώνες εξόδου εμφανίζουν τα αποτελέσματα ,δηλαδή την τιμή της συνάρτησης ενεργοποίησης (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).

$$\text{Ισχύει: } y_k = \phi\left(\sum_{i=0}^N x_{ki} w_{ki}\right) \quad (1.5)$$

όπου x_{ki} είναι η i -οστή είσοδος του k νευρώνα, w_{ki} το i -οστό συναπτικό βάρος του k νευρώνα και ϕ η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρωνικού δικτύου.

Αυτό που ενδιαφέρει συνήθως είναι η ορθή απεικόνιση με σωστό τρόπο των στοιχείων εισόδου και εξόδου ,δηλαδή το πρόβλημα είναι η υλοποίηση μιας συνάρτησης με πολλές μεταβλητές ,περίπλοκης και με άγνωστο ακριβή τύπο. Οι απεικονίσεις αυτές έχουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας που θα περιγραφούν παρακάτω .Το πλεονέκτημα είναι ότι το ίδιο δίκτυο μπορεί να υλοποιήσει άπειρες διαφορετικές απεικονίσεις (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).



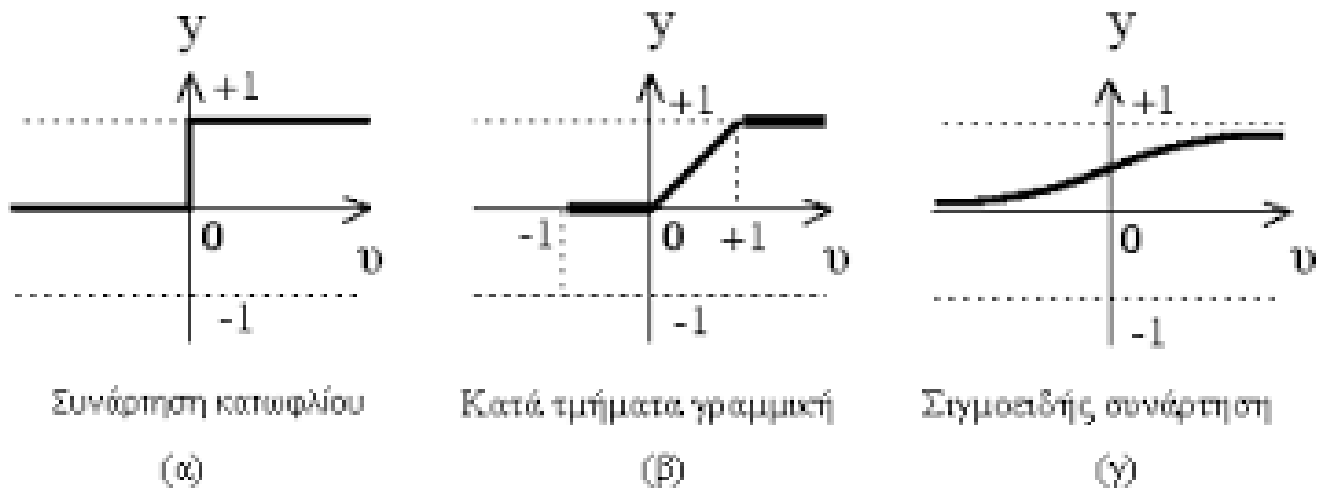
1.41: Μαθηματικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013)

1.20.4 Συναρτήσεις Ενεργοποίησης

Αρχικά οι συναρτήσεις ενεργοποίησης(εικόνα 1.42) ήταν βηματικές για τα πρώτα μοντέλα νευρωνικών δικτύων και έπαιρνε μόνο τις τιμές 0 και 1. Έτσι αν το αποτέλεσμα ήταν μικρότερο από την τιμή κατωφλίου η έξοδος έπαιρνε την τιμή 0, ενώ αν ήταν μεγαλύτερη από την τιμή κατω φλίου η έξοδος ήταν ίση με 1.

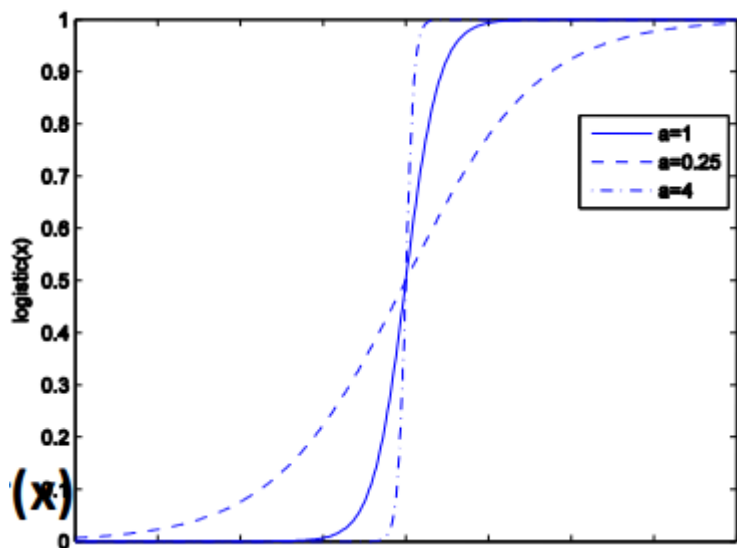
Με την εξέλιξη όμως των Νευρωνικών Δικτύων διπιστώθηκε ότι απαραίτητη στην εκπαίδευση των δικτύων είναι η πρώτη παράγωγος παραγωγος της συνάρτησης ενεργοποίησης , έτσι άρχισαν να χρησιμοποιούνται γραμμικές και μη γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης και όχι η βηματική που δεν παραγωγίζεται.

Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης στα περισσότερα μοντέλα, που είναι μια πραγματική ,φραγμένη και συνεχής συνάρτηση με θετική παράγωγο.

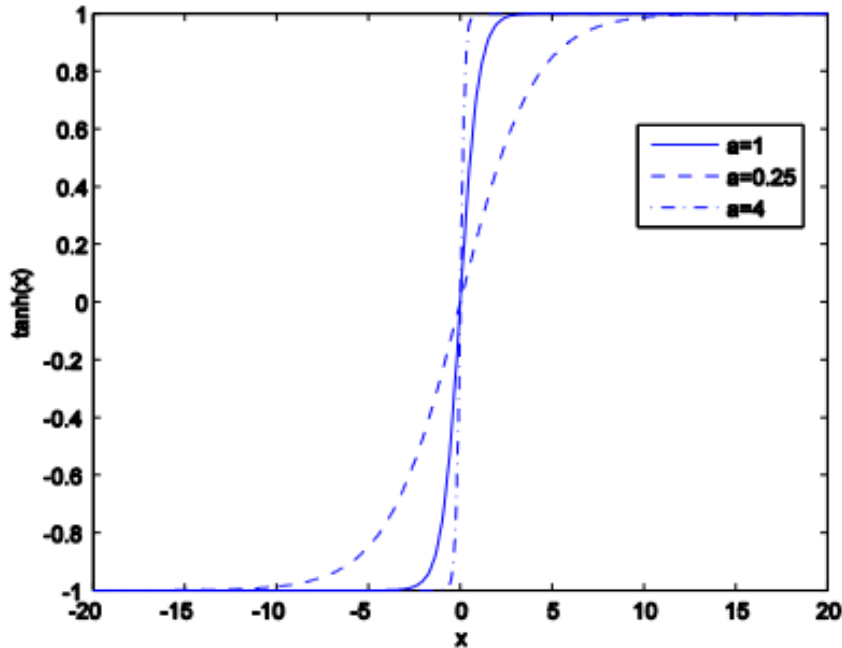


Εικόνα 1.42: Γραφικές παραστάσεις συναρτήσεων ενεργοποίησης (Γαλάνης, 2008).

Πολύ γνωστές συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι η λογιστική συνάρτηση (εικόνα 1.42) ,η υπερβολική συνάρτηση (εικόνα 1.43) και η συνάρτηση τόξου εφαπτομένης (Λύκας).



Εικόνα 1.42: Λογιστική συνάρτηση $\sigma(x) = 1 / (1 + \exp(-ax))$ (Λύκας)



Εικόνα 1.43: Υπερβολική Εφαπτομένη [28] $\tanh(x) = (e^{ax} - e^{-ax}) / (e^{ax} + e^{-ax})$ (Λύκας)

1.20.5 Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων

Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ένα ΤΝΔ πρέπει πρώτα να περάσει το στάδιο της εκπαίδευσης, το οποίο είναι ίσως το πιο κρίσιμο στάδιο στη λειτουργία τους και τη χρήση τους. Η εκπαίδευση τους ουσιαστικά γίνεται με τον προσδιορισμό των κατάλληλων συντελεστών βάρους και πραγματοποιείται με τη βοήθεια αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως κανόνες μάθησης ή αλγόριθμοι εκπαίδευσης. Με τη μάθηση τα Τ.Ν.Δ. εκπαιδεύονται να μαθαίνουν το περιβάλλον τους και να ανταποκρίνονται σε αυτό δίνοντας κατάλληλες τιμές εξόδου.

Σύμφωνα με τους Mendel και McClaren, σχετικά με τα νευρωνικά δίκτυα «Μάθηση είναι μια διαδικασία με την οποία προσαρμόζονται οι ελεύθερες παράμετροι ενός νευρωνικού δικτύου μέσω μίας συνεχούς διαδικασίας διέγερσης από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο». Το είδος της μάθησης ορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι αλλαγές των παραμέτρων. Ανάλογα λοιπόν με την τεχνική της εκπαίδευσης, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα διακρίνονται σε: Δίκτυα με επίβλεψη, δίκτυα χωρίς επίβλεψη και δίκτυα με ενισχυτική μάθηση.

Μάθηση με επίβλεψη: Ο αλγόριθμος έχει εφοδιαστεί με γνωστές εισόδους και επιθυμητές εξόδους και προσπαθεί να κατασκευάσει την κατάλληλη συνάρτηση, ώστε να εφαρμοστεί με τον ίδιο τρόπο, με άγνωστες εξόδους.

Μάθηση χωρίς επίβλεψη: Ο αλγόριθμος γνωρίζει μόνο τις τιμές της εισόδου και προσπαθεί να τις ταξινομήσει, ώστε να βρει αποδεκτές εξόδους, χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό εσωτερικής ανατροφοδότησης και επανάληψης του αλγορίθμου μέχρι την επιθυμητή μείωση του σφάλματος.

Ενισχυτική μάθηση. Μόνο τα διανύσματα εισόδου είναι γνωστά ενώ η έξοδος υπολογίζεται και ελέγχεται με ένα ενισχυτικό σήμα, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες ενέργειες. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι μάθησης, καθένας από τους οποίους έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και η επιλογή τους εξαρτάται από το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπίσουν (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).

Οι αλγόριθμοι διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο που μετατρέπουν τους συντελεστές των συναπτικών βαρών. Οι πιο σημαντικοί αλγόριθμοι εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι:

- Ο αλγόριθμος οπισθόδρομης διάδοσης σφάλματος, κατά τον οποίο το δίκτυο τροφοδοτείται με διανύσματα εισόδου και εξόδου. Το δίκτυο με τις τιμές που έχει υπολογίζει ένα αποτέλεσμα εξόδου και το συγκρίνει με το πρότυπο και υπολογίζει το σφάλμα. Τότε στέλνεται σήμα στους νευρώνες εισόδου και αυτοί τροποποιούν τα βάρη μέχρι να μειωθεί πολύ το σφάλμα και να φτάσει κάτω από την τιμή κατωφλίου.
- Η μέθοδος της απότομης καθόδου. Η μέθοδος της απότομης καθόδου (gradient descent) είναι η πιο παλιά μέθοδος εκπαίδευσης στα νευρωνικά δίκτυα. Η μέθοδος της απότομης καθόδου είναι ένας αλγόριθμος που εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς της επιστήμης, της μηχανικής και των μαθηματικών και δεν είναι αποκλειστικά κατασκευασμένος για τα νευρωνικά δίκτυα.
- Η μέθοδος BFGS Quasi-Newton. Οι μέθοδος αυτή για να εφαρμοστεί πρέπει να υπάρχει δεύτερη παράγωγος των συναρτήσεων.
- Η μέθοδος Scaled Conjugate Gradient Η μέθοδος αυτή (Scaled Conjugate Gradient), βασίζεται στην κλασική μέθοδο απότομης καθόδου και ακριβώς σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που δημιουργούνται από την εφαρμογή της απότομης καθόδου σχετικά με την σύγκλιση, την υπολογιστική πολυπλοκότητα και τον μεγάλο αριθμό επαναλήψεων κατά την διαδικασία εκπαίδευσης (Λύκας) (Ντέζες, 2019).

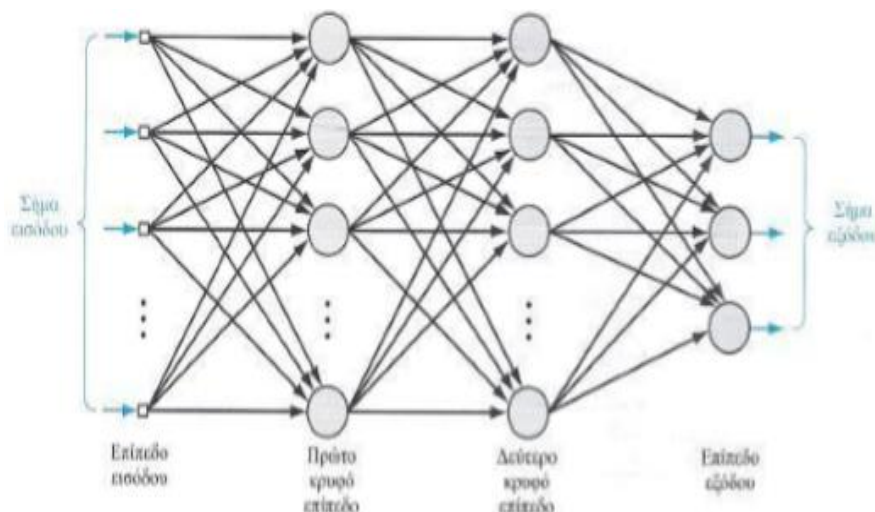
1.20.6 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα MLP

Το perceptron είναι το παλαιότερο και απλούστερο νευρωνικό δίκτυο που το κατασκεύασε ο Rosenblatt. Αποτελείται από έναν μόνο νευρώνα και είναι η δομική μονάδα για άλλα πιο πολύπλοκα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που κατασκευάστηκαν αργότερα. Δέχεται δεδομένα από πολλές εισόδους αλλά έχει μόνο μία έξοδο.

Από ένα σύνολο δεδομένων, που μπορεί να διαχωριστεί γραμμικά, το perceptron έχει την δυνατότητα να ταξινομήσει τα πρότυπα σε δυο κατηγορίες και να δώσει στην καθεμία τις τιμές 0 και 1 ή -1 και 1. Η συνάρτηση ενεργοποίησης του αισθητήρα είναι βηματική συνάρτηση.

Το δίκτυο εκπαιδεύεται από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης που κατασκεύασε ο Rosenblatt. Μετά την εκπαίδευση που επιτυγχάνεται με συνεχείς επαναλήψεις, γίνεται διαχωρισμός των εισόδων σε δύο κλάσεις που χωρίζονται από ένα υπερεπίπεδο. Το σπουδαιότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία παραγωγίσιμης της βηματικής συνάρτησης.

Το απλούστατο αυτό νευρωνικό δίκτυο perceptron φυσικά δεν αρκεί να καλύψει τις μεγάλες απαιτήσεις για γρήγορους και πολύπλοκους υπολογισμούς. Έτσι πολλά απλά στοιχεία perceptron συνδέονται μεταξύ τους σε πολύπλοκα δίκτυα που ονομάζονται MLP (Multi Layer Perceptron) (εικόνα 1.44). Η σύνθεση του αποτελείται από πολλούς αισθητήρες εισόδους που βρίσκονται σε ένα επίπεδο, επίπεδο εισόδου, από ένα ή περισσότερα κρυφά υπολογιστικά επίπεδα κόμβων και τέλος από το επίπεδο κόμβων εξόδου. Ένα τέτοιο δίκτυο MLP με δύο κρυφά επίπεδα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.44. Στο δίκτυο αυτό κάθε κρυμμένος κόμβος τροφοδοτείται από τους κόμβους του αμέσως προηγούμενου επιπέδου και με τη σειρά του γίνεται είσοδος στο αμέσως επόμενο επίπεδο. Τα νευρωνικά δίκτυα MLP είναι δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης, γιατί το σήμα προχωράει από την είσοδο προς την έξοδο μόνο (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013)



Εικόνα 1.44: Νευρωνικό Δίκτυο MLP (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013)

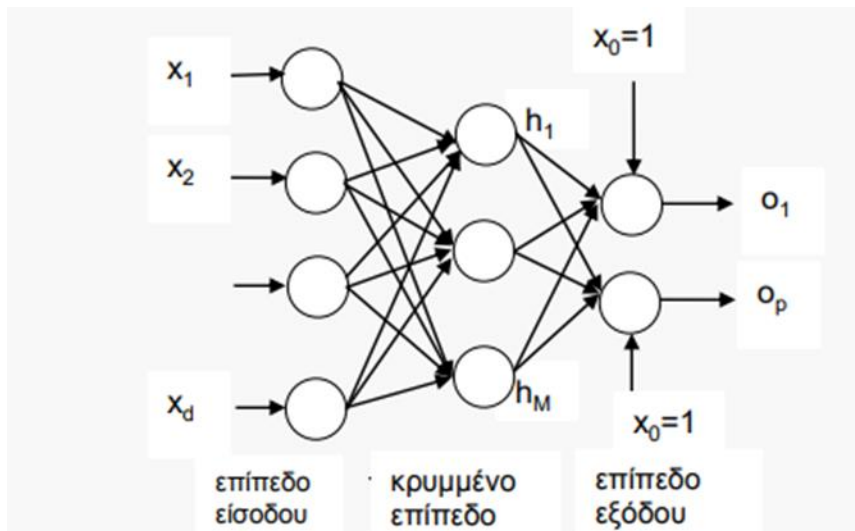
Το MLP του παραπάνω σχήματος έχει πλήρη διασύνδεση ,αφού οι νευρώνες ενός επιπέδου είναι συνδεδεμένοι με τον καθένα του επόμενου επιπέδου.Γενικά πάντως ένα MLP νευρωνικό δίκτυο έχει:

- Συνάρτηση ενεργοποίησης μη γραμμική ,συνήθως σιγμοειδούς μορφής, που είναι συνεχής και παραγωγίσιμη της μορφής: $f(u) = 1/(1 + e^{-u})$. Με αυτό τον τρόπο λύνεται το πρόβλημα της μη παραγωγίσιμης βηματικής συνάρτησης , αφού η διαδικασία της εκπαίδευσης εμπλέκει την παράγωγο της συνάρτησης.
- Μεγάλες υπολογιστικές ταχύτητες και γρήγορη σχετικά απόκριση του συστήματος.
- Ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα νευρώνων που έχουν την δυνατότητα εκπαίδευσης και την εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών.
- Εκτέλεση επαναλήψεων και διόρθωση σφάλματος μέχρι το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Απεικόνιση του περιβάλλοντος και του προβλήματος σε απλουστευμένη μορφή ώστε να μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικά μοντέλα και να μειώσει το χρόνο λειτουργίας που απαιτείται.
- Ιδιότητα γενίκευσης. Η δυνατότητα γενίκευσης που παρέχουν τα ΤΝΔ είναι πολύ σημαντική. Δηλαδή το δίκτυο έχει την ικανότητα να παίρνει δεδομένα ,διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαίδευση, και να παράγει τιμές εξόδου που να πλησιάζουν ικανοποιητικά τα επιθυμητά αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο το ίδιο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολυάριθμες εισόδους και για πολλές εφαρμογές. Ένα δίκτυο MLP που έχει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας εκπαιδεύεται για συγκεκριμένα παραδείγματα , με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανταποκριθεί σε γενικεύσεις και να χρησιμοποιηθεί για άλλα δεδομένα αφού παράγει πιο πολύπλοκες απεικονίσεις από όσο χρειάζεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπερεκπαίδευση. Αντίθετα δίκτυα λιγότερο πολύπλοκα εκπαιδεύονται ευκολότερα και μπορούν να γενικεύσουν την λειτουργία τους.

Για την εκπαίδευση των MLP χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος της βαθμιαίας καθόδου (gradient descent) για την ελαχιστοποίηση του τετραγώνου του σφάλματος, και ο αλγόριθμος οπισθοδιόρθωσης ,του λάθους ,(back propagation).Κατά τον αλγόριθμο αυτό γίνεται ένα πέρασμα του σήματος από την είσοδο προς την έξοδο,forward pass, και κατόπιν ένα αντίστροφο πέρασμα, από την έξοδο προς την είσοδο,reverse pass, όπου υπολογίζεται το σφάλμα κάθε νευρώνα, αφού συγκριθεί με τις επιθυμητές εξόδους. Κατόπιν διορθώνονται τα συναπτικά βάρη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη βελτιστοποίηση (Λύκας).

1.20.7 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα RBF

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα RBF,(Radial Basis Function Networks) (εικόνα 1.45), είναι δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης όπως τα MLP.Τα δίκτυα RBF έχουν τρία επίπεδα, ένα επίπεδο εισόδου, ένα μόνο κρυμμένο επίπεδο και ένα επίπεδο εξόδου. Η μάθηση γίνεται με επίβλεψη ,δηλαδή με καθορισμένες τιμές εξόδου .Η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μη γραμμική, ακτινικής μορφής. Στο κρυφό επίπεδο υπάρχει ένα σημείο που ονομάζεται κέντρο c , στο οποίο η συνάρτηση έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Καθώς τα σημεία απομακρύνονται από το κέντρο ,η τιμή της συνάρτησης ελαττώνεται . Η μέθοδος εκπαίδευσης των RBF δικτύων γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο εφαρμόζεται κάποια από τις μεθόδους ομαδοποίησης, k-means ή LVQ, ενώ στο δεύτερο η μέθοδος gradient descent η οποία χρησιμοποιείται και στα MLP δίκτυα. Παράδειγμα τέτοιων συναρτήσεων είναι η Gauss και η Cauchy (Λύκας).



Εικόνα 1.45: Νευρωνικό δίκτυο RBF (Λύκας).

1.20.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

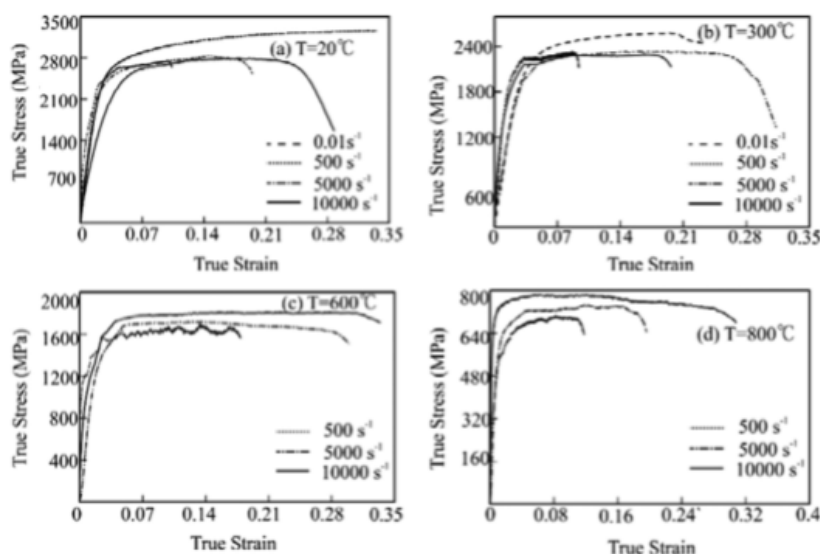
Στις μέρες μας, οι εφαρμογές των νευρωνικών τεχνητών δικτύων αυξάνονται ραγδαία και σε πολλούς τομείς:

- Στην ιατρική, για διαγνώσεις που σχετίζονται με ενδείξεις μετρήσεων όπως καρδιακή συχνότητα , μετρήσεις ουσιών στο αίμα , παρακολούθηση αναπνευστικής λειτουργίας , ανάλυση καρκινικών κυττάρων.
- Στην βιομηχανία, για παρακολούθηση μηχανημάτων , συστημάτων παραγωγής , έλεγχο με χρήση αισθητήρων, συστήματα ποιοτικού ελέγχου , ανάλυση και σχεδίαση προϊόντων, δημιουργία μοντέλων συστημάτων.
- Στο τραπεζικό και χρηματοπιστωτικό σύστημα, με βάση τις τιμές των μετοχών, των οικονομικών δεικτών , των ισοτιμιών, της κατάστασης πελατών γίνεται πρόβλεψη τιμών των μετοχών , του χρηματιστηριακού δείκτη και των ισοτιμιών , ανίχνευση γνησιότητας υπογραφών και χαρτονομισμάτων.
- Στην Τεχνολογία για αναγνώριση αποτυπωμάτων και φωνής , μετάφραση σε πραγματικό χρόνο, συστήματα πλοήγησης , συμπύεση εικόνας και δεδομένων, πρόγνωση καιρού, ανίχνευση κίνησης , τεχνητή όραση και τεχνητά προσθετικά μέλη είναι μόνο λίγες από τις εφαρμογές σε έναν τομέα που εξελίσσεται ραγδαία (Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

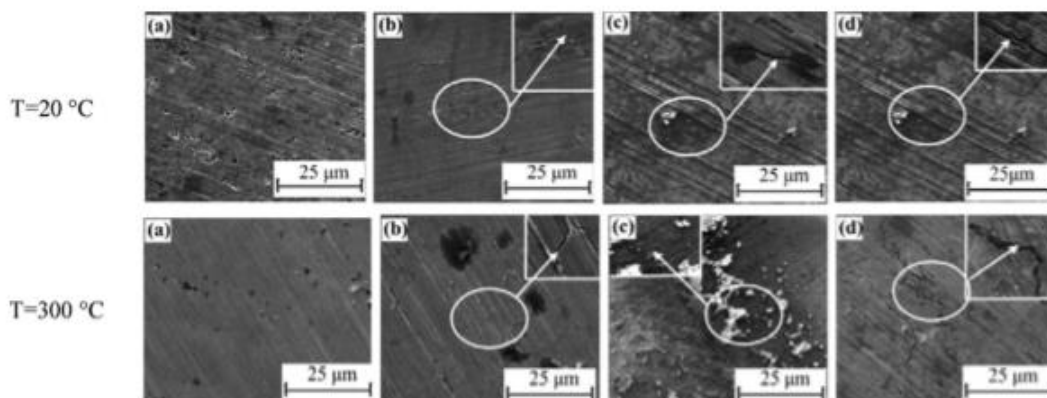
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση φρεζαρίσματος σκληρυμένου χάλυβα

Από την μελέτη του άρθρου (Chengyong, Feng , Dewen, Lijuan , Suyang, & Yingxing, 2016) του Chengyong Wang , περιγράφει την επεξεργασία τεμαχίων χάλυβα SKD11 τα οποία έχουν σκληρότητα 62 HRC. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα-καμπύλες τα οποία δείχνουν πώς μεταβάλλεται η καταπόνηση ανάλογα με τη τάση που ασκείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

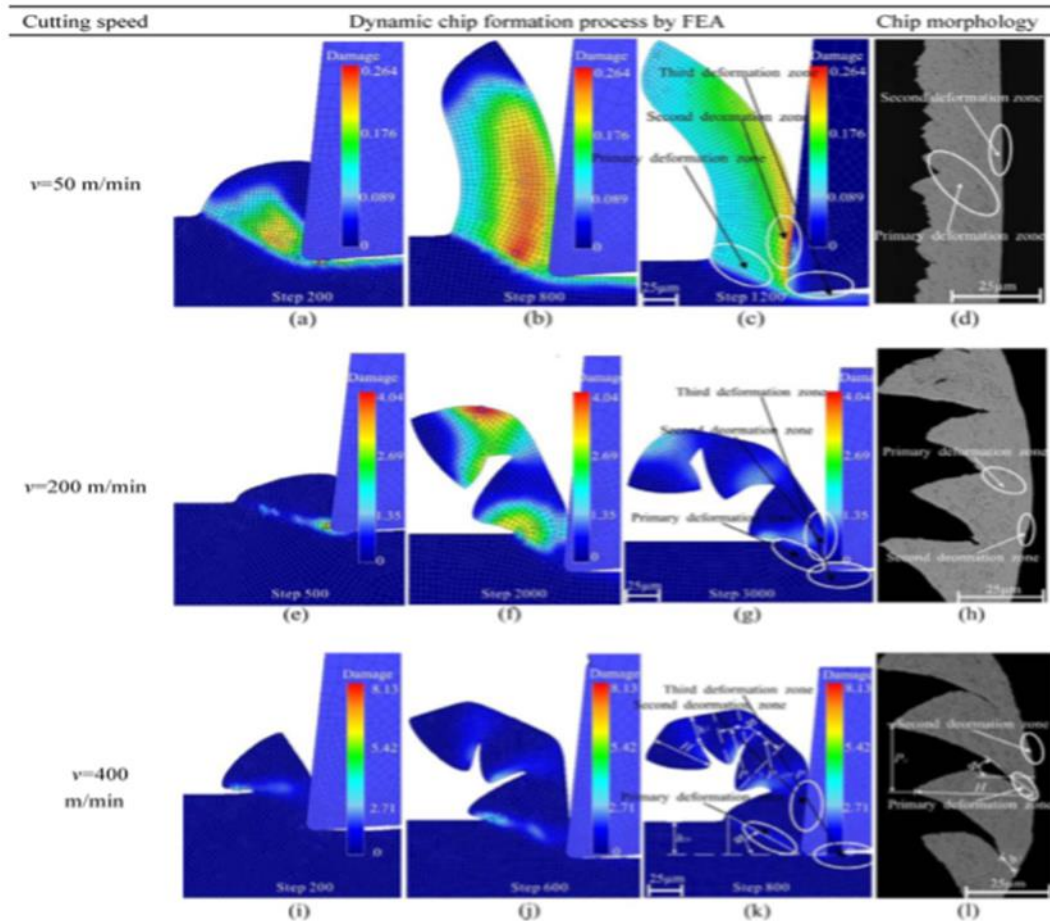


Εικόνα 2.1: Καμπύλες τάσης-καταπόνησης του σκληρυμένου χάλυβα SKD11 σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Chengyong, Feng , Dewen, Lijuan , Suyang, & Yingxing, 2016).

Γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού αποτελούμενο από επιστρωμένο Tisin και καρβίδιο διαμέτρου 6 mm, με αριθμό ακμών ίσο με 6, πυκνότητας 3500 kg/m³, με θερμική αγωγιμότητα 16,5 [W/(m*K)] και με συντελεστή θερμικής διαστολής 0.0000089.



Εικόνα 2.2: Εικόνες σαρωμένες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο της μορφολογίας της επιφανείας του σκληρυμένου χάλυβα SKD11 κατεργασμένου σε τέσσερις ρυθμούς καταπόνησης: α) $0,01 \text{ s}^{-1}$, β) $5 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$, γ) $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ και δ) $1 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ (Chengyong, Feng , Dewen, Lijuan , Suyang, & Yingxing, 2016)

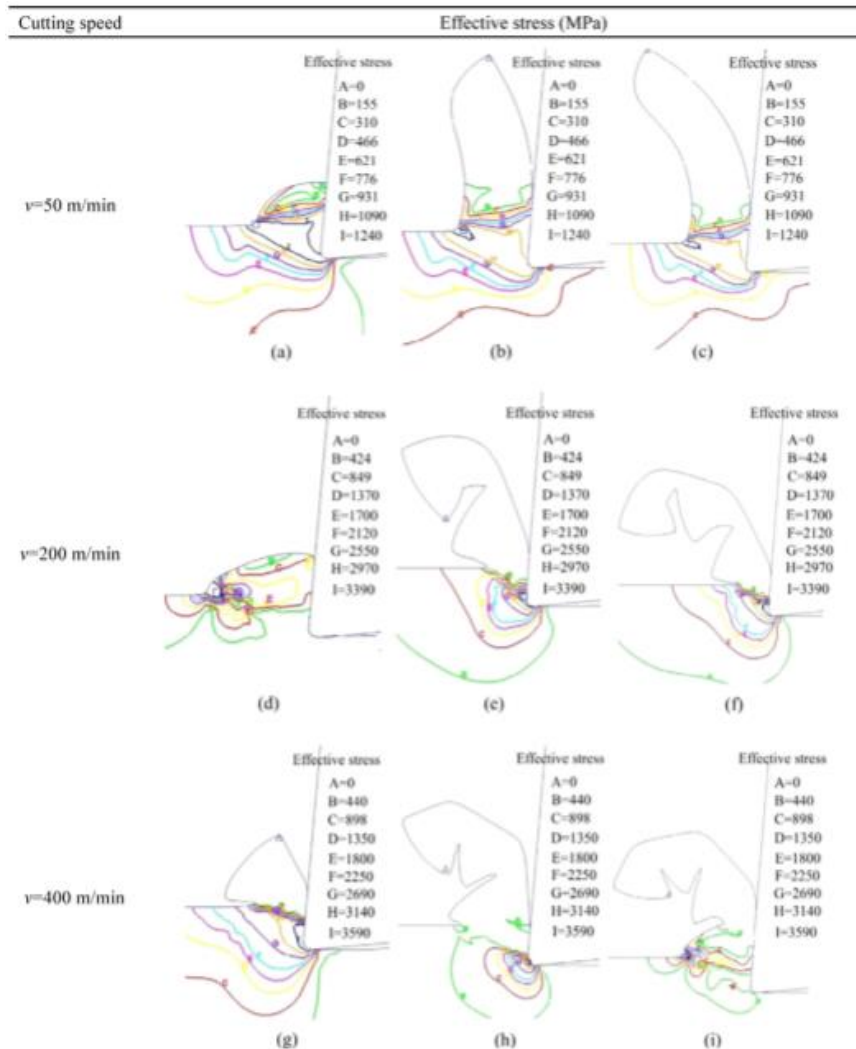


Εικόνα 2.3: Δυναμικοί σχηματισμοί αποκόμματος και οι συντελεστές ζημιών για το SKD11 (62 HRC) (συνθήκες κοπής $f_z = 0.03 \text{ m/rev}$ και $r = 5^\circ$) (Chengyong, Feng , Dewen, Lijuan , Suyang, & Yingxing, 2016).

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μορφολογία του σκληρυμένου χάλυβα (εικόνα 2.2) καθώς και οι δυναμικοί σχηματισμοί αποκόμματος και οι συντελεστές ζημιών.

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 50 και 400 m/min, η ταχύτητα πρόωσης είναι 0,03 mm/οδόντα, το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής είναι 0,3mm και 4mm αντίστοιχα, ενώ η δύναμη

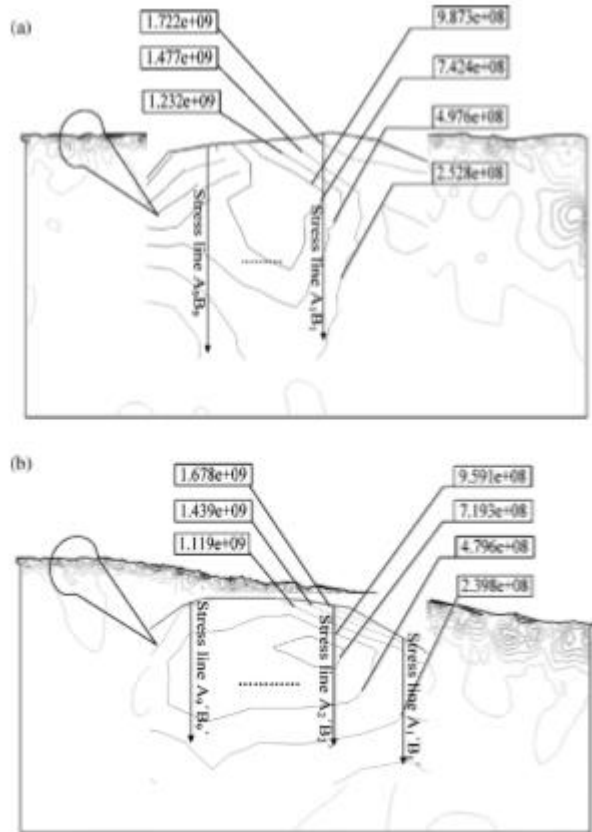
κοπής και πρόωσης παίρνουν τις τιμές μεταξύ 375.63-578.35 N και 123.07-206.90 N αντίστοιχα. Παρατηρείται επίσης μέσω της εξίσωσης J-C ότι το Μέτρο Σκλήρυνσης είναι 1440 Mpa, ο συντελεστής ευαισθησίας ρυθμού τάσης είναι 2480 Mpa, ο συντελεστής ενίσχυσης ρυθμού καταπόνησης είναι 0,012 και ο συντελεστής θερμοκρασιακής ευαισθησίας είναι 1,1. Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται οι κατανομή τάσεων σε διαφορετικές ταχύτητες κοπή.



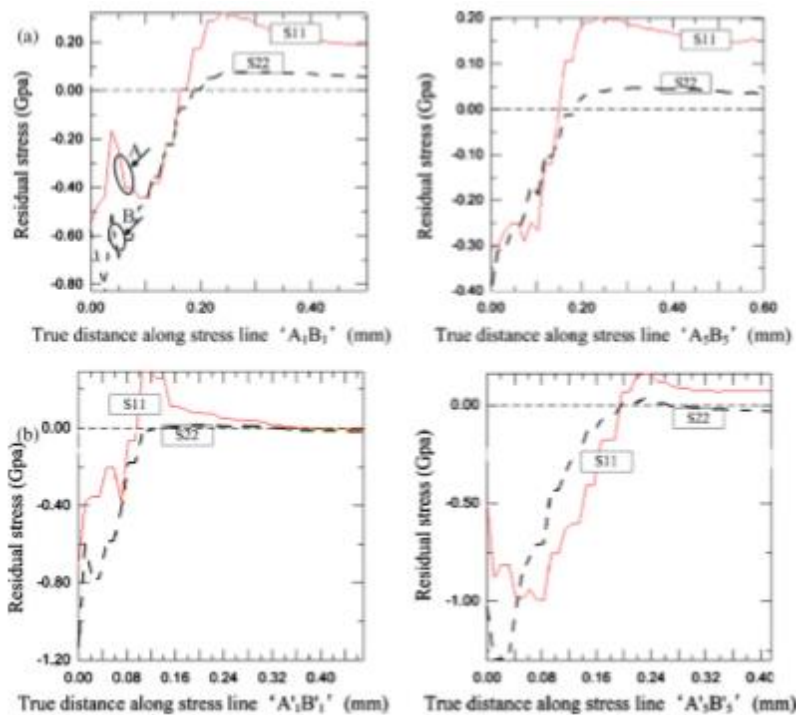
Εικόνα 2.4: Αποτελεσματική κατανομή τάσεων στη ζώνη παραμόρφωσης σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής για SKD11 (62 HRC) (συνθήκες κοπής $f_z= 0.03$ m/rev και $r=5^\circ$) (Chengyong, Feng , Dewen, Lijuan , Suyang, & Yingxing, 2016).

Ταυτόχρονα, στο άρθρο (Li, Jing, & Chen, 2008) των J.L. Li , L.L. Jing και M. Chen επεξεργάζονται τεμάχια χάλυβα παρόμοια με τα παραπάνω, με την αντίθεση ότι εδώ χρησιμοποιείται μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM study). Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν 2 ίδια κοπτικά εργαλεία έτσι ώστε να υπάρχει συνεχής πρόωση. Στην

εικόνα 2.5 φαίνεται η κατανομή πίεσης-καταπόνησης βάση του κριτηρίου Von-Mises για κάθε μία κοπή του κάθε κοπτικού εργαλείου ενώ στην 2.6 φαίνεται η κατανομή υπολειμμάτων καταπόνησης.

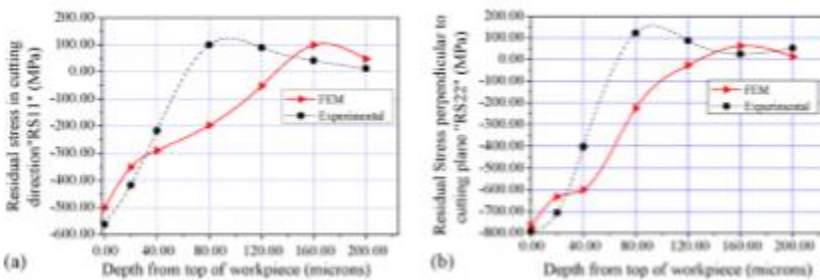


Εικόνα 2.5: Κατανομή πίεσης σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises (α) από την πρώτη διαδικασία κοπής (β) από την δεύτερη διαδικασία κοπής (Li, Jing, & Chen, 2008).



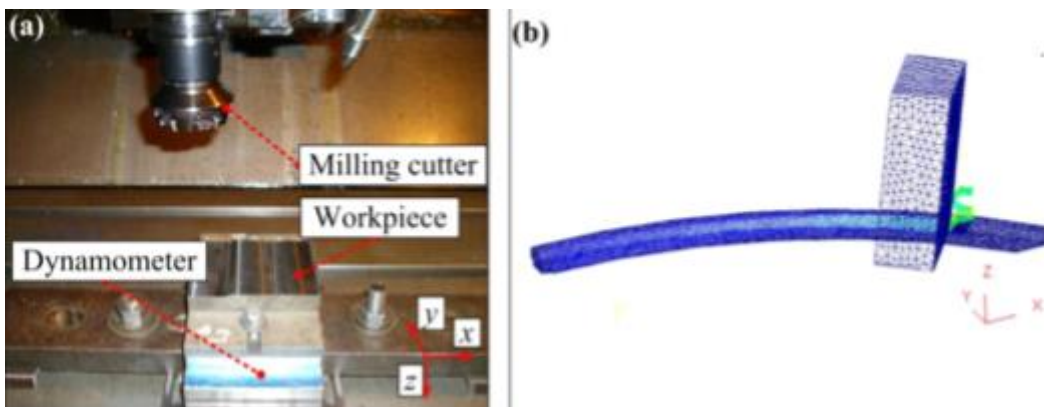
Εικόνα 2.6: Κατανομή υπολειμμάτων καταπόνησης μετά την (α) πρώτη διαδικασία κοπής , (β) δεύτερη διαδικασία κοπής (Li, Jing, & Chen, 2008)

Γίνεται αναφορά στις ιδιότητες του τεμαχίου που επεξεργάζονται: η πυκνότητα του είναι 8400 kg/m^3 , η θερμική αγωγιμότητα του είναι $16,5 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ και ο συντελεστής θερμικής διαστολής 0.000011 . Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα κοπής είναι $75,6 \text{ m/min}$, η ταχύτητα πρόωσης είναι 1450 mm/min , το αξονικό βάθος κοπής είναι $0,3\text{mm}$, ενώ το πλάτος κοπής είναι $0,25 \text{ mm}$. Παρατηρείται επίσης μέσω της εξίσωσης J-C ότι το Μέτρο Σκλήρυνσης είναι 904 Mpa , ο Συντελεστής ευαισθησίας ρυθμού τάσης είναι 1766 Mpa , ο Συντελεστής ενίσχυσης ρυθμού καταπόνησης $0,012$ και ο Συντελεστής θερμοκρασιακής ευαισθησίας $3,38$. Στην εικόνα 2.7 γίνεται η σύγκριση προφίλ υπολειμμάτων καταπόνησης μεταξύ FEM και πειραματικής μελέτης.

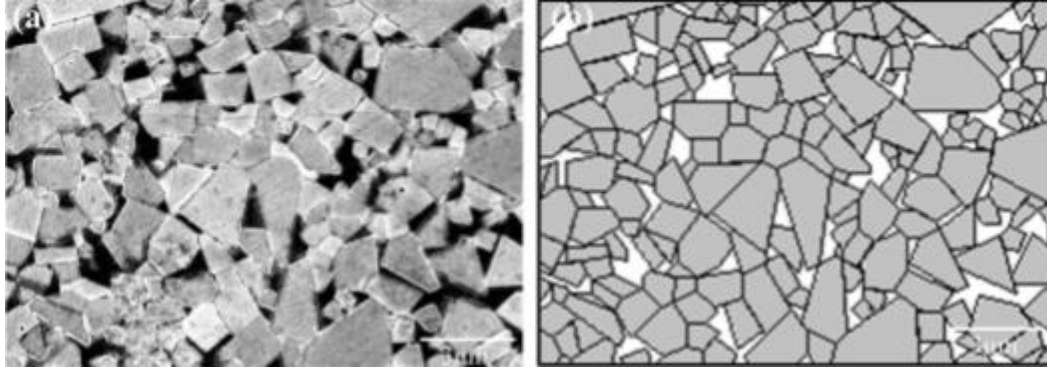


Εικόνα 2.7: Σύγκριση προφίλ υπολειμμάτων καταπόνησης μεταξύ FEM και πειραματικής μελέτης: (a) 1^η κοπή, (b) 2^η κοπή (Li, Jing, & Chen, 2008).

Στο επόμενο άρθρο (Cui, Wang, & Guo, 2016) οι συγγραφείς Xiaobin Cui, Dong Wang, Jingxia Guo περιγράφουν την επεξεργασία τεμαχίων χάλυβα H13 τα οποία έχουν σκληρότητα 46-47 HRC. Γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού κράματος καρβιδίου διαμέτρου 63 mm , πυκνότητας 14400 kg/m^3 , με θερμική αγωγιμότητα $74,2 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ και με συντελεστή θερμικής διαστολής 0.0000045 . Στην εικόνα 2.7 έχουμε την πειραματική διάταξη και μία καθαρή εικόνα του κοπτικού εργαλείου, ενώ στην εικόνα 2.9 μας δείχνει πως είναι η μικροδομή του εργαλείου

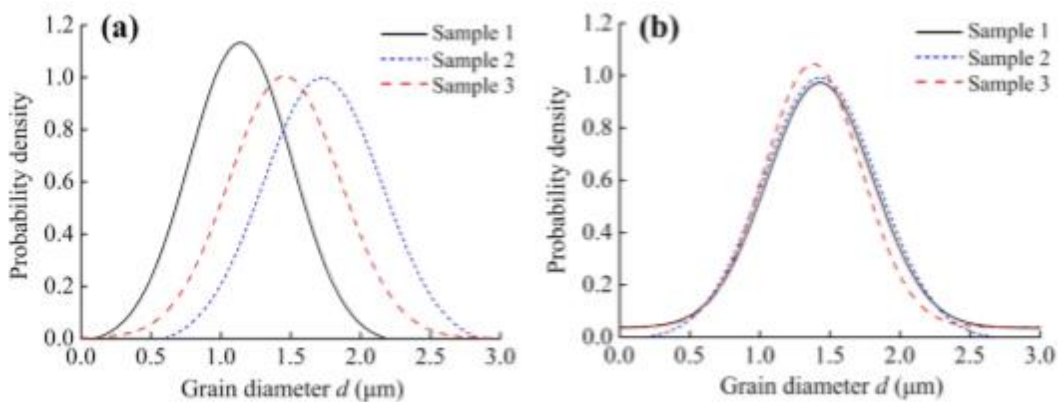


Εικόνα 2.8: (α) Πειραματική διάταξη και κοπτικό εργαλείο, (β) Σχηματική προσομοίωση (Cui, Wang, & Guo, 2016)



Εικόνα 2.9: Ανάλυση της μικροδομής του υλικού του εργαλείου. (α) Εικόνα SEM της μικροδομής του υλικού του εργαλείου. (β) Περίγραμμα της μικροδομής του υλικού του εργαλείου (Cui, Wang, & Guo, 2016).

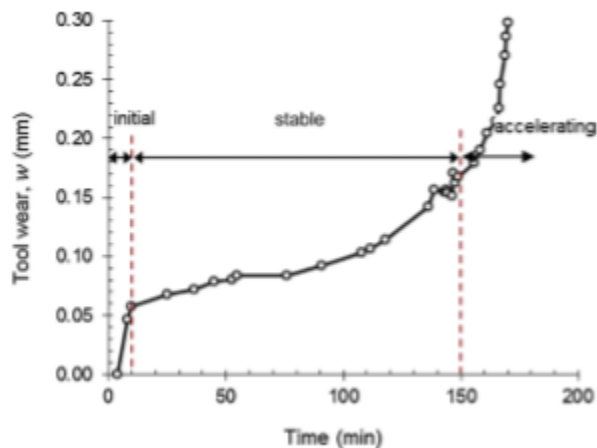
Για τον σκοπό της αξιολόγησης της μικροδομής του κοπτικού εργαλείου, μία κρίσιμη παράμετρος είναι η διάμετρος των κόκκων. Στην εικόνα 2.10 απεικονίζονται τα διαγράμματα πιθανής κατανομής πυκνότητας- διαμέτρου κόκκου 2 μεγεθών ((α) 100 κόκκοι και (β) 144 κόκκοι) για το καθένα από τα οποία αντλούνται 3 δείγματα.



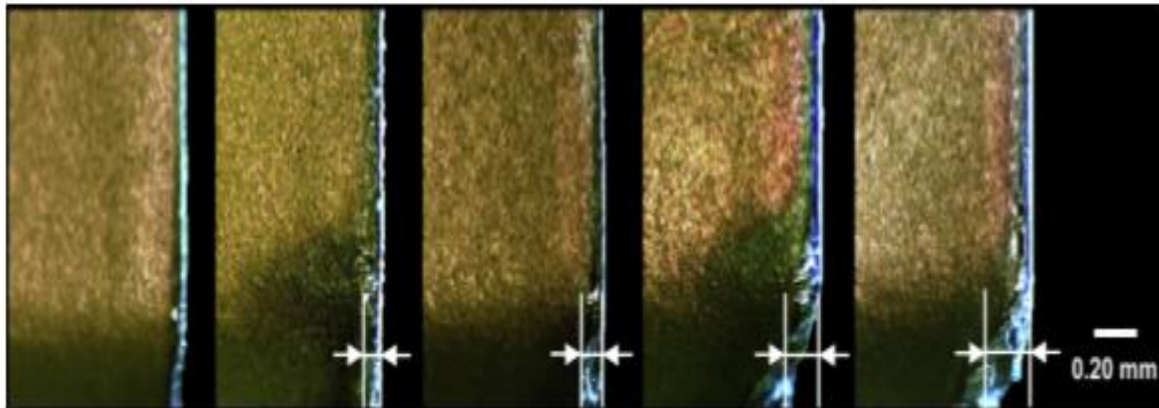
Εικόνα 2.10: Κατανομή πυκνότητας της διαμέτρου των κόκκων. (α) Κατανομή της πυκνότητας του μεγέθους των κόκκων για 100 κόκκους. (β) Κατανομή πυκνότητας της διαμέτρου κόκκων για 144 κόκκους (Cui, Wang, & Guo, 2016)

Διαπιστώνεται, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος το οποίο επιλέγεται, τόσο πιο κοντά είναι οι μετρήσεις της κατανομής πυκνότητας των δειγμάτων που παίρνουμε. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου βρίσκεται μεταξύ 1517-4550 rev/min, η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 300 και 900 m/min, η ταχύτητα πρόωσης βρίσκεται ανάμεσα 0,08-0,24 mm/οδόντα, το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής είναι 0,3mm και 5-15mm αντίστοιχα. Παρατηρείται επίσης μέσω της εξίσωσης J-C ότι το Μέτρο Σκλήρυνσης είναι 329 Mpa και ο Συντελεστής ευαισθησίας ρυθμού τάσης είναι 715 Mpa.

Πολύ ενδιαφέρον είναι εξίσου το άρθρο (Liu, Guo, Sealy, & Liu, 2015) του Z.Y. Liu με αντικείμενο μελέτης την φθορά του κοπτικού εργαλείου και την επεξεργασία τεμαχίων χάλυβα, παρόμοιων με το προηγούμενο, AISI H13 με σκληρότητα 51 HRC. Μεταξύ άλλων γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού κράματος καρβίδιου διαμέτρου 20 mm και πυκνότητας με 2 κοπτικές ακμές. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 100 και 200 m/min, η ταχύτητα πρόωσης βρίσκεται ανάμεσα 0,05-0,2 mm/οδόντα, το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής είναι 1mm και 0,3-0,5mm αντίστοιχα, το μήκος κοπής είναι 100mm. Στην εικόνα 2.11 βλέπουμε ένα διάγραμμα που μας περιγράφει πως εξελίσσεται η φθορά του κοπτικού εργαλείου με τη πάροδο του χρόνου, ενώ στην εικόνα 2.12 φαίνεται η μορφολογία του κοπτικού ανάλογα με το μέγεθος της φθοράς (w).



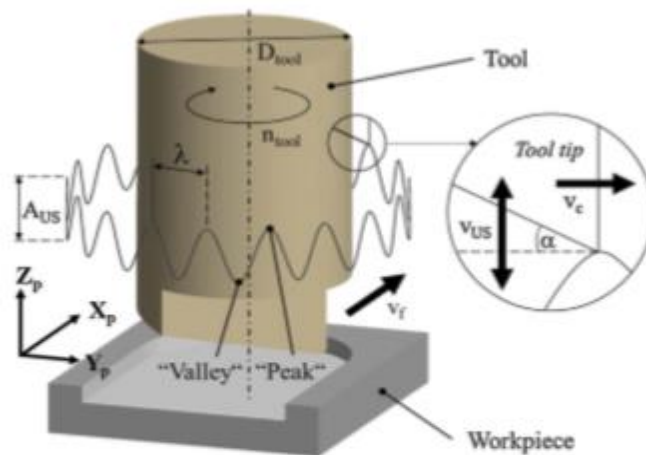
Εικόνα 2.11: Η εξέλιξη της φθοράς των πλευρών κατά μήκος της μικρής ακμής κοπής (Liu, Guo, Sealy, & Liu, 2015).



(a) Fresh tool (b) $w = 0.08$ mm (c) $w = 0.10$ mm (d) $w = 0.15$ mm (e) $w = 0.20$ mm

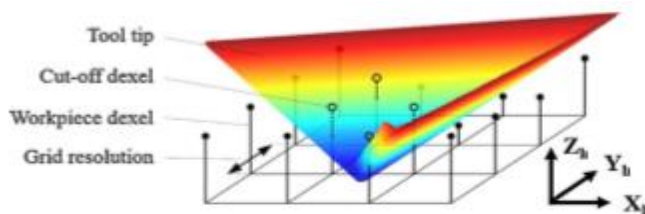
Εικόνα 2.12: Η μορφολογία της φθοράς κατά μήκος της μικρής ακμής κοπής (Liu, Guo, Sealy, & Liu, 2015).

Στο επόμενο άρθρο (Börner, Winkler, Junge, Titsch, Schubert, & Drosse) του Richard Börner περιγράφεται η ψυχρή επεξεργασία τεμαχίων χάλυβα X135CrMoV12 με υπερηχητικές δονήσεις βοηθώντας στο μετωπικό φρεζάρισμα όπως και βλέπουμε στην εικόνα 2.13.



2.13: Κινηματική υπερηχητικών δονήσεων βοηθώντας στο μετωπικό φρεζάρισμα (Börner, Winkler, Junge, Titsch, Schubert, & Drosse).

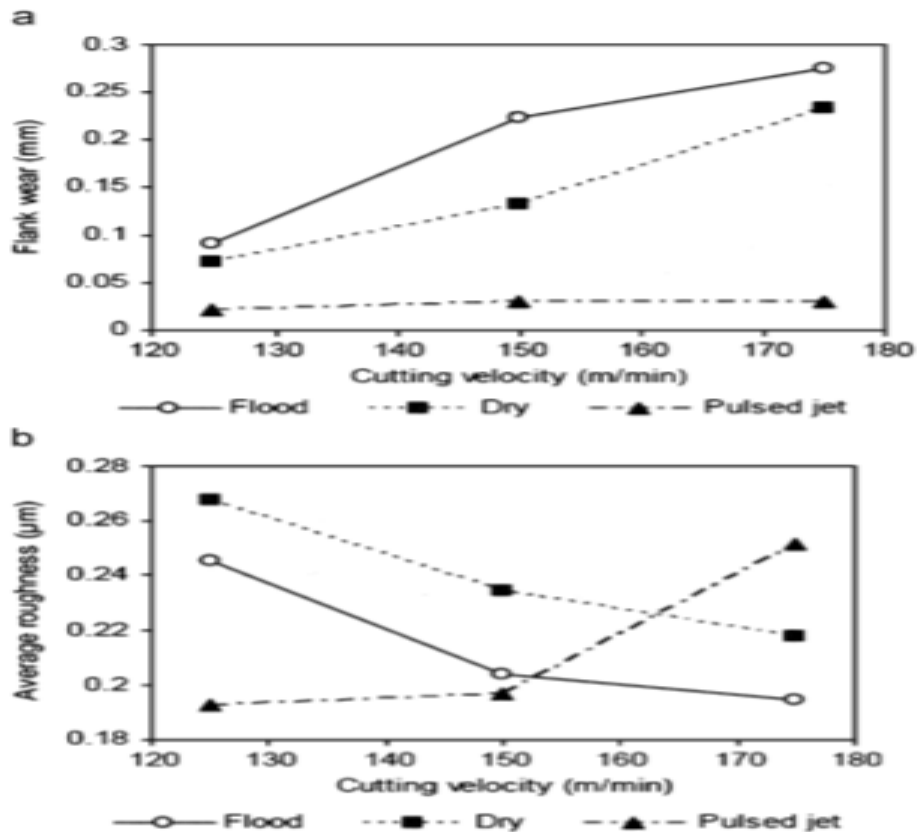
Γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού κράματος καρβιδίου διαμέτρου 5 mm και στην εικόνα 2.14 φαίνεται πως εισχωρεί στο τεμάχιο.

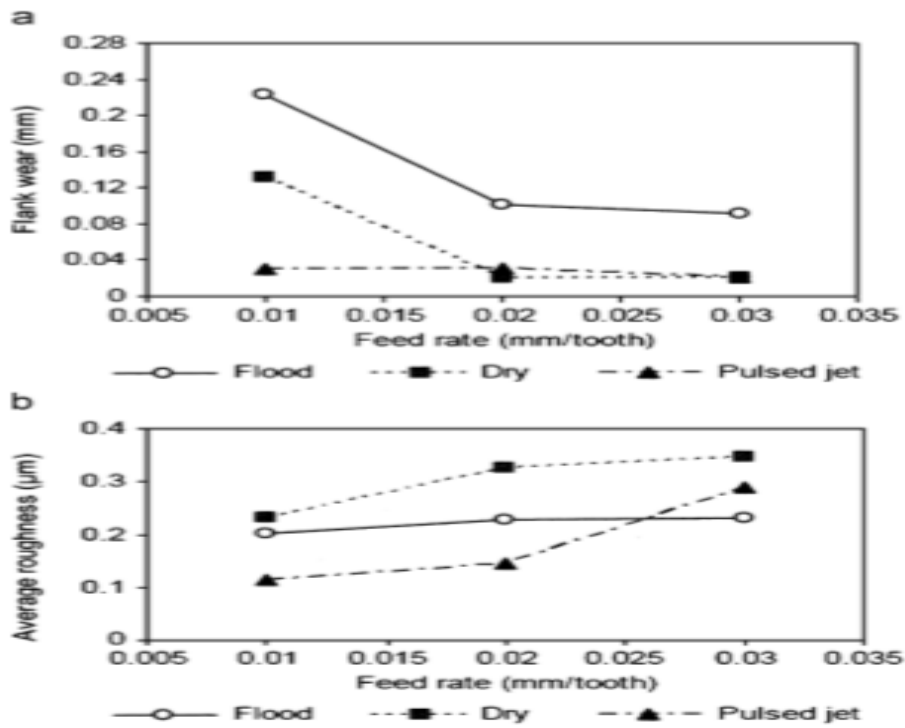


Εικόνα 2.14: Εργαλείο κοπής (μέσα στον όγκο εργασίας με βάση το dixel (Börner, Winkler, Junge, Titsch, Schubert, & Drosse)

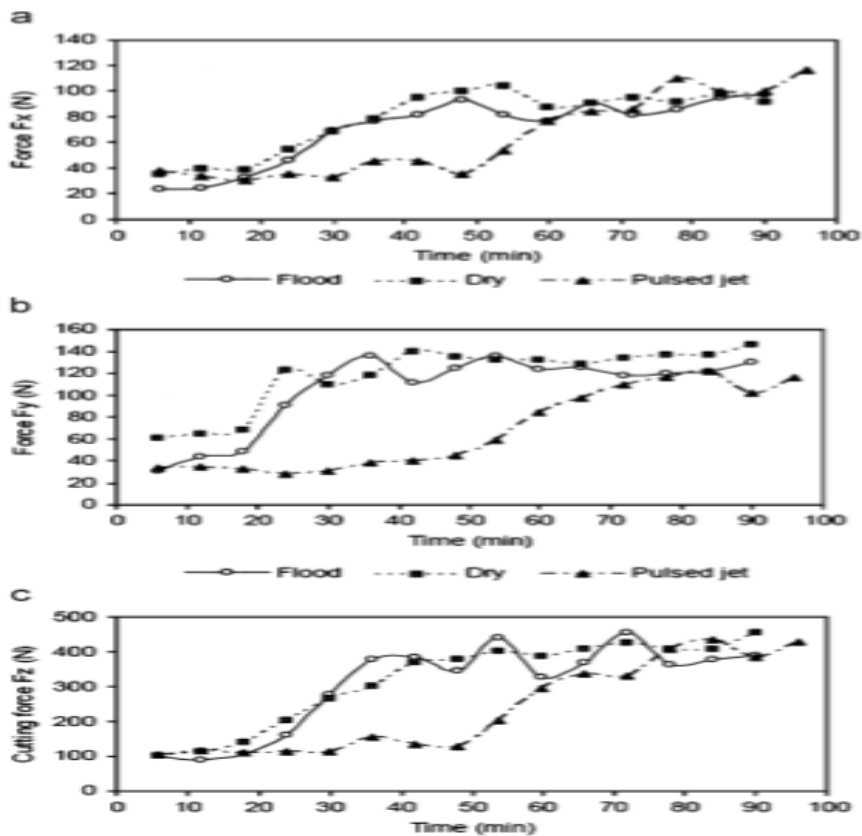
Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου βρίσκεται μεταξύ 5414-7643 rev/min, η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 85 και 120m/min, η ταχύτητα πρόωσης βρίσκεται ανάμεσα 0,1 mm/οδόντα, το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής είναι 0.0018-0.02 mm και 4,8 mm αντίστοιχα.

Στο επόμενο άρθρο (Therpsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008) οι συγγραφείς T. Therpsonthi, M. Hamdi, K. Mitsui περιγράφουν την μελέτη μίας πιο οικονομικής τεχνικής για την προσθήκη υγρού κοπής κατά την κατεργασία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, η μέθοδος του πολωμένου ψεκασμού αποδεικνύεται ότι είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος. Για τα πειράματα της μελέτης αυτής, τα τεμάχια που επεξεργάζονται είναι χάλυβας ASSAB DF3 που έχει σκληρότητα 51 HRC. Στις παρακάτω εικόνες αποτυπώνεται σε μορφή διαγράμματος ο τρόπος μεταβολής της ταχύτητας κοπής και πρόωσης, της δύναμης κοπής καθώς και της τραχύτητας συναρτήσεϊ του χρόνου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ταχύτητας κοπής και πρόωσης συναρτήσεϊ του μήκους φθοράς και της τραχύτητας επιφάνειας (εικόνα 2.15 και 2.16), η μεταβολή της δύναμης κοπής συναρτήσεϊ του χρόνου (εικόνα 2.17), η μεταβολή της τραχύτητας συναρτήσεϊ του χρόνου (2.18) και τέλος η μεταβολή του μήκους φθοράς συναρτήσεϊ του χρόνου (2.19).

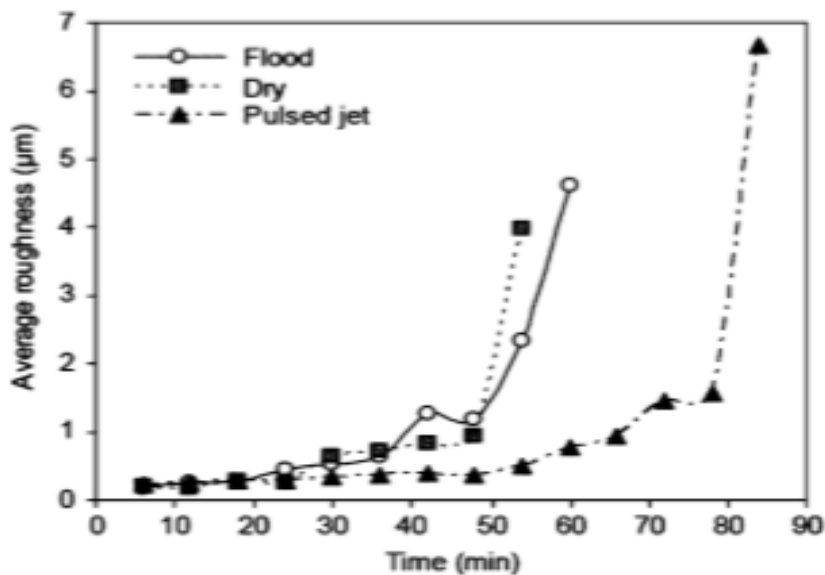




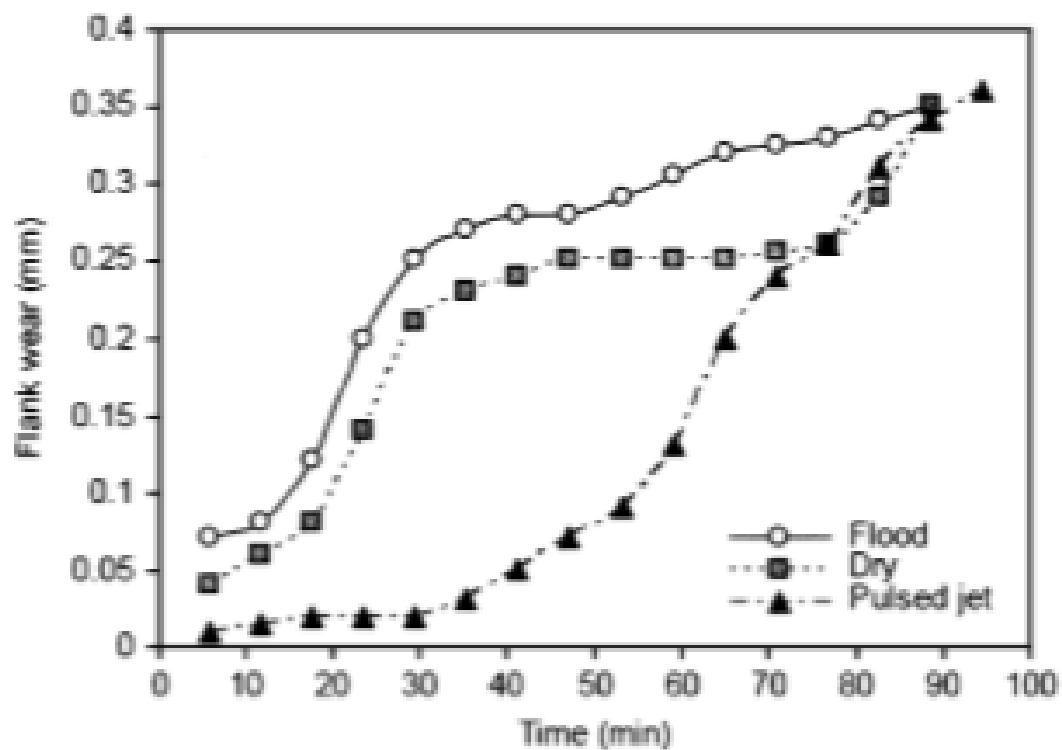
Εικόνα 2.15 και εικόνα 2.16: Αποτελέσματα ταχύτητα κοπής και πρόωσης συναρτήσει α) του μήκους φθοράς και β) της τραχύτητας επιφάνειας (Therpsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008).



Εικόνα 2.17: Μεταβολή της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου (Therpsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008)



Εικόνα 2.18: Μεταβολή της τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου (Thepsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008)

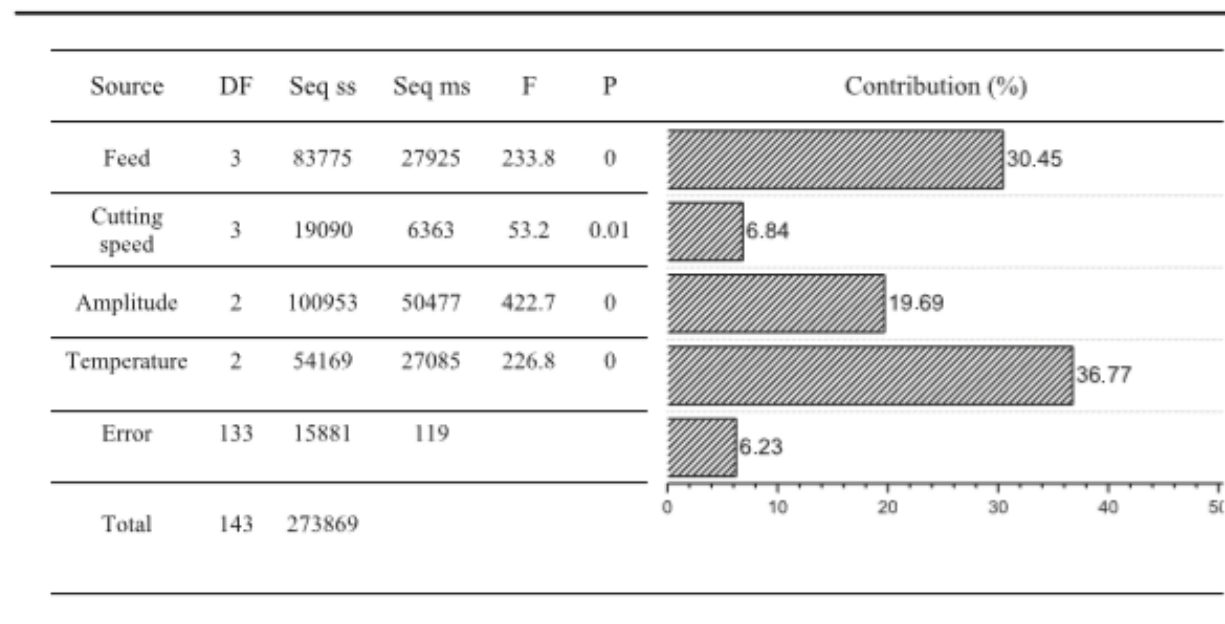


Εικόνα 2.19: Μεταβολή του μήκους φθοράς συναρτήσει του χρόνου (Thepsonthi, Hamdi, & Mitsui, 2008)

Γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού κράματος καρβίδιου διαμέτρου 12 mm. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα κοπής

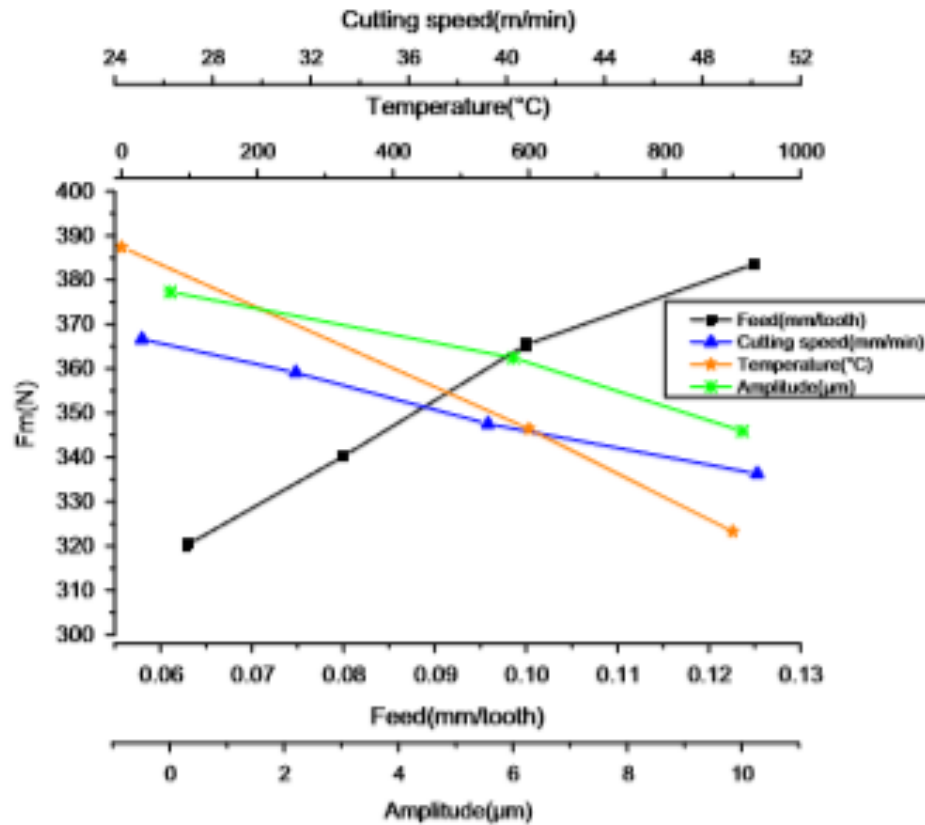
παίρνει τις τιμές 125,150 και 175m/min, η ταχύτητα πρόωσης παίρνει τις τιμές 0,01 , 0,02 και 0,03 mm/οδόντα, το αξονικό βάθος κοπής είναι 0,2 mm και το μήκος κοπής είναι 6m. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του αποκόμματος βρίσκεται μεταξύ 837-981 °C.

Μελετώντας το άρθρο (Elhami, Razfar, & Farahnakian, 2015)των συγγραφέων S. Elhami, M.R.Razfar, M.Farahnakian, παρατηρείται ότι περιγράφεται μία νέα υβριδική κατεργασία μέσω των δυνάμεων κοπής, η οποία είναι ένας συνδυασμός των 2 παρακάτω κατεργασιών: α) θερμικά ενισχυμένη κατεργασία και β) κατεργασία με την βοήθεια υπέρηχων. Μελετώνται οι 3 δυνάμεις και στους 3 άξονες, F_x , F_y και F_z οι οποίες για την ευκολία υπολογισμών δημιουργούν την F_m , όπου η F_m είναι η μέση δύναμη κοπής και οι F_x F_y F_z είναι οι συνιστώσες δυνάμεις στις αντίστοιχες διευθύνσεις x , y , z . Στην εικόνα 2.20 βλέπουμε τα αποτελέσματα της μεθόδου ANOVA η οποία μας αποκαλύπτει τα αποτελέσματα των επιλεγμένων παραμέτρων της υβριδικής κατεργασίας στην δύναμη F_m . Η τιμή p για όλες τις παραμέτρους.



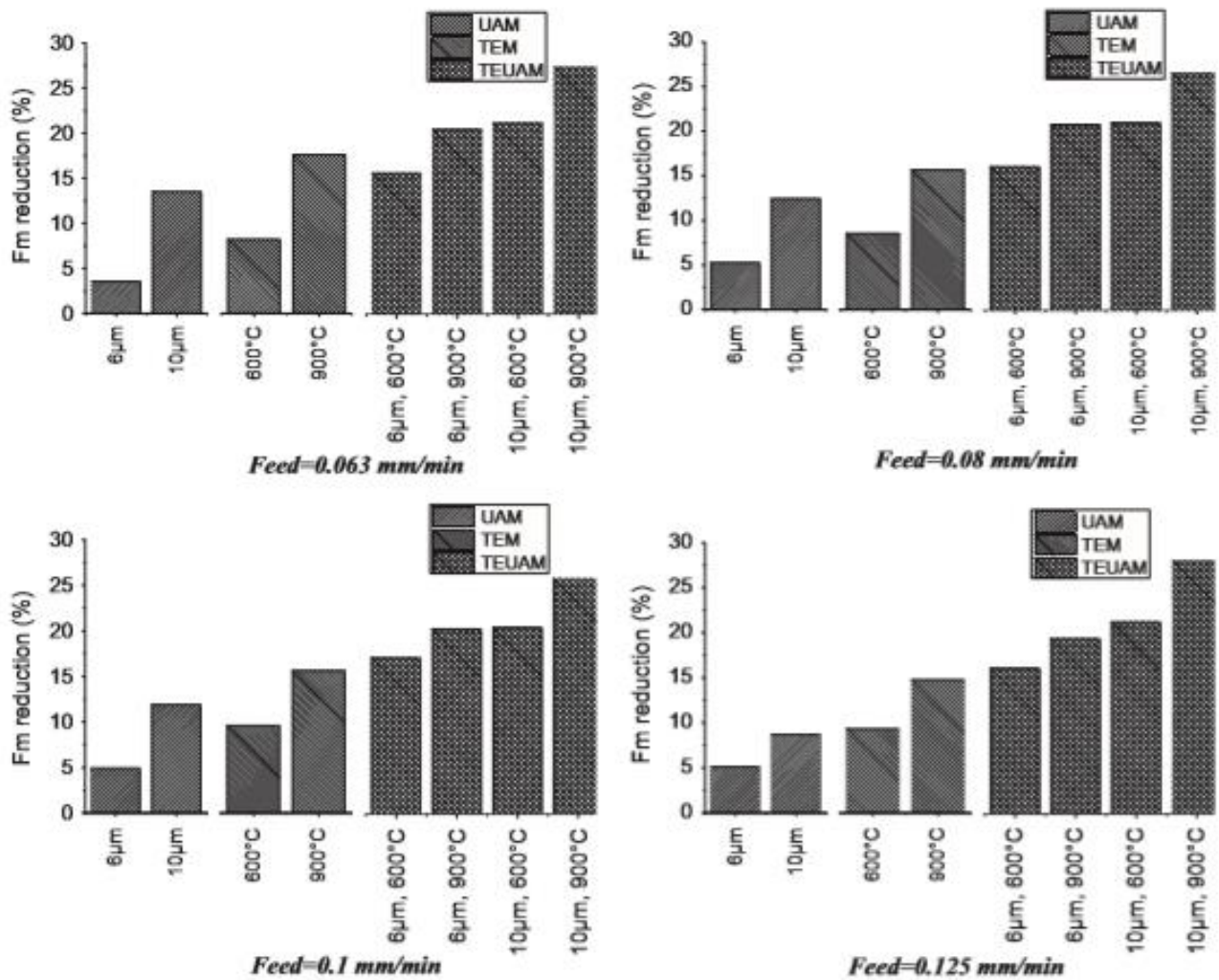
Εικόνα 2.20: Αποτελέσματα της μεθόδου ANOVA (Elhami, Razfar, & Farahnakian, 2015)

Όπως και στην εικόνα 2.21, στο διάγραμμα φαίνεται επίσης πως επηρεάζεται η δύναμη F_m από τις υπόλοιπες παραμέτρους.



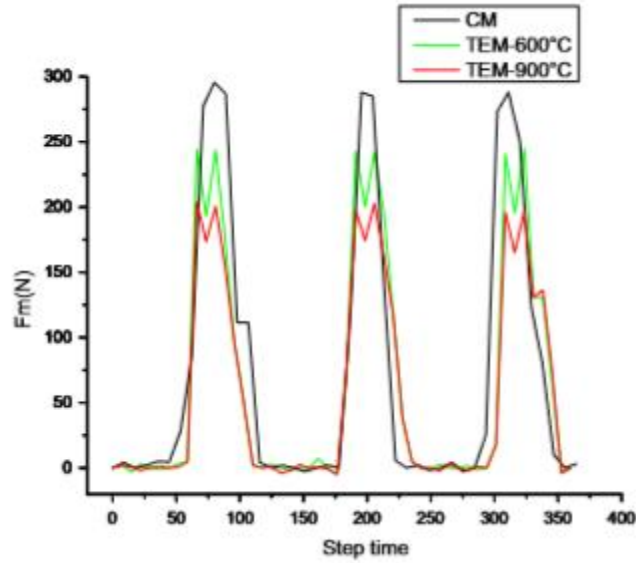
Εικόνα 2.21: Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται πώς επηρεάζουν τη δύναμη F_m οι επιλεγμένες παραμέτρους (Elhami, Razfar, & Farahnakian, 2015).

Την επεξεργασία τεμαχίων χάλυβα AISI 4140 τα οποία έχουν σκληρότητα 40 HRC. Γίνεται αναφορά σε κοπτικό εργαλείο υλικού κράματος καρβίδιο διαμέτρου 3,2 -6,4 mm. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου βρίσκεται μεταξύ 2500 rev/min, η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 25,12 και 50,24 m/min, η ταχύτητα πρόωσης βρίσκεται ανάμεσα 0,63-0,125 mm/οδόντα, το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής είναι 0,3mm και 5-15mm αντίστοιχα. Επιπλέον, στην εικόνα 2.22 βλέπουμε πώς εξελίσσεται η μείωση της δύναμης συναρτήσει της πρόωσης.



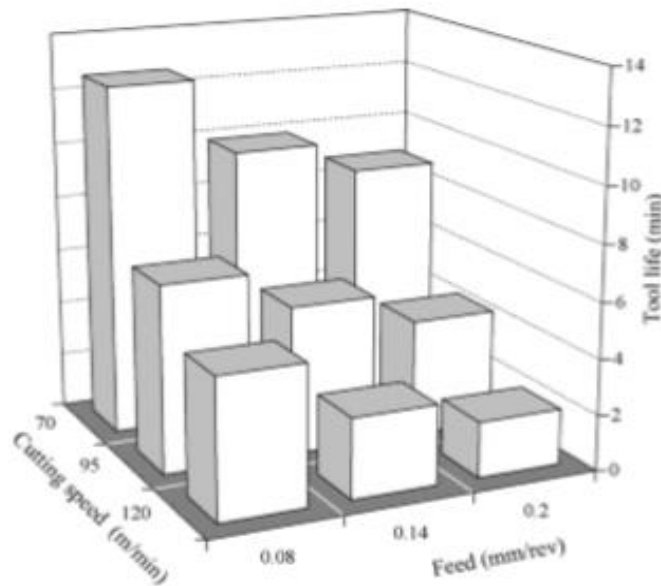
Εικόνα 2.22: Μείωση δύναμης Fm (Elhami, Razfar, & Farahnakian, 2015)

Παρατηρείται επίσης μέσω της εξίσωσης J-C ότι το Μέτρο Σκλήρυνσης είναι 436 Mpa, ο Συντελεστής ευαισθησίας ρυθμού τάσης είναι 612Mpa, ο Συντελεστής ενίσχυσης ρυθμού καταπόνησης είναι 0,008 και ο Συντελεστής θερμοκρασιακής ευαισθησίας είναι 1,46. Τέλος στην εικόνα 2.23 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της Fm έναντι διαφορετικών τιμών της θερμοκρασίας για τον πολυκύκλο της περιστροφής του εργαλείου.



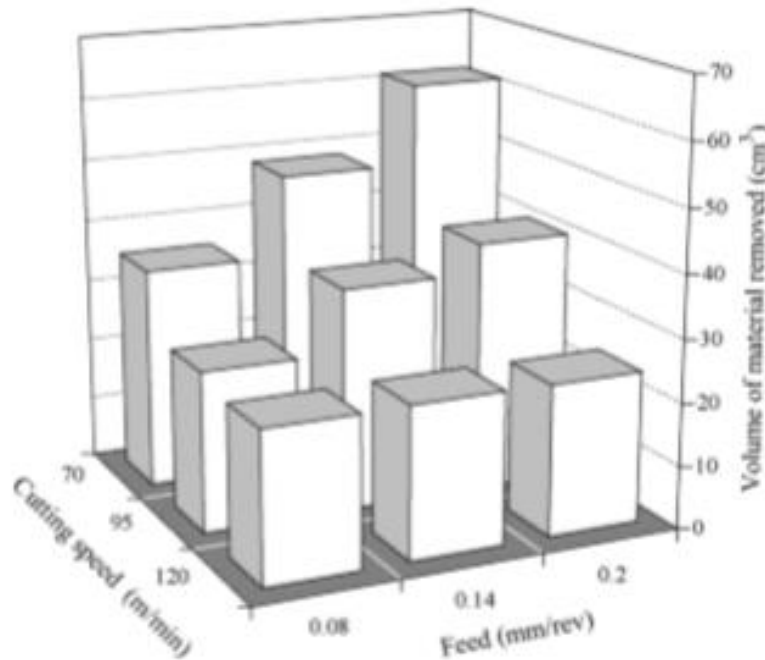
Εικόνα 2.23: Τιμές του F_m για τον πολυκύκλο της περιστροφής του εργαλείου έναντι διαφορετικών τιμών της θερμοκρασίας (Elhami, Razfar, & Farahnakian, 2015)

Επιπροσθέτως στο επόμενο άρθρο (Arsecularatne, Zhang, Montross, & Mathew, 2005) του J.A. Arsecularatne περιγράφει την επεξεργασία και κατεργασία τεμαχίων χάλυβα AISI D2, τα οποία έχουν σκληρότητα 62 HRC, με την βοήθεια των εργαλείων PCBN. Η εικόνα 2.24 μας δείχνει τις διάφορες τιμές του χρόνου (σε λεπτά) της ζωής που έχει το κοπτικό εργαλείο συναρτήσει της ταχύτητας κοπής αλλά και της πρόωσης.



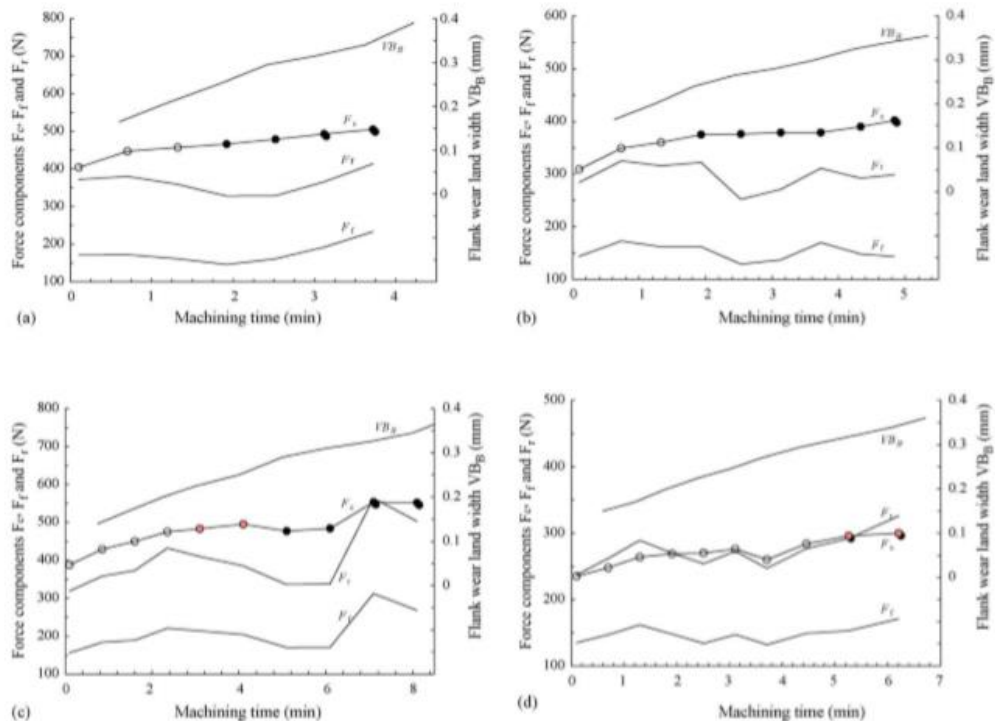
Εικόνα 2.24: Διακύμανση της διάρκειας ζωής του εργαλείου σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την πρόωση (Arsecularatne, Zhang, Montross, & Mathew, 2005)

Αντίστοιχα στην εικόνα 2.25 φαίνονται οι διάφορες τιμές του όγκου απομάκρυνσης υλικού (σε cm) ή αλλιώς αποκόμματος συναρτήσσει, πάλι, της ταχύτητας κοπής και πρόωσης.



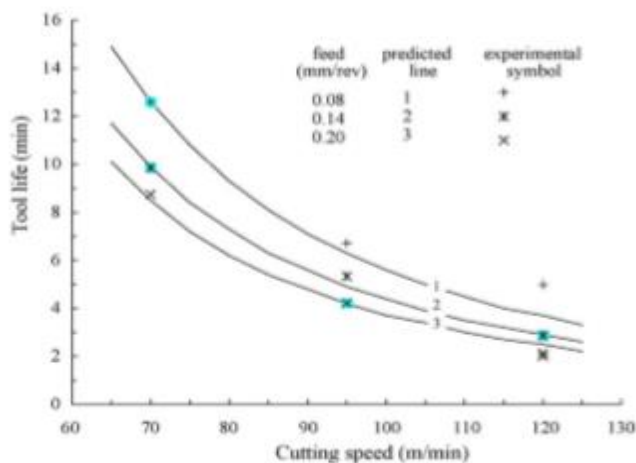
Εικόνα 2.25: Μεταβολή του όγκου απομάκρυνσης υλικού W σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την πρόωση (Arsecularatne, Zhang, Montross, & Mathew, 2005)

Το κοπτικό εργαλείο PCBN είναι υλικού κράματος καρβίδιου διαμέτρου 1,6 mm. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επικρατούν οι εξής συνθήκες: η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου βρίσκεται μεταξύ 5600 rev/min, η ταχύτητα κοπής ταλαντεύεται μεταξύ 70 και 120 m/min, η ταχύτητα πρόωσης βρίσκεται ανάμεσα 0,08-0,2 mm/οδόντα, το αξονικό βάθος κοπής είναι 0,5mm. Παρατηρείται επίσης ότι η δύναμη κοπής είναι 228-389 N, η δύναμη πρόωσης είναι 132-171 N και η Ακτινική συνιστώσα της δύναμης κοπής είναι 225-336 N. Στην εικόνα 2.26 έχουμε 4 διαγράμματα που μας δείχνουν τις διάφορες τιμές του εύρους της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και τις συνιστώσες δυνάμεις F_c , F_f και F_r με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 2.26: Οι μεταβολές του εύρους της φθοράς VB_B και των συνιστώσεων δυνάμεων F_c , F_f και F_r με χρόνο επεξεργασίας: (α) στην τροφοδοσία 0.2mm / rev και ταχύτητα κοπής 95m / min, (b) στην τροφοδοσία 0.14mm / κοπής 95m / min , (γ) στην τροφοδοσία 0.20mm / rev και ταχύτητα κοπής 70m / min και (d) στην τροφοδοσία 0.08mm / rev και ταχύτητα κοπής 95m / min (Arsecularatne, Zhang, Montross, & Mathew, 2005).

Τέλος στο διάγραμμα της εικόνας 2.27, γίνεται μια σύγκριση των αναμενόμενων και των πειραματικών αποτελεσμάτων της ζωής του κοπτικού εργαλείου.



Εικόνα 2.27: Μεταβολή της διάρκειας ζωής εργαλείου με ταχύτητα κοπής και σύγκριση μεταξύ προβλεπόμενων και πειραματικών αποτελεσμάτων (Arsecularatne, Zhang, Montross, & Mathew, 2005)

Ένα συμπέρασμα που εξάγεται από την μελέτη των παραπάνω άρθρων, είναι ότι σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες για κατεργασίες σκληρυμένων χαλύβων προτιμώνται τα κοπτικά κράματα καρβιδίου σε υψηλές στροφές (πάνω από 1500) και μικρά βάθη κοπής(περίπου 0,1- 0,5mm).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Πειραματική διάταξη και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων

3.1.Διεξαγωγή Πειραμάτων και πειραματικά αποτελέσματα

3.1.1. Περιγραφή Πειραμάτων

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, αποσκοπούν στη μελέτη των δυνάμεων στον άξονα X(F_x), στον άξονα Y(F_y) και στον άξονα Z(F_z), που ασκεί το κοπτικό εργαλείο στα τεμάχια χάλυβα, καθώς και της τραχύτητας, δηλαδή της μέσης τραχύτητας (R_a) και το εύρος της (R_t), του κάθε τεμαχίου μετά την κοπή. Τα κατεργασμένα τεμάχια είναι δύο.

Επιπλέον, για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 8 mm, το οποίο συνδέθηκε με μία άτρακτο και κατόπιν με την φρέζα. Η εργαλειομηχανή ήταν συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος εμφάνιζε μέσω διαγραμμάτων (LOAD Nt- Samples) τις προαναφερθέντες δυνάμεις. Τα στάδια και η διάταξη των πειραμάτων, παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη υποενοότητα.

3.1.2 Πειραματική Διάταξη

Η εργαλειομηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα είναι μία φρέζα -CNC (Computerized Numerical Control) η οποία φαίνεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Φρεζομηχανή CNC που έγινε χρήση στη παρούσα εργασία



Εικόνα 3.2: Διάταξη μηχανής (εργαλειοφόρος άξονας και κοπτικό εργαλείο)

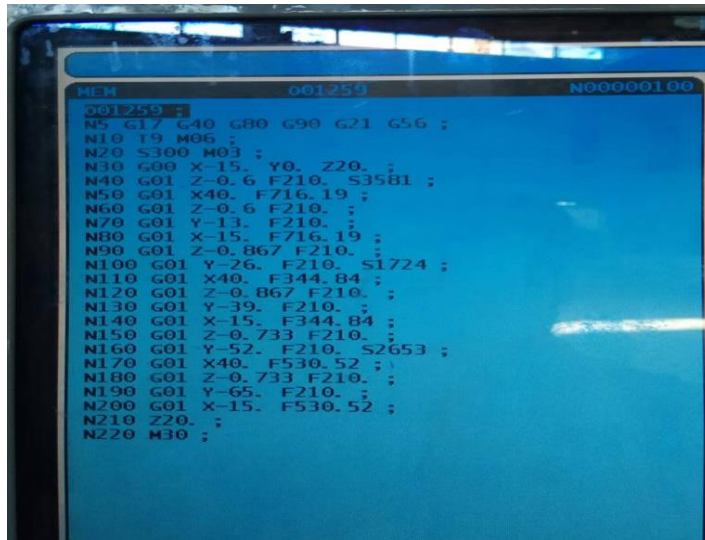
Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή, στην αρχή συνδέσαμε την άτρακτο με το κοπτικό εργαλείο υλικού καρβίδιο με διάμετρο 8mm και έπειτα τα συνδέσαμε στην εργαλειομηχανή (εικόνα 3.2).

Στην συνέχεια, εισαγάγαμε ένα κώδικα στη μηχανή χωρίς να έχουμε τοποθετήσει το τεμάχιο ακόμα, ως δοκιμή για να δούμε πως κινείται στους άξονες x, y και z. Όπως προαναφέρθηκε η κοπή ρυθμίστηκε σε 6 σετ κοπής, δηλαδή πάνω στο τεμάχιο το κοπτικό εργαλείο θα κόψει 6 φορές (6 πάσα) πάνω στους άξονες x και y. Ο άξονας z καθορίζεται κάθε φορά από το βάθος κοπής που εμείς θα εισάγουμε.

Έπειτα, με κατάλληλο τρόπο τοποθετήσαμε μια μετρητική πλάκα, η οποία αποτελείται από 11 οπές, πάνω στην «τράπεζα» της φρέζας. Επάνω στην πλάκα προσδέσαμε αντιδιαβητικά αυτής (στη πάνω και στη κάτω μεριά) με δυο κοχλίες το τεμάχιο χάλυβα (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Το πειραματικό τεμάχιο προσδεμένο στην μετρητική πλάκα



Εικόνα 3.4: G κώδικας

Έχοντας προσδέσει το τεμάχιο, εισάγουμε τον κώδικα (εικόνα 3.4) και ξεκινάμε την κοπή. Σε κάθε τεμάχιο το βάθος κοπής το εισάγουμε εμείς και παραμένει σταθερό. Οπότε, η κοπή γίνεται-ρυθμίζεται στους άξονες x και y. Για κάθε πλευρά του τεμαχίου έχουμε 6 πάσα (εικόνα 3.5) . Παρόλα αυτά να σημειωθεί ότι στο δεύτερο τεμάχιο, υλοποιήθηκαν 4 σελ κοπής επιπλέον και στην πίσω του μεριά. Οπότε συνολικά τα πάσα είναι 16. Γι' αυτό ο αριθμός πειραμάτων που αναγράφεται στον πίνακα στο παρακάτω κεφάλαιο, είναι 16.



Εικόνα 3.5: Τεμάχιο χάλυβα μετά την κοπή

Αφού έγινε η συλλογή των πειραματικών μετρήσεων μέσω κατάλληλου υπολογιστή για τις δυνάμεις κοπής, το επόμενο και τελευταίο μέγεθος, για το οποίο θα γίνουν μετρήσεις, είναι η επιφανειακή τραχύτητα. Έχοντας στην κατοχή μας κατάλληλο μετρητικό όργανο (τραχύμετρο), το οποίο αποτελείται από μία οθόνη και έναν αισθητήρα (εικόνα 3.6) έγιναν μετρήσεις για 2 μεγέθη: i) Η μέση τραχύτητα (R_a) και ii) το εύρος της τραχύτητας (R_t), δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της επιφανειακής τραχύτητας σε κάθε σημείο. Αυτό επετεύχθη με την τοποθέτηση του αισθητήρα-δείκτη επάνω σε κάθε «πάσο» κοπής, κρατώντας σταθερό, όσο γίνεται, τον δείκτη έτσι ώστε οι μετρήσεις που θα επιλέξουμε να είναι όσο πιο ακριβείς γίνεται.



Εικόνα 3.6: Τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+

3.1.3 Αποτελέσματα του πειράματος

Εφόσον έχει γίνει η διεξαγωγή όλων των πειραμάτων και έχουμε συλλέξει όλα τα πειραματικά αποτελέσματα, τότε μέσω μιας στατιστικής μεθόδου, τη μέθοδο του Taguchi (που έγινε και αναφορά στο κεφάλαιο 1.), καταλήγουμε στις τελικές πειραματικές τιμές. Αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1):

Αριθμός πειράματος	Πρόωση (mm/δόντι)	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Βάθος κοπής (mm)	F _x (N)	F _y (N)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	0.01	20	0.1	20	25	0.43	4.93
2	0.01	43.3	0.233	23	32	0.60	6.80
3	0.01	66.7	0.367	43	45	0.93	7.87
4	0.01	90	0.5	70	72	1.20	10.70
5	0.023	20	0.233	40	52	0.85	8.20
6	0.023	43.3	0.1	24	33	0.62	5.87
7	0.023	66.7	0.5	83	85	1.31	12.93
8	0.023	90	0.367	65	68	1.05	10.20
9	0.036	20	0.367	82	92	1.22	11.43
10	0.036	43.3	0.5	110	112	1.46	14.06
11	0.036	66.7	0.1	27	38	0.80	7.2
12	0.036	90	0.233	65	80	0.95	9.1
13	0.05	20	0.5	145	155	1.73	16.17
14	0.05	43.3	0.367	120	140	1.45	13.77
15	0.05	66.7	0.233	90	105	1.06	10.83
16	0.05	90	0.1	35	45	0.94	9.1

Πίνακας 1: Πειραματικά Αποτελέσματα

Όπου

- F_x είναι η δύναμη που ασκεί το εργαλείο στον άξονα των X
- F_y είναι η δύναμη που ασκεί το εργαλείο στον άξονα των Y
- Ra είναι η μέση τραχύτητα
- Rt είναι το εύρος της ταχύτητας(διαφορά μεγίστου και ελαχίστου σημείου)

3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ MINITAB

Το Minitab είναι ένα πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί ειδικά για στατιστικές αναλύσεις σε εφαρμογές ελέγχου ποιότητας και προσφέρει γι' αυτόν το σκοπό μία αμέτρητη γκάμα στατιστικών μεθόδων ανάλυσης. Η ανάπτυξη αυτή πραγματοποιήθηκε από τους ερευνητές Barbara F. Ryan, Thomas A. Ryan, Jr. και Brian L. Joiner το 1972 στο Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας. Η χρήση του προγράμματος αυτού γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη με την πάροδο του χρόνου λόγω της αυτοματοποίησης των υπολογισμών

και της ευκολίας δημιουργίας γραφημάτων, επιτρέποντας στον χρήστη να εστιάσει περισσότερο στην ανάλυση δεδομένων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

3.2.1. Regression analysis και περιγραφή διαγραμμάτων Main effects plot for means.

Η ανάλυση παλινδρόμησης, όπως αναφέρθηκε και στο κομμάτι της εισαγωγής είναι ένα σύνολο στατιστικών διαδικασιών η οποία βοηθάει στην κατανόηση της μεταβολής της εξαρτημένης, μεταβάλλοντας την μία ανεξάρτητη μεταβλητή και παράλληλα διατηρώντας τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές σταθερές.

Το πρόγραμμα Minitab είναι κατάλληλο για να βοηθήσει σε αυτή την ανάλυση. Εισάγοντας , λοιπόν, τα 4 μεγέθη προς ανάλυση (Fx, Fy, Ra, Rt) και τις 3 μεταβλητές (Πρόωση, Βάθος κοπής και Ταχύτητα κοπής), εμφανίζονται 4 μοντέλα παλινδρόμησης, ένα για το κάθε μέγεθος προς ανάλυση. Οπότε παρακάτω έχουμε τα εξής:

- Fx Ανάλυση Παλινδρόμησης

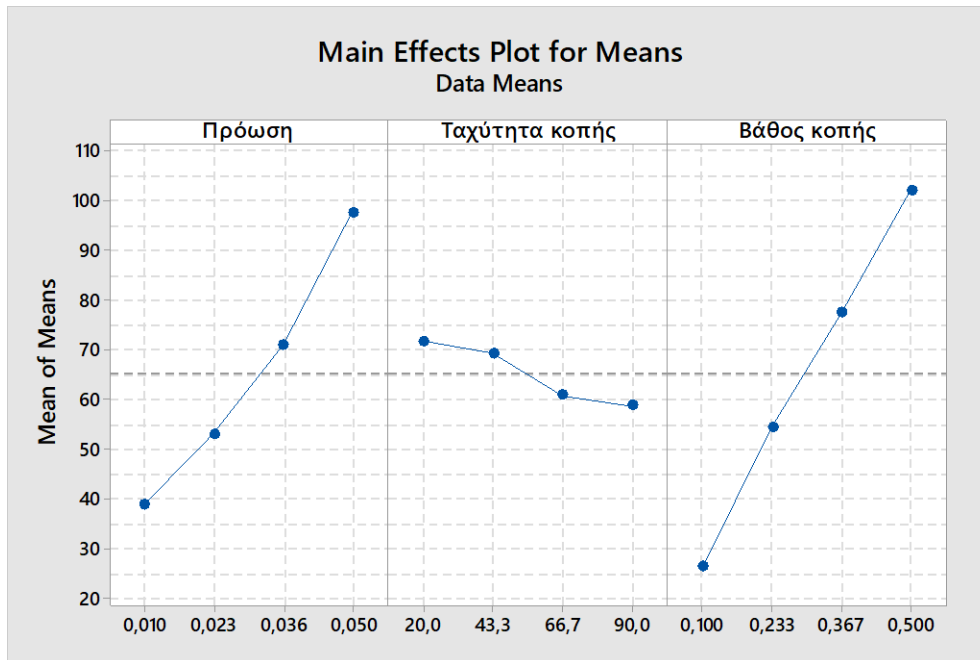
Regression Equation

$$F_x = -23,17 + 1458 \text{ Πρόωση} - 0,2036 \text{ Ταχύτητα κοπής} + 187,0 \text{ Βάθος κοπής} \quad (3.1)$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
10,0429	94,41%	93,01%	88,61%

Επειδή το R², το R²-adj και το R²-pred είναι πάνω από 85% σημαίνει ότι υπάρχει καλή συσχέτιση. Παρακάτω φαίνεται και το διάγραμμα Main Effects Plot for Means (εικόνα 3.7) που μας δείχνει πιο αναλυτικά την επιρροή που έχουν οι 3 μεταβλητές στην συνιστώσα δύναμη Fx.



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα Main Effects Plot for Means (F_x)

Όπως φαίνεται στην εξίσωση παλινδρόμησης, οι μεταβλητές που επηρεάζουν θετικά και σε μεγάλο βαθμό την F_x είναι η πρόωση και κυρίως το βάθος κοπής. Αυτό φαίνεται κατά κύριο λόγο στο παραπάνω διάγραμμα. Η επιρροή της ταχύτητας κοπής είναι πολύ μικρή και σχεδόν μηδαμινή η οποία επιπλέον επηρεάζει αρνητικά την F_x.

Παρακάτω στους πίνακες 2 και 3 φαίνονται πιο ειδικά η ανάλυση της διακύμανσης αλλά και οι συντελεστές των μεταβλητών.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	20425,4	6808,5	67,50	0,000
Πρόωση	1	7524,9	7524,9	74,61	0,000
Ταχύτητα κοπής	1	451,5	451,5	4,48	0,056
Βάθος κοπής	1	12449,0	12449,0	123,43	0,000
Error	12	1210,3	100,9		
Total	15	21635,8			

Πίνακας 2.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-23,17	9,22	-2,51	0,027	
Πρόωση	1458	169	8,64	0,000	1,00
Ταχύτητα κοπής	-0,2036	0,0962	-2,12	0,056	1,00
Βάθος κοπής	187,0	16,8	11,11	0,000	1,00

Πίνακας 3.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 2 προκύπτει ότι η πρόωση και το βάθος κοπής είναι στατιστικά σημαντικές παράμετροι για τη δύναμη F_x , με το βάθος κοπής να είναι η πιο σημαντική από τις δύο, ενώ η ταχύτητα κοπής είναι οριακά μη σημαντική.

- **F_y Ανάλυση Παλινδρόμησης**

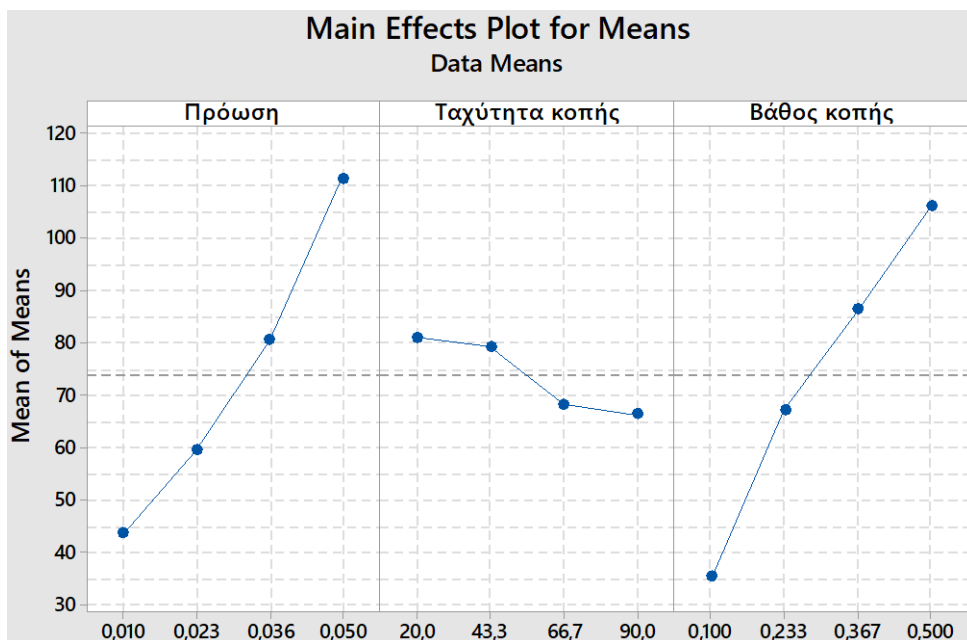
Regression Equation

$$F_y = -15,6 + 1690 \text{ Πρόωση} - 0,237 \text{ Ταχύτητα κοπής} + 173,3 \text{ Βάθος κοπής} \quad (3.2)$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
12,0347	92,49%	90,62%	85,25%

Όπως και στην F_x , επειδή και οι 3 τιμές του R^2 είναι άνω του 85 %, υπάρχει καλή συσχέτιση στην εξίσωση. Παρακάτω φαίνεται και το διάγραμμα Main Effects Plot for Means (εικόνα 3.8) που μας δείχνει πιο αναλυτικά την επιρροή που έχουν οι 3 μεταβλητές στην συνιστώσα δύναμη F_y .



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα Main Effects Plot for Means (Fy)

Όπως και προηγουμένως στην Fx, εδώ στην Fy οι μεταβλητές που την επηρεάζουν θετικά και σε μεγάλο βαθμό το βάθος κοπής και, σε αντίθεση με την Fx, αυτή τη φορά κυρίως η πρόωση. Αυτό φαίνεται κατά κύριο λόγο στο παραπάνω διάγραμμα. Η επιρροή της ταχύτητας κοπής είναι πολύ μικρή και σχεδόν μηδαμινή η οποία επιπλέον επηρεάζει αρνητικά την Fx.

Στους παρακάτω πίνακες 4 και 5 φαίνονται πιο ειδικά η ανάλυση της διακύμανσης αλλά και οι συντελεστές των μεταβλητών.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	21411,4	7137,1	49,28	0,000
Πρόωση	1	10107,2	10107,2	69,78	0,000
Ταχύτητα κοπής	1	610,9	610,9	4,22	0,062
Βάθος κοπής	1	10693,4	10693,4	73,83	0,000
Error	12	1738,0	144,8		
Total	15	23149,4			

Πίνακας 4.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-15,6	11,1	-1,41	0,184	
Πρόωση	1690	202	8,35	0,000	1,00
Ταχύτητα κοπής	-0,237	0,115	-2,05	0,062	1,00
Βάθος κοπής	173,3	20,2	8,59	0,000	1,00

Πίνακας 5.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4 προκύπτει ότι η πρόωση και το βάθος κοπής είναι στατιστικά σημαντικές παράμετροι για τη δύναμη F_y , με το βάθος κοπής να είναι εξίσου σημαντικ με την πρόωση κοπής, ενώ η ταχύτητα κοπής είναι οριακά μη σημαντική

- **Ra Ανάλυση Παλινδρόμησης**

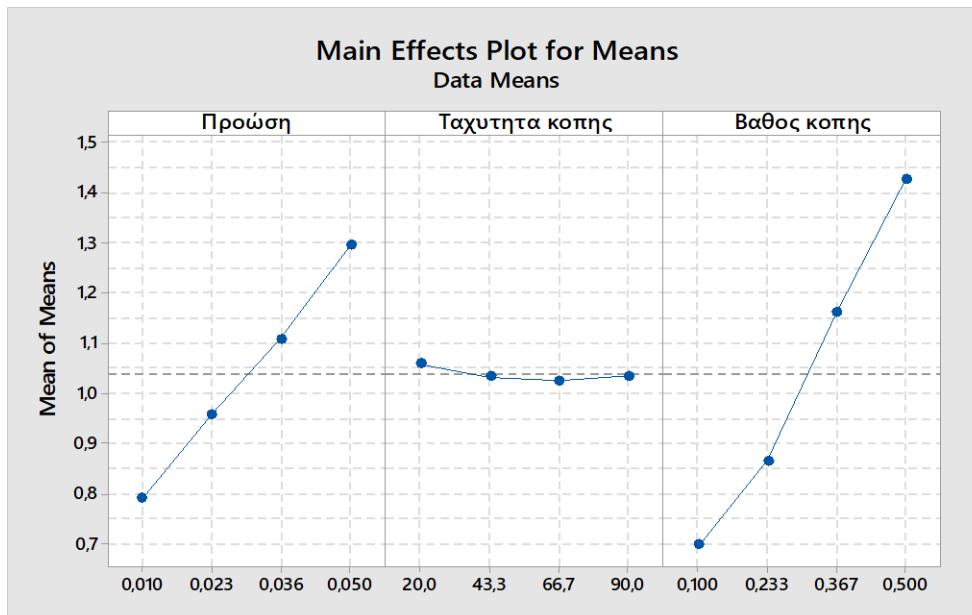
Regression Equation

$$Ra = 0,1248 + 12,523 \text{ Πρόωση} - 0,000321 \text{ Ταχύτητα κοπής} + 1,8593 \text{ Βάθος κοπής} \quad (3.3)$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0511690	98,27%	97,84%	96,85%

Όπως και στις δυνάμεις, έτσι και στη μέση τραχύτητα R_a οι τιμές R^2 , R^2 -adj και R^2 -pred είναι αρκετά μεγαλύτερες από το 85 %, οπότε και εδώ υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση στην εξίσωση. Παρακάτω φαίνεται και το διάγραμμα Main Effects Plot for Means (εικόνα 3.9) που μας δείχνει πιο αναλυτικά την επιρροή που έχουν οι 3 μεταβλητές στην συνιστώσα δύναμη R_a .



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα Main Effects Plot for Means (Ra)

Στην ανάλυση αυτή οι μεταβλητές που την επηρεάζουν θετικά και σε μεγάλο βαθμό την τραχύτητα Ra είναι η πρόωση και κυρίως το βάθος κοπής. Παρατηρείται ότι η αύξηση της Ra πραγματοποιείται απόλυτα γραμμικά με την πρόωση. Το βάθος κοπής επηρεάζει όπως είπαμε και πριν περισσότερο τη τραχύτητα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές και ενώ η αύξηση της Ra είναι γραμμική, η μεταβολή της σχέση με το βάθος κοπής δεν είναι σταθερή όπως με την πρόωση. Αυτά φαίνονται κατά κύριο λόγο στο παραπάνω διάγραμμα. Η επιρροή της ταχύτητας κοπής είναι πολύ μικρή για το εύρος ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και επηρεάζει ελαφρώς αρνητικά την Ra μέχρι την τιμή 43.3 m/min) ενώ στη συνέχεια οδηγεί σε μικρή αύξηση της Ra.

Στους παρακάτω πίνακες 6 και 7 φαίνονται πιο ειδικά η ανάλυση της διακύμανσης αλλά και οι συντελεστές των μεταβλητών.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1,78648	0,59549	227,44	0,000
Πρόωση	1	0,55503	0,55503	211,99	0,000
Ταχύτητα κοπής	1	0,00112	0,00112	0,43	0,525
Βάθος κοπής	1	1,23032	1,23032	469,90	0,000
Error	12	0,03142	0,00262		
Total	15	1,81790			

Πίνακας 6.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,1248	0,0470	2,66	0,021	
Πρόωση	12,523	0,860	14,56	0,000	1,00
Ταχύτητα κοπής	-0,000321	0,000490	-0,66	0,525	1,00
Βάθος κοπής	1,8593	0,0858	21,68	0,000	1,00

Πίνακας 7.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 6, προκύπτει ότι η πρόωση και το βάθος κοπής είναι στατιστικά σημαντικές παράμετροι για τη μέση τραχύτητα R_a , με το βάθος κοπής να είναι η πιο σημαντική από τις δύο, ενώ η ταχύτητα κοπής είναι οριακά μη σημαντική

- **Rt Ανάλυση Παλινδρόμησης**

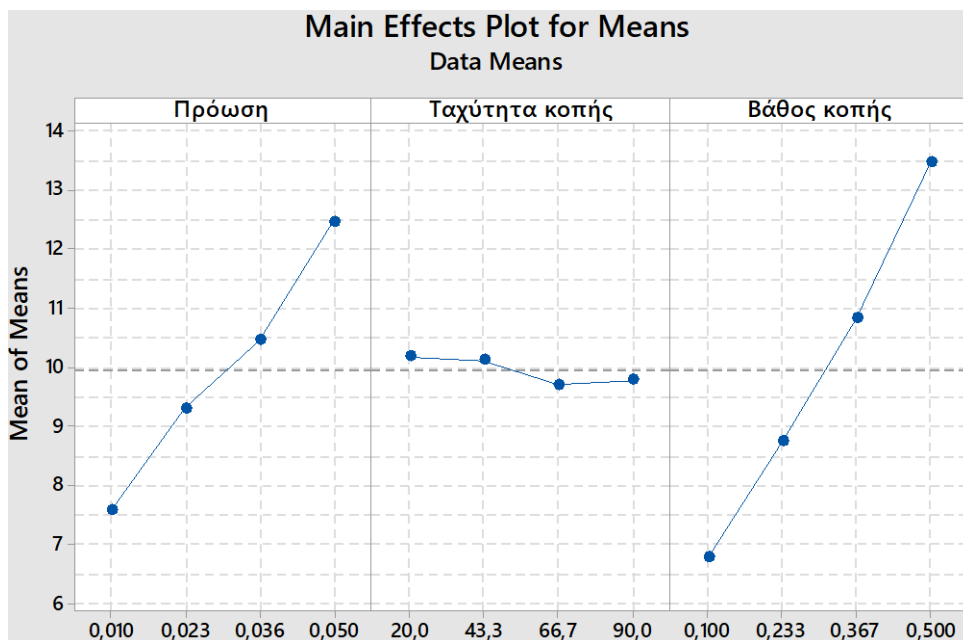
Regression Equation

$$R_t = 1,808 + 119,11 \cdot \text{Πρόωση} - 0,00703 \cdot \text{Ταχύτητα κοπής} + 16,607 \cdot \text{Βάθος κοπής} \quad (3.4)$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,397817	98,74%	98,43%	97,77%

Στο εύρος τραχύτητας R_t , όπως και στα υπόλοιπα μεγέθη, φαίνεται από τις τιμές του R^2 να υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση στην εξίσωση παλινδρόμησης. Παρακάτω φαίνεται και το διάγραμμα Main Effects Plot for Means (εικόνα 3.10) που μας δείχνει πιο αναλυτικά την επιρροή που έχουν οι 3 μεταβλητές στην συνιστώσα δύναμη R_t .



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα Main Effects Plot for Means (Rt)

Στην ανάλυση αυτή οι μεταβλητές που επηρεάζουν θετικά και σε μεγάλο βαθμό το εύρος της τραχύτητας Rt είναι η πρόωση και κυρίως το βάθος κοπής. Παρατηρείται ότι η αύξηση της Rt πραγματοποιείται απόλυτα γραμμικά με το βάθος κοπής, δηλαδή η μεταβολή είναι σταθερή. Η πρόωση επηρεάζει όπως είπαμε και πριν λιγότερο τη τραχύτητα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές και επίσης ενώ η αύξηση της Rt είναι γραμμική, η μεταβολή της σχέση με τη πρόωση δεν είναι σταθερή. Αυτά φαίνονται κατά κύριο λόγο στο παραπάνω διάγραμμα. Η επιρροή της ταχύτητας κοπής, όπως και στα υπόλοιπα διαγράμματα είναι πολύ μικρή και σχεδόν μηδαμινή η οποία επιπλέον επηρεάζει αρνητικά την Rt.

Στους παρακάτω πίνακες 8 και 9 φαίνονται πιο ειδικά η ανάλυση της διακύμανσης αλλά και οι συντελεστές των μεταβλητών.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	148,910	49,6365	313,64	0,000
Πρόωση	1	50,208	50,2084	317,26	0,000
Ταχύτητα κοπής	1	0,538	0,5384	3,40	0,090
Βάθος κοπής	1	98,163	98,1628	620,27	0,000
Error	12	1,899	0,1583		
Total	15	150,809			

Πίνακας 8.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,808	0,365	4,95	0,000	
Πρόωση	119,11	6,69	17,81	0,000	1,00
Ταχύτητα κοπής	-0,00703	0,00381	-1,84	0,090	1,00
Βάθος κοπής	16,607	0,667	24,91	0,000	1,00

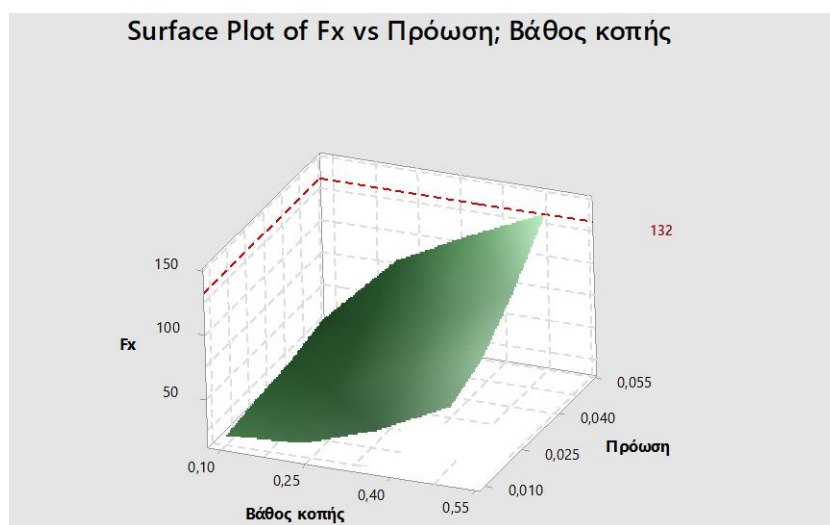
Πίνακας 9.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8 προκύπτει ότι η πρόωση και το βάθος κοπής είναι στατιστικά σημαντικές παράμετροι για το εύρος της τραχύτητας R_t , με το βάθος κοπής να είναι η πιο σημαντική από τις δύο, ενώ η ταχύτητα κοπής είναι οριακά μη σημαντική

3.2.2 Ανάλυση γραφημάτων/επιφανειών

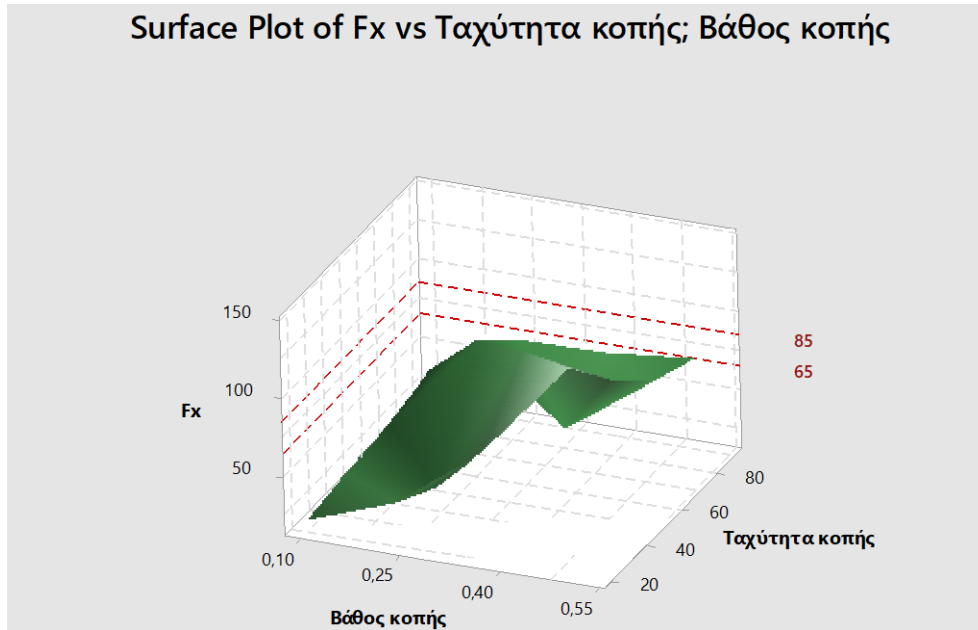
Με τη βοήθεια του προγράμματος minitab καταφέραμε να φτιάξουμε τις επιφάνειες-γραφήματα που απεικονίζουν τη διακύμανση κάθε μεγέθους σε σχέση με τις μεταβλητές του πειράματος. Δηλαδή για κάθε μέγεθος (F_x , F_y , R_a , R_t) θα κατασκευαστούν 3 γραφήματα λόγω του ότι έχουμε 3 διαφορετικές μεταβλητές (Πρόωση, Βάθος κοπής, Ταχύτητα κοπής) οπότε είναι και λογικό να εμφανίζονται 3 διαφορετικοί συνδιασμοί όπως θα παρατηρήσουμε και παρακάτω

F_x



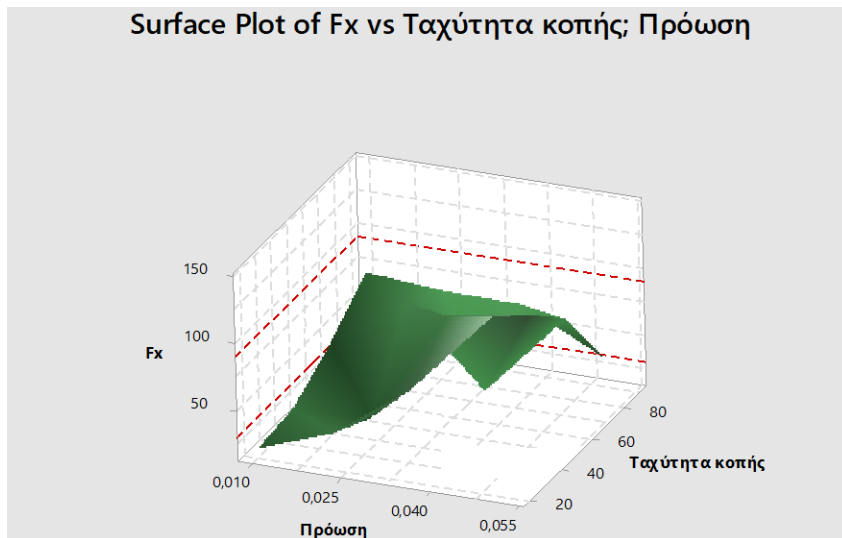
Εικόνα 3.11: Γράφημα Βάθος κοπής – Πρόωση με την F_x

Στο παραπάνω γράφημα στην εικόνα 3.11 βλέπουμε το πως μεταβάλλεται η δύναμη F_x συναρτήσει της Πρόωσης και του Βάθους κοπής. Παρατηρείται, ότι με την αύξηση κυρίως της πρόωσης αλλά και του βάθους κοπής (σε μικρότερο βαθμό), υπάρχει αύξηση της F_x . Δηλαδή, όσο αφορά το βάθος κοπής, μέχρι το 0,25 φαίνεται να παραμένει σταθερή, από το 0,25-0,38 φαίνεται να υπάρχει μία γραμμική αύξηση της F_x , ενώ από το 0,40 και μετά (όπου η αύξηση του βάθους κοπής ελαττώνεται) παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της F_x η οποία οφείλεται, κυρίως, στην αύξηση της πρόωσης.



Εικόνα 3.12: Γράφημα Βάθος κοπής – Ταχύτητα κοπής με F_x

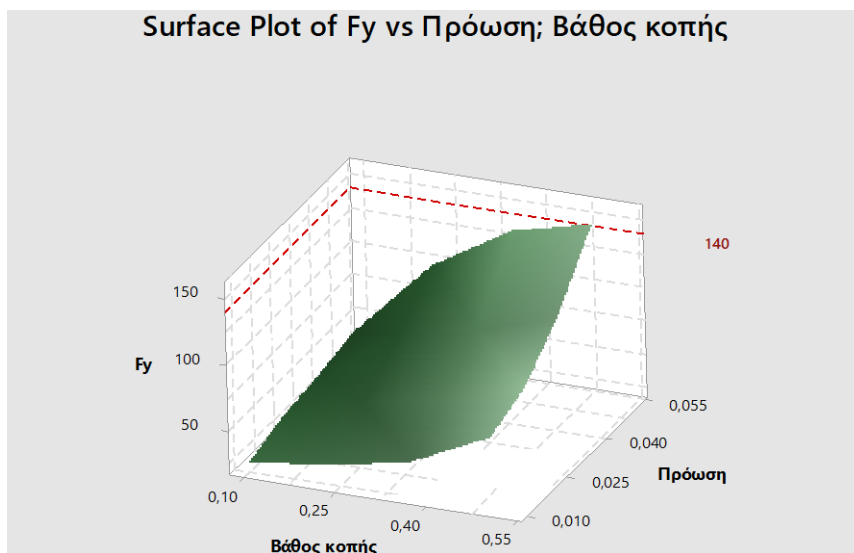
Εδώ βλέπουμε το γράφημα της εικόνας 3.12 της F_x συναρτήσει του βάθους κοπής και της ταχύτητας κοπής. Παρατηρείται, όπως και στο προηγούμενο σχήμα ότι η μεταβολή της F_x οφείλεται στην αύξηση του βάθους κοπής και όχι στη ταχύτητα κοπής. Πιο αναλυτικά, η F_x αυξάνεται μέχρι τα 85N (οπού παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του γραφήματος) όταν το βάθος κοπής βρίσκεται στα 0,325mm και η ταχύτητα στα 80m/min, ενώ μετά παρατηρείται μια ραγδαία μείωση της F_x η οποία έπειτα σταθεροποιείται στα 65N.



Εικόνα 3.13 : Γράφημα πρόωση-Ταχύτητα κοπής με F_x

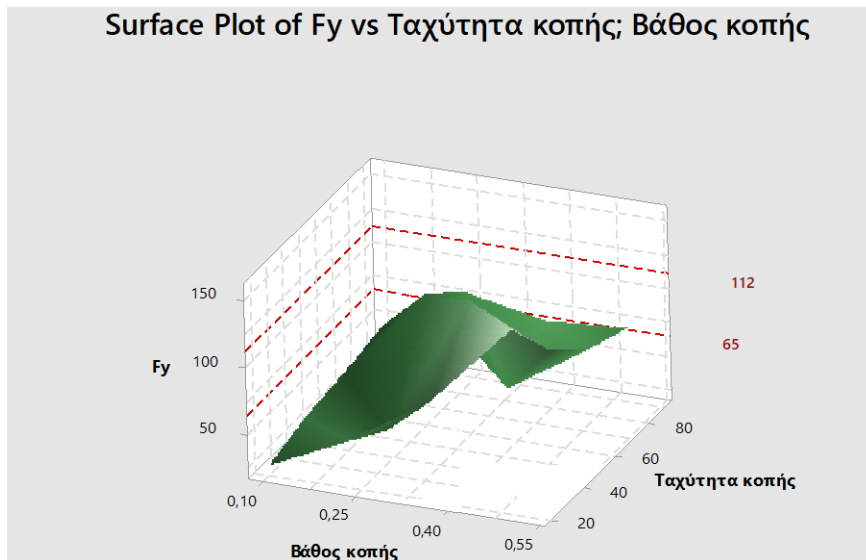
Το παραπάνω γράφημα στην εικόνα 3.13 με τη σειρά του απεικονίζει την F_x συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής. Βλέπουμε ότι η πρόωση συμβάλει πολύ σημαντικά στην αύξηση της δύναμης F_x , πράγμα που η ταχύτητα κοπής δεν κάνει. Πιο αναλυτικά, η F_x μεταβάλλεται γραμμικά με τη πρόωση, ενώ με τη ταχύτητα κοπής η μεταβολή είναι συγκριτικά πολύ πιο μικρή. Η F_x παίρνει τη μέγιστη τιμή στα 90N και ύστερα παρατηρείται μείωση η οποία καταλήγει στα 30N.

- F_y



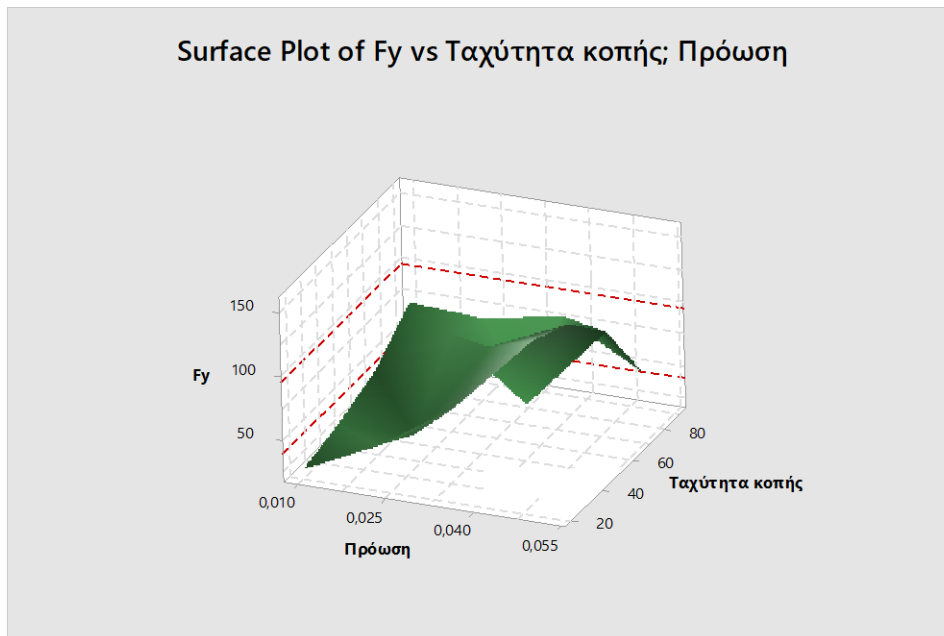
Εικόνα 3.14: Γράφημα Βάθος κοπής – Πρόωση με F_y

Στο παραπάνω γράφημα της εικόνας 3.14 βλέπουμε το πως μεταβάλλεται η δύναμη F_y συναρτήσει της Πρόωσης και του Βάθους κοπής. Πιο αναλυτικά, μέχρι το βάθος κοπής να φτάσει την τιμή 0,39mm και πρόωση 0,33, παρατηρείται αύξηση της F_y . Ύστερα έχουμε μία απότομη μεταβολή της πρόωσης με την τραχύτητα, σε αντίθεση όμως με το βάθος κοπής του οποίου η αύξηση είναι μικρή. Η τελική τιμή της δύναμης κοπής F_y είναι 140.



Εικόνα 3.15: Γράφημα Βάθος κοπής – Ταχύτητα κοπής με F_y

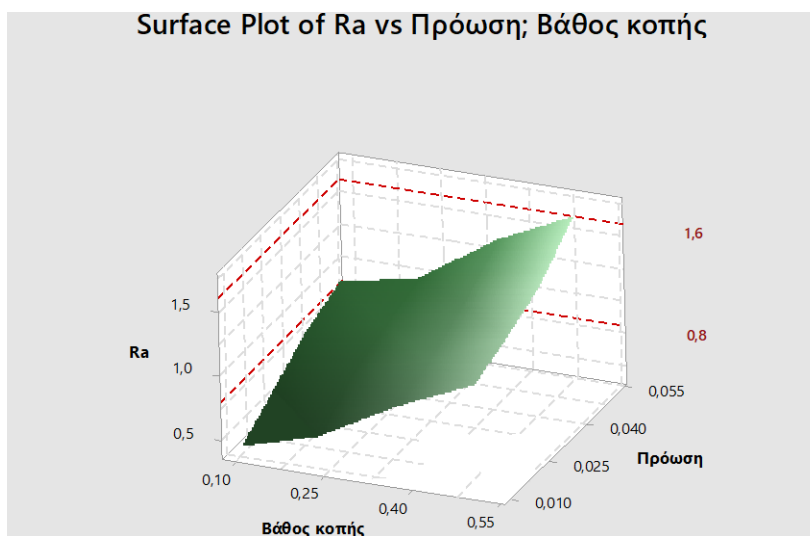
Παρατηρείται στο γράφημα της εικόνας 3.15 ότι η επιφάνεια που σχηματίζει η F_y με το Βάθος κοπής και την ταχύτητα κοπής, μοιάζει με αυτή της F_x συναρτήσεως των αντίστοιχων μεταβλητών. Η F_y αυξάνεται μέχρι τα 112N (οπού παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του γραφήματος) όταν το βάθος κοπής βρίσκεται στα 0,35mm και η ταχύτητα στα 70m/min, ενώ μετά παρατηρείται μια ραγδαία μείωση της F_y η οποία έπειτα σταθεροποιείται στα 65N.



Εικόνα 3.16: Γράφημα πρόωση-Ταχύτητα κοπής με Fy

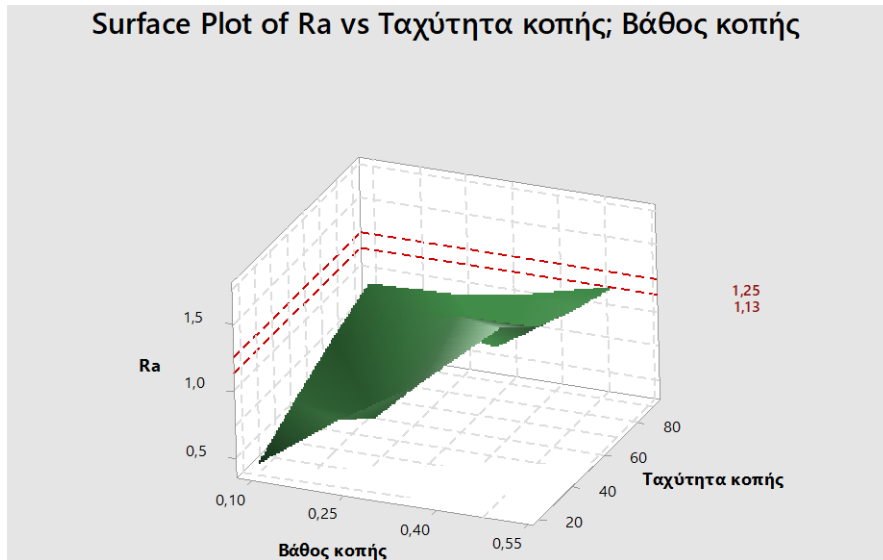
Όπως και τα προηγούμενα διαγράμματα, έτσι και η επιφάνεια στην εικόνα 3.16 αυτή της Fy συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής μοιάζει με το αντίστοιχο της Fx. Παρατηρείται λοιπόν ότι η μέγιστη τιμή που παίρνει η Fy είναι στα 95 N με βάθος κοπής περίπου στα 0,35mm και ταχύτητα κοπής 60mm/min, ενώ μετά παρατηρείται μία μείωση που καταλήγει με την Fy=40N.

- **Ra**



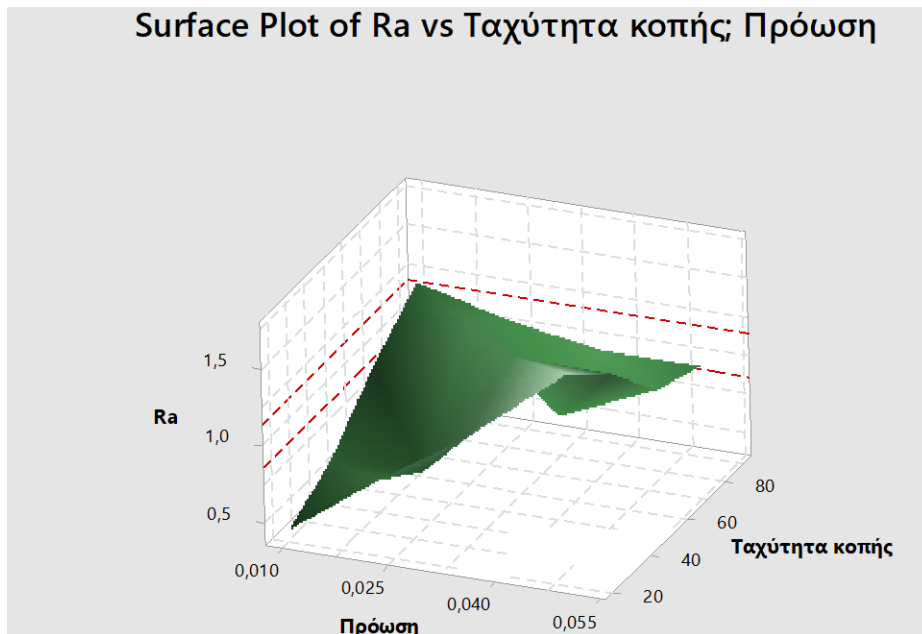
Εικόνα 3.17: Γράφημα Βάθος κοπής – Πρόωση με Ra

Εδώ έχουμε το γράφημα της εικόνας 3.17 της τραχύτητας Ra συναρτήσει της πρόωσης και του βάθους κοπής. Η Ra αυξάνεται και με την πρόωση και με το βάθος κοπής. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι είναι πιο έντονη η επίδραση του βάθους κοπής. Η τελική τιμή της Ra σύμφωνα με το γράφημα είναι 1,6.



Εικόνα 3.18: Γράφημα Βάθος κοπής – Ταχύτητα κοπής με Ra

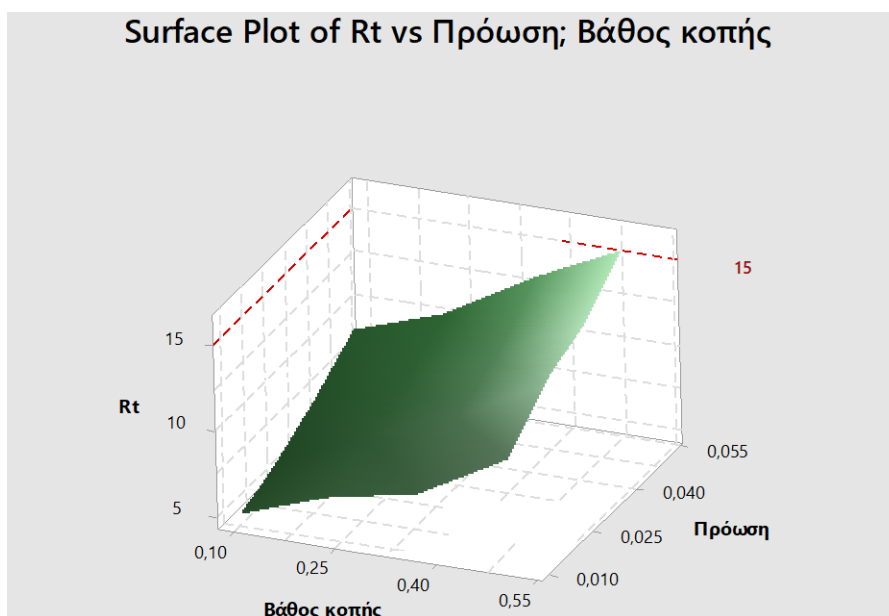
Στο γράφημα στην εικόνα 3.18 αυτό περιγράφεται η μεταβολή της Ra με το βάθος κοπής και την ταχύτητα κοπής. Παρατηρείται ότι (περίπου) μέχρι την τιμή 0,35 mm του βάθους κοπής και 20-70 mm/min τα 3 αυτά μεγέθη αυξάνονται γραμμικά έως στο σημείο 1,25 όπου και η Ra παίρνει την μέγιστη τιμή. Έπειτα, παρατηρείται μία μικρή μείωση μέχρι να φτάσει την τιμή 1,13 και από κει και ύστερα παραμένει σταθερή.



Εικόνα 3.19: Γράφημα πρόωση-Ταχύτητα κοπής με Ra

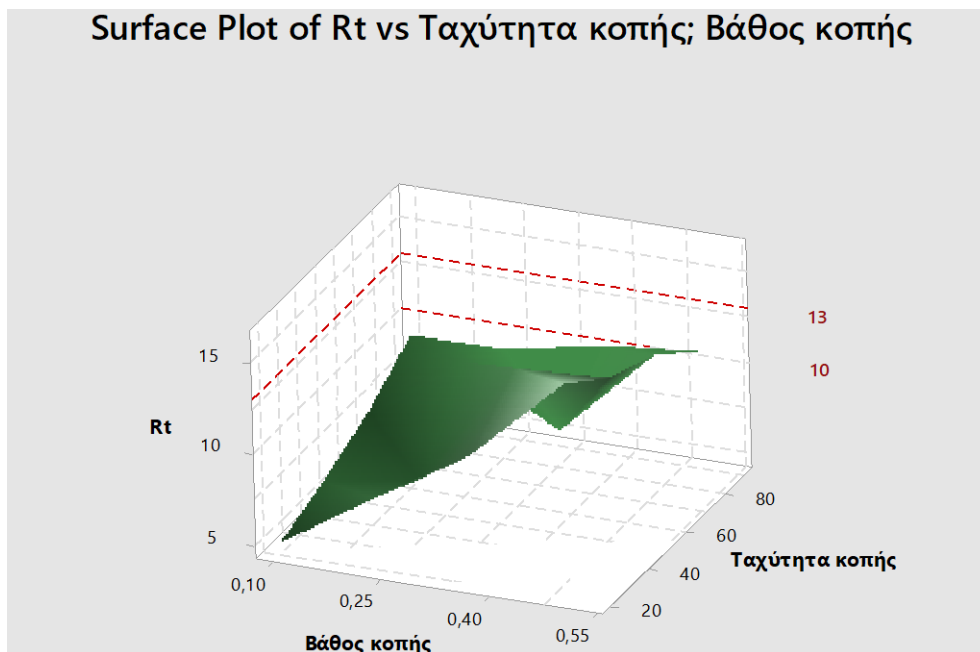
Στο γράφημα (εικόνα 3.19) αυτό βλέπουμε πώς μεταβάλλεται η Ra με την πρόωση και την ταχύτητα κοπής. Παρατηρούμε ότι στην αρχή υπάρχει μία μικρή γραμμική αύξηση της τραχύτητας η οποία μετά εξελίσσεται σε απότομη αύξηση όπου και η επιφάνεια παρουσιάζει μέγιστο στην τιμή της $Ra = 1,14$ όπου και η ταχύτητα κοπής πιάνει την μέγιστη της τιμή, ενώ η τελική της τιμή είναι 0,86.

- **Rt**



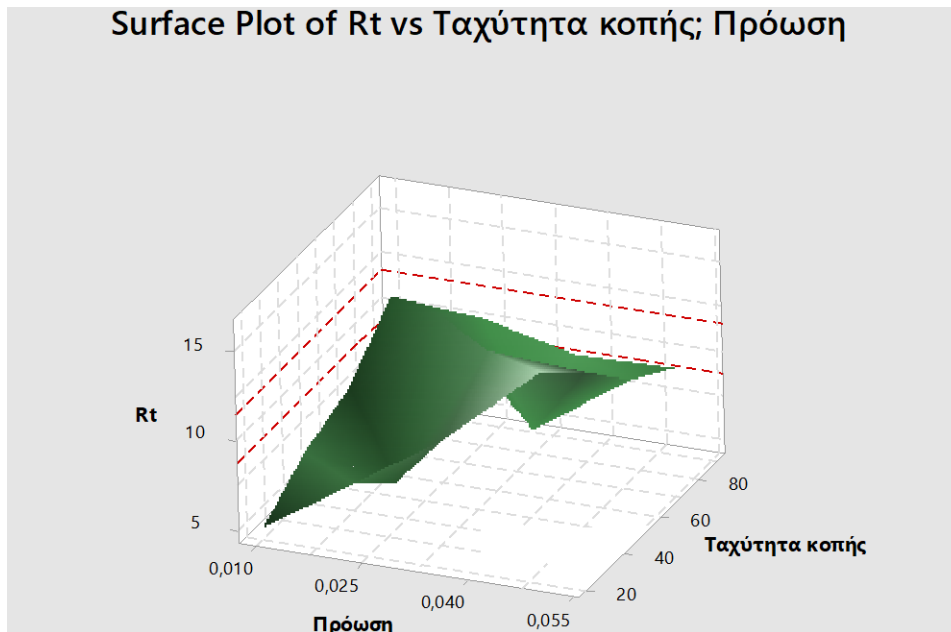
Εικόνα 3.20: Γράφημα Βάθος κοπής – Πρόωση με Rt

Εδώ βλέπουμε το γράφημα της R_t στην εικόνα 3.20 συναρτήσει της Πρόωσης και του Βάθους κοπής. Η R_t αυξάνεται και με την πρόωση και με το βάθος κοπής. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι είναι πιο έντονη η επίδραση του βάθους κοπής. Το εύρος της τραχύτητας συνεχώς αυξάνεται και η τελική τιμή που παίρνει, η οποία είναι και η μέγιστη, είναι $R_t=15$.



Εικόνα 3.21: Γράφημα Βάθος κοπής – Ταχύτητα κοπής με R_t

Σε αυτό το γράφημα της εικόνας 3.21 περιγράφεται η μεταβολή της R_t συναρτήσει του Βάθους κοπής και της ταχύτητας κοπής. Η R_t αυξάνεται και με την πρόωση και με το βάθος κοπής. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι είναι πιο έντονη η επίδραση του βάθους κοπής. Η R_t παίρνει την μέγιστη της τιμή ($R_t = 13$) και έπειτα υπάρχει μία μείωση που λαμβάνει και την τελική της τιμή $R_t=10$.



Εικόνα 3.23: Γράφημα πρόωση-Ταχύτητα κοπής με Rt

Τέλος, στο διάγραμμα της εικόνας 3.23 μας περιγραφεί την μεταβολή της Rt συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής. Η μεταβολή της ταχύτητας κοπής με την πρόωση είναι γραμμική, σε αντίθεση με την Rt η οποία δεν είναι ιδιαίτερα ομαλή. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, η Rt παίρνει μία μέγιστη τιμή ($Rt=11,5$) και η τελική της τιμή (μετά την μείωση) είναι $Rt=8,5$.

3.2.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων του μοντέλου Παλινδρόμησης (Regression Model).

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις [(3.1), (3.2), (3.3), (3.4)] που παρουσιάσαμε παραπάνω για το κάθε 1 από τα 4 μεγέθη και σε συνδυασμό των πειραματικών μεγεθών (τιμές X, Y), που τα παρουσιάσαμε στον πίνακα στην ενότητα 3, παράγουμε τις καινούριες-προβλεπόμενες τιμές των μεγεθών (τιμές Y'). Παρακάτω φαίνονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές X βάση των οποίων υπολογίζονται οι προβλεπόμενες τιμές των 4 μεγεθών:

Ύστερα από αντικαταστάσεις στις εξισώσεις παλινδρόμησης, τα αποτελέσματα των τιμών των προβλεπόμενων τιμών Υ' παρουσιάζονται συμπυκνωμένα στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός πειράματ ος	Πρόωση (mm/δόν τι) f	Ταχύτητ α κοπής (m/min) v	Βάθος κοπής (mm) a	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ			
				Fx	Fy	Ra	Rt
1	0.01	20	0.1	6,038	13,89	0,42954	4,5192
2	0.01	43.3	0.233	26,1651	31,4168	0,66935	6,564132
3	0.01	66.7	0.367	46,4589	49,0932	0,91098	8,624968
4	0.01	90	0.5	66,586	66,62	1,15079	10,6699
5	0.023	20	0.233	19,6824	23,9259	0,5804	5,810784
6	0.023	43.3	0.1	-9,9325	-4,6451	0,32563	3,438254
7	0.023	66.7	0.5	60,1033	59,1291	1,06184	9,916552
8	0.023	90	0.367	30,4884	30,5581	0,80708	7,544022
9	0.036	20	0.367	93,875	104,101	1,25157	12,050129
10	0.036	43.3	0.5	114,002	121,628	1,49138	14,095061
11	0.036	66.7	0.1	34,4379	46,7621	0,74015	7,287759
12	0.036	90	0.233	54,565	64,2889	0,97995	9,332691
13	0.05	20	0.5	139,158	150,81	1,67418	15,9264
14	0.05	43.3	0.367	109,543	122,239	1,41941	13,55387
15	0.05	66.7	0.233	79,7209	93,471	1,16276	11,16403
16	0.05	90	0.1	50,106	64,9	0,90799	8,7915

Πίνακας 9.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 9 με αυτά του πίνακα 1 παρατηρείται ότι κάποιες από τις προβλεπόμενες τιμές της ανάλυσης παλινδρόμησης, έχουν μικρή έως και ελάχιστη διαφορά με τις πειραματικές ενώ σε κάποιες άλλες η διαφορά είναι πιο αισθητή.

3.2.4. Εύρεση του MAPE στο μοντέλο παλινδρόμησης.

Ορισμός και εύρεση του MAPE

Το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος MAPE (mean absolute percentage error), γνωστό και ως μέση απόκλιση απόλυτης ποσοστιαίας απόκλισης MAPD (mean absolute percentage deviation) είναι ένα μέτρο για την ακρίβεια της πρόβλεψης σε μία μέθοδο προσχεδίασης στη στατιστική. Όπως για παράδειγμα στη περίπτωση μας που θέλουμε να προβλέψουμε με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την τραχύτητα και τη δύναμη που

ασκεί το κοπτικό εργαλείο στο τεμάχιο χάλυβα. Τις περισσότερες φορές η ακρίβεια αυτή αποδίδεται με ποσοστό. Η εξίσωση από την οποία υπολογίζεται το MAPE είναι η παρακάτω:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{At - Ft}{At} \right| \quad (3.5)$$

,όπου A_t είναι η πραγματική τιμή (στην προκειμένη περίπτωση η πειραματική Y) και η F_t είναι η τιμή που έχουμε προβλέψει από το μοντέλο παλινδρόμησης (η τιμή Y'). Όπως φαίνεται και από την εξίσωση η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής διαιρείται με την πραγματική τιμή. Η πράξη μέσα στην απόλυτη τιμή πραγματοποιείται τόσες φορές όσα και τα σημεία n και έπειτα προστίθενται όλα μαζί. Τέλος, το αποτέλεσμα της πρόσθεση διαιρείται με τον αριθμό σημείων και μετατρέπεται σε ποσοστό πολλαπλασιάζοντας το με το 100%.

Έχοντας βρει τις προβλεπόμενες τιμές (Y') και ξέροντας τις πραγματικές-πειραματικές τιμές μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε το εσωτερικό της απόλυτης τιμής. Βρίσκοντας το εσωτερικό της απόλυτης τιμής το μόνο που μένει είναι να εφαρμοστεί ο παραπάνω τύπος για την εύρεση του MAPE. Δηλαδή, αρχικά γίνεται το άθροισμα των αποτελεσμάτων σε κάθε μέγεθος (F_x, F_y, R_a, R_t), ύστερα γίνεται η διαίρεση με τον αριθμό των σημείων n ($n=16$) και τέλος για να μετατραπεί σε ποσοστό γίνεται ένας πολλαπλασιασμός με το 100%. Οπότε τα MAPE των τεσσάρων μεγεθών παρουσιάζονται στον πίνακα 10:

MAPE (Fx%)	MAPE (Fy%)	MAPE (Ra%)	MAPE (Rt%)
17,3208	15,9488	8,6066	8,7899

Πίνακας 10.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Αποτελέσματα μοντέλων νευρωνικών δικτύων και αξιολόγησή τους

Το matlab αποτελεί ένα πρόγραμμα αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς, η οποία λειτουργεί με βάση την άλγεβρα μητρώων. Μολονότι χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, το περιεχόμενό του σε εντολές άλλων γλωσσών όπως η c++ γενικεύει την χρήση του. Στον μαθηματικό κλάδο πραγματοποιεί πραγματικές, μιγαδικές, επιλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών ενώ στον στατιστικό ιστογράμματα τομεογράμματα ραβδογράμματα εμβαδογράμματα και άλλα

4.1. Αποτελέσματα με χρήση νευρωνικού δικτύου MLP

4.1.1. Λειτουργία του κώδικα (Script)

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο της εισαγωγής, το MLP Multi Layer Perceptron είναι ένα δίκτυο τεχνητών νευρώνων, τροφοδότησης προς τα εμπρός (feed-forward network) που είναι οργανωμένα σε στρώματα (layers). Η αξιοποίηση και η ανάλυση του νευρωνικού αυτού δικτύου υλοποιείται , στη δική μας περίπτωση, μέσω του προγράμματος Matlab. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κώδικα που έχει τροποποιηθεί για να καταστεί δυνατόν να εξαχθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα. Ο κώδικας (script) που «έτρεξε» στο πρόγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:

```
1- a=[0.1,0.233,0.367,0.5,0.233,0.1,0.5,0.367,0.367,0.5,0.1,0.233,0.5,0.367,0.233,0.1];
2- fz=[0.01,0.01,0.01,0.01,0.023,0.023,0.023,0.023,0.036,0.036,0.036,0.036,0.05,0.05,0.05,0.05];
3- vc=[20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90];
4- Fx=[20,23,43,70,40,24,83,65,82,110,27,65,145,120,90,35];
5- Fy=[25,32,45,72,52,33,85,68,92,112,38,80,155,140,105,45];
6- Ra=[0.43,0.60,0.93,1.20,0.85,0.62,1.31,1.05,1.22,1.46,0.80,0.95,1.73,1.45,1.06,0.94];
7- Rt=[4.93,6.80,7.87,10.70,8.20,5.87,12.93,10.20,11.43,14.06,7.2,9.1,16.17,13.77,10.83,9.1];
8-
9- a1=a./max(a);
10- fz1=fz./max(fz);
11- vc1=vc./max(vc);
12- Fx1=Fx./max(Fx);
13- Fy1=Fy./max(Fy);
14- Ra1=Ra./max(Ra);
15- Rt1=Rt./max(Ra);
16- neur=2;
17-
```

```

18- inputs=[a1;fz1;vc1];
19- output=[Fx1;Fy1]; ή output=[Ra1;Rt1]
20-
21- net1=feedforwardnet([neur],'trainlm');
22- net1.divideFcn='divideind';
23- net1.divideParam.trainInd=[1 2 5 6 7 9 11 13];
24- net1.divideParam.valInd=[4 8 12];
25- net1.divideParam.testInd=[3 10 14];
26-
27- [net,tr]=train(net1,inputs,output);
28- res=net(inputs);
29- res1=res(1,:).*max(Fx);
30-
31- sum1=0;
32- for i=1:8
33- ind1=net1.divideParam.trainInd(i);
34- temp1=abs(res1(ind1)-Fx(ind1))/Fx(ind1)*100;
35- sum1=sum1+temp1;
36- end
37- MAPEtrain=sum1/8;
38-
39- sum2=0;
40- for i=1:3
41- ind1=net1.divideParam.testInd(i);
42- temp2=abs(res1(ind1)-Fx(ind1))/Fx(ind1)*100;
43- sum2=sum2+temp2;
44- end
45- MAPEtest=sum2/3;
46-
47- MSEtrain=tr.best_perf;
48- MSEtest=tr.best_tperf;

```

Στόχος της εφαρμογής του κώδικα αυτού είναι η λήψη τιμών σε συγκεκριμένα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι το MAPEtest, MAPEtrain, MSEtest, MSEtrain (το train και το test υποδηλώνουν εκπαίδευση και έλεγχο αντίστοιχα). Μέσω του MAPEtest και MAPEtrain μπορεί να υπολογιστεί το MAPE καθώς αντίστοιχα μέσω του MSEtest και MSEtrain γίνεται να υπολογιστεί το MSE με τρόπο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Αρχικά, όπως φαίνεται στη γραμμή 19 του κειμένου, τα μεγέθη που λαμβάνονται ως έξοδοι είναι δύο, η Fx και Fy. Αυτό συμβαίνει διότι στο συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο δεν γίνεται να απομονώσουμε μία συνιστώσα ως έξοδος, διότι θεωρητικά η δύναμη (η συνισταμένη) είναι ένα μέγεθος και όχι δύο. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με την τραχύτητα (Ra και Rt). Γι' αυτόν τον λόγο δημιουργούμε δύο δίκτυα, ένα με εξόδους (output) τη δύναμη (Fx και Fy) και ένα ξεχωριστό για την τραχύτητα (Ra και Rt).

Στην αρχή του κειμένου (από την γραμμή 1 μέχρι και την γραμμή 7) έχουν εισαχθεί όλες οι πειραματικές τιμές, δηλαδή και των τριών μεταβλητών (πρόωση, βάθος κοπής και ταχύτητα κοπής) και των τεσσάρων μεγεθών (Fx, Fy, Ra, Rt). Οι μετρήσεις αυτές καθώς και

η υπόλοιπη δομή του κειμένου παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας του νευρωνικού, εκτός από 2 σημεία. Το πρώτο είναι ο αριθμός των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο το οποίο αλλάζει από τη γραμμή 16 του κειμένου και δεύτερον η χρήση διαφορετικών αλγορίθμων εκπαίδευσης που αλλάζει στη γραμμή 21. Οι αριθμοί των νευρώνων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση του νευρωνικού δικτύου στη δική μας περίπτωση είναι: **2, 3, 4, 5, 6, 7**. Οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης που θα εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο δίκτυο είναι τέσσερις: **i) trainlm, ii) traingda, iii) traingdm ,iv)trainscg**.

Σε κάθε έναν από τους 4 αλγορίθμους εκπαίδευσης, τρέχουμε όλους τους αριθμούς των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Για παράδειγμα, όταν πρόκειται να χρησιμοποιήσω τον trainlm, τον κώδικα θα τον λειτουργήσω με **αριθμό νευρώνων = 2, 3, ..., 7**. Το ίδιο θα κάνω και με τους υπόλοιπους αλγόριθμους εκπαίδευσης.

Για κάθε κρυφό αριθμό νευρώνων σε συγκεκριμένο αλγόριθμο εκπαίδευσης, το κάθε δίκτυο θα το επαναλάβουμε 20 φορές. Για παράδειγμα, αν ξεκινήσω με τον αλγόριθμο trainlm και βάλω αριθμό νευρώνων=2, τότε το συγκεκριμένο δίκτυο θα το «τρέξουμε» 20 φορές και έτσι θα ληφθούν 20 διαφορετικές τετράδες αποτελεσμάτων (MAPEtrain, MAPEtest, MSEtrain, MSEtest). Έπειτα, για να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε μία τιμή για τα αποτελέσματα αυτά, βρίσκουμε, για το κάθε ένα, έναν μέσο όρο των 20 τιμών. Δηλαδή, έστω ξ οι τιμές που έχουμε βρει για το MAPEtest, τότε αυτό θα ισούται ως εξής:

$$\text{MAPEtest} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \xi_i \quad (4.1)$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και τα υπόλοιπα 3 αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι το δείγμα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό και όχι απλά μια μεμονωμένη τυχαία τιμή η οποία να μην αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο νευρωνικό. Για παράδειγμα, έστω ότι λειτουργεί το νευρωνικό δίκτυο με αλγόριθμο trainscg και αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο ίσο με 5. Αν το τρέξουμε μία φορά υπάρχει η πιθανότητα να μας βγάλει μεγάλο σφάλμα, ενώ οι επόμενες 19 μικρό. Οπότε στην πραγματικότητα το συγκεκριμένο νευρωνικό παρόλο που έβγαλε μικρό σφάλμα στην πρώτη δοκιμή, να είναι εν τέλει υποψήφιο για το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο.

4.1.2. Ορισμός του MSE

Αρχικά, μαζί με το MAPE, έχουμε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα MSE (Mean Squared Error) ή αλλιώς μέση τετραγωνική απόκλιση MSD (Mean Squared Deviation) μιας

εκτίμησης (πιο συγκεκριμένα για της εκτίμησης μιας τιμής που δεν έχει παρατηρηθεί), είναι το μέτρο υπολογισμού των τετραγώνων των σφαλμάτων. Μετράει δηλαδή, τη μέση διαφορά στο τετράγωνο μεταξύ των πραγματικών τιμών και των εκτιμώμενων τιμών.

Το MSE είναι (σχεδόν) πάντα και αυστηρά θετικό, γεγονός το οποίο συμβαίνει για 2 λόγους:

α) εξαιτίας των τυχαίων τιμών ή **β)** εξαιτίας των πληροφοριών που δεν παίρνει υπόψη του ο εκτιμητής από τις οποίες θα μπορούσε να πάρει μία ακριβέστερη εκτίμηση. Γνωρίζοντας ότι δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, βγαίνει το συμπέρασμα ότι όσο περισσότερο η τιμή του πλησιάζει στο μηδέν, τόσο καλύτερο θα είναι και το MSE που θα επιλέξουμε. Η αναμενόμενη τιμή της τετραγωνικής απώλειας σφαλμάτων, αντιστοιχεί στο MSE το οποίο είναι μία συνάρτηση κινδύνου ρίσκου.

Η μεροληψία (δηλαδή το «μέτρο» που καθορίζει την απόκλιση της εκτιμώμενης τιμής από την πραγματική) ενός εκτιμητή καθώς και η διακύμανση του (δηλαδή το «μέτρο» που μας δείχνει με τι εύρος οι εκτιμήσεις διαδίδονται από ένα δείγμα σ' ένα άλλο) συνδέονται άμεσα με το MSE, το οποίο αποτελεί το δεύτερο στάδιο (όσον αφορά την προέλευση) του σφάλματος. Οι μονάδες που παίρνει το MSE είναι ίδιες, προφανώς, με το τετράγωνο της ποσότητας που εκτιμάται.

Ο ορισμός του MSE μπορεί να περιγράψει 2 πράγματα: **a)** μία πρόβλεψη ή **b)** μία εκτίμηση. Στην δική μας περίπτωση έχουμε να κάνουμε με μία πρόβλεψη της τιμής. Ο τύπος του MSE που το περιγράφει είναι ο παρακάτω:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2 \quad (4.2)$$

,όπου n είναι τα σημεία των δεδομένων, Y είναι ο φορέας των πειραματικών τιμών της μεταβλητής που προβλέπεται και \hat{Y} είναι ο φορέας των προβλεπόμενων τιμών. Όπως φαίνεται και από την εξίσωση η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής υψώνεται στο τετράγωνο. Η πράξη αυτή πραγματοποιείται τόσες φορές όσα και τα σημεία n και έπειτα προστίθενται όλα μαζί. Τέλος, το αποτέλεσμα του αθροίσματος διαιρείται με τον αριθμό σημείων n .

4.1.3.. Εύρεση του καλύτερου Νευρωνικού Δικτύου

Αφού έχουμε βρει και έχουμε καταλήξει σε αποτελέσματα, με τον τρόπο που είπαμε παραπάνω, θα γίνει εύρεση για το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο, δηλαδή με ποιον αλγόριθμο εκπαίδευσης και αριθμό νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο υπάρχει η βέλτιστη

τιμή. Αυτό που θα μας οδηγήσει σε αυτό είναι τα αποτελέσματα του **test** (δηλαδή το MAPEstest και **κυρίως** το MSEtest). Προφανώς, όσο μικρότερα είναι τα σφάλματα αυτά, τόσο καλύτερο θα είναι και το αντίστοιχο δίκτυο. Οπότε η έρευνά μας κινείται στις μικρότερες τιμές των σφαλμάτων.

Αρχικά, για την επιλογή του καλύτερου αλγορίθμου, υπολογίζεται ένας μέσος όρος μεταξύ των αποτελεσμάτων που έχει βγει από το συγκεκριμένο δίκτυο, δηλαδή από συγκεκριμένο αριθμό νευρώνων στον αντίστοιχο αλγόριθμο. Για παράδειγμα_στον `trainlm`:

$$\text{Μέσος Όρος} = \frac{1}{6} \sum_{i=2}^7 N_i \quad (4.3)$$

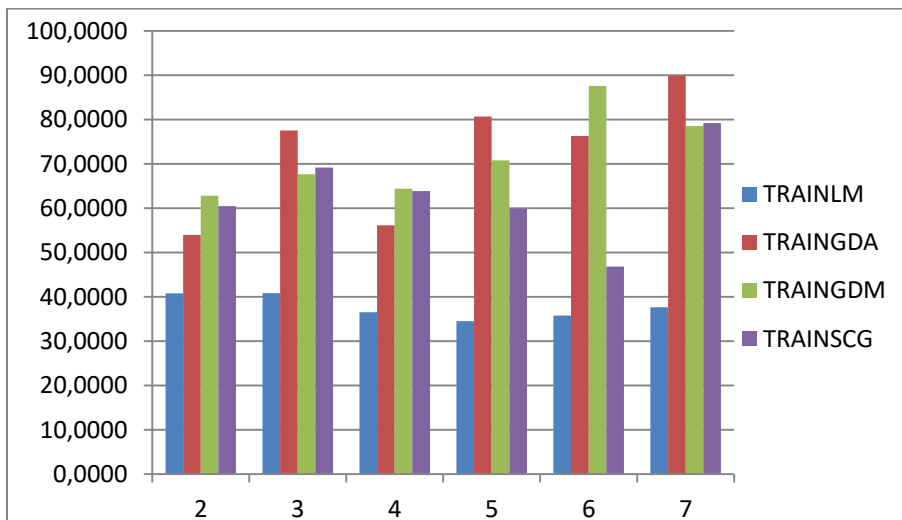
,όπου N_i είναι οι τιμές του MAPEstest ή MSEtest σε κάθε νευρώνα για έναν αλγόριθμο (στο συγκεκριμένο παράδειγμα, στον `trainlm`). Συγκρίνοντας τις τιμές των Μέσων Όρων για κάθε αλγόριθμο, ο βέλτιστος αλγόριθμος θα είναι αυτός με τον μικρότερο Μέσο Όρο στον οποίο θα ανήκει και το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο.

Τέλος, για να βρούμε σε ποιον αριθμό νευρώνων ανήκει το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο, παρατηρούμε, στον αλγόριθμο που έχουμε επιλέξει ως βέλτιστο, και βρίσκουμε τον συνδυασμό MAPEstest και MSEtest με την μικρότερη τιμή. Έτσι λοιπόν στη δική μας περίπτωση το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο, όσον αφορά τη δύναμη F, μπορεί να εντοπιστεί στον αλγόριθμο **Trainlm** και **αριθμό νευρώνων 2**. Ενώ, όσον αφορά τη τραχύτητα R, το καλύτερο νευρωνικό βρίσκεται στον αλγόριθμο **Trainlm** και **αριθμό νευρώνων 4**. Τηρώντας όλες τις προϋποθέσεις, μένει μόνο να βρεθεί το νευρωνικό δίκτυο στους νευρώνες και αλγορίθμους που είπαμε, σε μία από τις 20 δοκιμές. Ο εντοπισμός αυτός θα γίνει βάση του μικρότερου MSEtest. Έτσι, λοιπόν, το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο όσον αφορά τη δύναμη και την τραχύτητα παρουσιάζονται στον πίνακα 11:

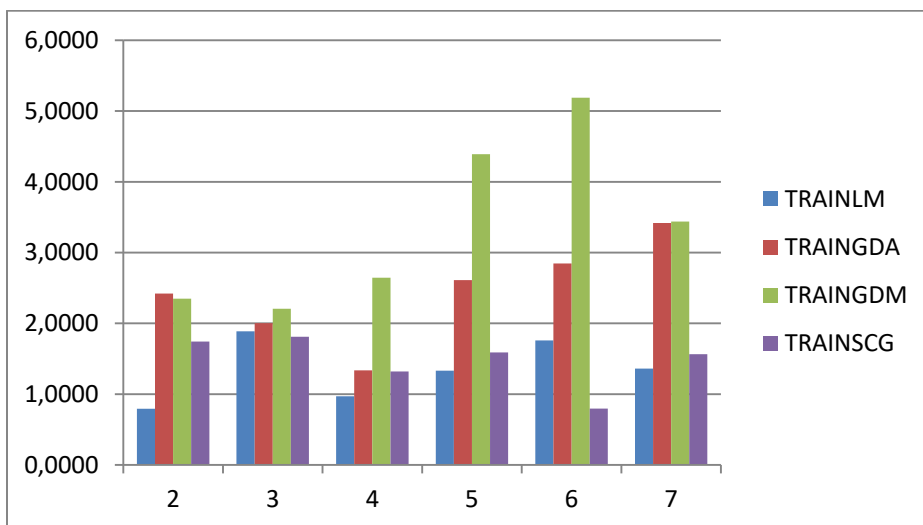
Το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο είναι: TRAINLM/ ΝΕΥΡΩΝΑΣ 2 (ΔΥΝΑΜΕΙΣ)			
MAPEstest %	MAPetrain%	MSEtest	MSEtrain
4,4988	10,2081	0,0031	0,0006
Το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο είναι: TRAINLM / ΝΕΥΡΩΝΑΣ 4 (ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ)			
MAPEstest%	MAPetrain%	MSEtest	MSEtrain
18,8062	74,9340	0,2229765	1,73297E-05

Πίνακας 11

Αξίζει να σημειωθεί, όσον αφορά την τραχύτητα, ότι ο επόμενος καλύτερος αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ο `trainscg` και έπειτα οι υπόλοιποι δύο, δηλαδή ο `traingdm` και ο `traingda`, (βάση των MAPEstest και MSEtest) το οποίο και φαίνεται καλύτερα στα διαγράμματα των εικόνων 4.1 και 4.2. Συμπληρωματικά, ο «χειρότερος» αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ο `Traingdm` λόγω του μεγάλου MSE.



Εικόνα 4.1: Ραβδόγραμμα αλγορίθμων των MAPEtest

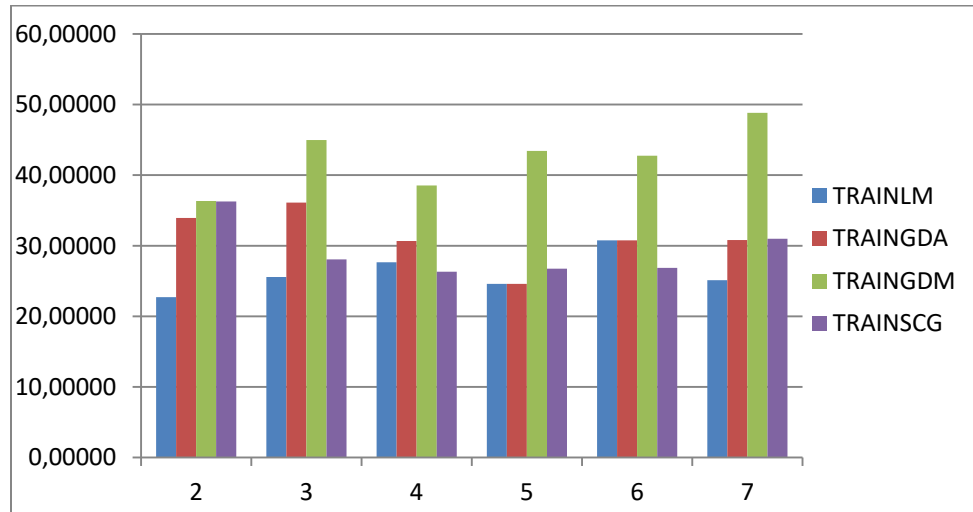


Εικόνα 4.2: Ραβδόγραμμα αλγορίθμων των MSE

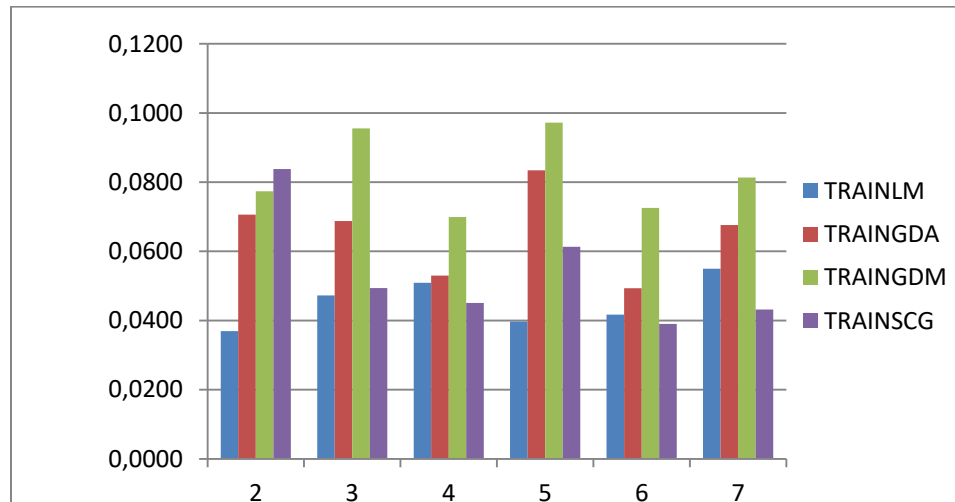
Με τις εικόνες 4.1 και 4.2 γίνεται πιο ξεκάθαρη η επιλογή του καλύτερου αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο στον `trainlm`. Δηλαδή, ναι μεν το MAPEtest των αριθμών νευρώνων στο κρυφό επίπεδο 5 και 6 να είναι λίγο μικρότερο, αλλά το MSEtest των 4 είναι πολύ πιο μικρό από των 5 και 6. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι το μικρότερο MSEtest το παρουσιάζει σε αυτό των δύο, όμως το MAPEtest των αριθμών αυτών είναι άνω των 40, πράγμα που το κάνει αρκετά μεγάλη τιμή συγκριτικά με αυτό των 4.

Έπειτα, όσον αφορά τη δύναμη κοπής, ο επόμενος καλύτερος αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ο `trainscg` και έπειτα οι υπόλοιποι δύο, δηλαδή ο `traingdm` και ο `traingda`, (βάση των MAPEtest και MSEtest) το οποίο και φαίνεται καλύτερα στα διαγράμματα των εικόνων 4.3

και 4.4. Από τις δύο αυτές εικόνες ,κιόλας, φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο «χειρότερος» αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ο Traingdm λόγω του μεγάλου MAPE αλλά και MSE.



Εικόνα 4.3: Ραβδόγραμμα αλγορίθμων εκπαίδευσης των MAPE



Εικόνα 4.4: Ραβδόγραμμα αλγορίθμων εκπαίδευσης των MSE

Αντίθετα με την επιφανειακή τραχύτητα, εδώ είναι πιο ξεκάθαρη η επιλογή του αλγορίθμου εκπαίδευσης και του αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο . Από τις παραπάνω εικόνες είναι ξεκάθαρο ότι το μικρότερο MAPEtest και παράλληλα το μικρότερο MSE test το έχει ο trainlm με αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο ίσο με 2.

4.1.4. Εύρεση τελικής τιμής του MAPE και του MSE για κάθε Νευρωνικό Δίκτυο

Έχοντας το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο και για τα 2 μεγέθη, αυτό που απομένει είναι να καταλήξουμε σε μία τελική τιμή όσον αφορά το MAPE και το MSE διότι τώρα υπάρχουν 2 τιμές για το κάθε ένα (το train και το test), πράγμα που δεν μας επιτρέπει να κάνουμε τη σύγκριση με το μοντέλο τα παλινδρόμησης. Η λύση γι' αυτό βρίσκεται στον σταθμισμένο μέσο όρο. Πιο αναλυτικά, θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο για την εύρεση της τελικής τιμής του MAPE αλλά τον ίδιο και για το MSE. Ο τύπος του σταθμισμένου μέσου όρου φαίνεται παρακάτω:

$$MAPE = \frac{n_1 MAPE_{test} + n_2 MAPE_{train}}{n_1 + n_2} \quad (4.4)$$

$$MSE = \frac{n_1 MSE_{test} + n_2 MSE_{train}}{n_1 + n_2} \quad (4.5)$$

,όπου $n_1=3$ και $n_2=8$ και είναι ο αριθμός των σημείων με τον οποίο υπολογίζεται στο κώδικα του νευρωνικού δικτύου το test και το train αντίστοιχα. Τα $MAPE_{test}$, $MAPE_{train}$, MSE_{test} και MSE_{train} αφορούν τις τιμές του παραπάνω πίνακα. Έτσι τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 12:

	ΔΥΝΑΜΕΙΣ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ
MAPE	8.6510	59.6264
MSE	0.0013	0.0608

Πίνακας 12.

4.2. Αποτελέσματα με χρήση νευρωνικού δικτύου RBF

Τα δίκτυα συναρτήσεων πυρήνα ή αλλιώς RBF (Radial Basis Function) χρησιμοποιούνται εναλλακτικά των δικτύων MLP. Όπως και τα δίκτυα MLP, έτσι και τα δίκτυα RBF υλοποιούν απεικονίσεις από το χώρο εισόδων στο χώρο εξόδων.

Όπως και τα δίκτυα MLP, η αξιοποίηση και η ανάλυση RBF υλοποιείται, στη δική μας περίπτωση, μέσω του προγράμματος Matlab. Και εδώ έχει σχεδιαστεί κατάλληλος κώδικας με τον οποίο υπολογίζουμε τα MAPE και MSE. Ο κώδικας (script) παρουσιάζεται παρακάτω:

- 1- $a=[0.1,0.233,0.367,0.5,0.233,0.1,0.5,0.367,0.367,0.5,0.1,0.233,0.5,0.367,0.233,0.1];$
- 2- $fz=[0.01,0.01,0.01,0.01,0.023,0.023,0.023,0.023,0.036,0.036,0.036,0.036,0.05,0.05,0.05,0.05];$
- 3- $vc=[20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90,20,43.3,66.7,90];$
- 4- $Fx=[20,23,43,70,40,24,83,65,82,110,27,65,145,120,90,35];$
- 5- $Fy=[25,32,45,72,52,33,85,68,92,112,38,80,155,140,105,45];$
- 6- $Ra=[0.43,0.60,0.93,1.20,0.85,0.62,1.31,1.05,1.22,1.46,0.80,0.95,1.73,1.45,1.06,0.94];$
- 7- $Rt=[4.93,6.80,7.87,10.70,8.20,5.87,12.93,10.20,11.43,14.06,7.2,9.1,16.17,13.77,10.83,9.1];$
- 8-
- 9- $atrain=[a(1:2),a(4:9),a(11:13),a(15:16)]; atest=[a(3),a(10),a(14)];$

```

10- fztrain=[fz(1:2),fz(4:9),fz(11:13),fz(15:16)]; fztest=[fz(3),fz(10),fz(14)];
11- vctrain=[vc(1:2),vc(4:9),vc(11:13),vc(15:16)]; vctest=[vc(3),vc(10),vc(14)];
12- Fxtrain=[Fx(1:2),Fx(4:9),Fx(11:13),Fx(15:16)]; Fxtest=[Fx(3),Fx(10),Fx(14)];
13- Fytrain=[Fy(1:2),Fy(4:9),Fy(11:13),Fy(15:16)]; Fytest=[Fy(3),Fy(10),Fy(14)];
14- Ratrain=[Ra(1:2),Ra(4:9),Ra(11:13),Ra(15:16)]; Ratest=[Ra(3),Ra(10),Ra(14)];
15- Rttrain=[Rt(1:2),Rt(4:9),Rt(11:13),Rt(15:16)]; Rttest=[Rt(3),Rt(10),Rt(14)];
16-
17- a1=atrain./max(a); a2=atest./max(a);
18- fz1=fztrain./max(fz); fz2=fztest./max(fz);
19- vc1=vctrain./max(vc); vc2=vctest./max(vc);
20- Fx1=Fxtrain./max(Fx); Fx2=Fxtest./max(Fx);
21- Fy1=Fytrain./max(Fy); Fy2=Fytest./max(Fy);
22- Ra1=Ratrain./max(Ra); Ra2=Ratest./max(Ra);
23- Rt1=Rttrain./max(Rt); Rt2=Rttest./max(Rt);
24-
25- Inputs=[a1;fz1;vc1];
26- outputs= [Ra1;Rt1];
27- neur1=2;
28- net1=newrb(inputs,outputs,0.0,1.0,neur1,1);
29- res=sim(net1,inputs);
30-
31- res1=res(1,:).*max(Ra);
32- res2=sim(net1,[a2;fz2;vc2]);
33- res3=res2(1,:).*max(Ra);
34-
35- sum1=0;sum3=0;
36- for i=1:length(fztrain)
37- sum1=sum1+(res(i)-Ra1(i)).^2;
38- sum3=sum3+abs(res(i)-Ra1(i))/Ra1(i);
39- end
40- MSEtrain=sum1/13; MAPEtrain=100*sum3/13;
41- sum2=0;sum4=0;
42- for i=1:3
43- sum2=sum2+(res2(i)-Ra2(i)).^2;
44- sum4=sum4+abs(res2(i)-Fx2(i))/Ra2(i);
45- end
46-
47- MSEtest=sum2/3;
48- MAPEtest=100*sum4/3;

```

Ακριβώς την ίδια διαδικασία που έγινε στο MLP, θα γίνει και στο RBF με την διαφορά ότι, οι τιμές των MAPE και MSE παραμένουν σταθερες όσες φορές και να «τρέξει» το νευρωνικό δίκτυο σε συγκεκριμένο αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να γίνουν 20 επαναλήψεις όπως στο MLP. Αυτό καθιστά «άχρηστο» τον μέσο όρο που κάναμε στο MLP με τις 20 τιμές. Αυτό το κάνει πιο απλό και έτσι η επιλογή του καλύτερου νευρωνικού θα γίνει βάση του MAPEtest και του MSEtest. Σύμφωνα με αυτό, παρατηρώ ότι όσον αφορά τη δύναμη F αλλά και την τραχύτητα R, το καλύτερο νευρωνικό βρίσκεται στον **αριθμό νευρώνων 2**. Οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 13 παρακάτω:

	MAPEtest	MAPEtrain	MSEtest	MSEtrain
ΔΥΝΑΜΗ	20.9711	20.9711	0.0614	0.0429
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	26.5963	19.1170	0.0179	0.0169

Πίνακας 13.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με το MAPE και το MSE του test στις δυνάμεις που ήταν και στις 2 περιπτώσεις οι μικρότερες τιμές, όσον αφορά την τραχύτητα δεν συνέβη κάτι τέτοιο. Δηλαδή, η τιμή του MAPE είναι η μεγαλύτερη απ' όλες τις υπόλοιπες. Παρόλα αυτά, το MSE παρατηρήθηκε ότι είναι με διαφορά το μικρότερο. Οπότε λόγω του ότι η διαφορά του MAPE σε σχέση με τα υπόλοιπα είναι αρκετά μικρή (23,4032715997384 η μικρότερη τιμή στον αριθμό νευρώνων 7 στο κρυφό επίπεδο), η διαφορά που είχε το MSE σε σχέση με τα άλλα είναι σημαντικά πιο μεγάλη (0,026812729167144 το αμέσως επόμενο μικρότερο MSEtest στον αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο). Έτσι δικαιολογείται η επιλογή του καλύτερου νευρωνικού δικτύου, όσον αφορά τις δυνάμεις. Οπότε σύμφωνα με τον σταθμισμένο μέσο όρο τα αποτελέσματα του RBF για το MAPE και το MSE φαίνονται στον πίνακα 14:

ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	MAPE	MSE
ΔΥΝΑΜΗ	20.9711	0.0463
ΤΡΑΧΥΤΗΤΕΣ	20.5194	0.0117

Πίνακας 14.

4.3 Παρουσίαση και Σύγκριση των τελικών Αποτελεσμάτων του Μοντέλου Παλινδρόμησης και των Νευρωνικών Δικτύων (MLP & RBF)

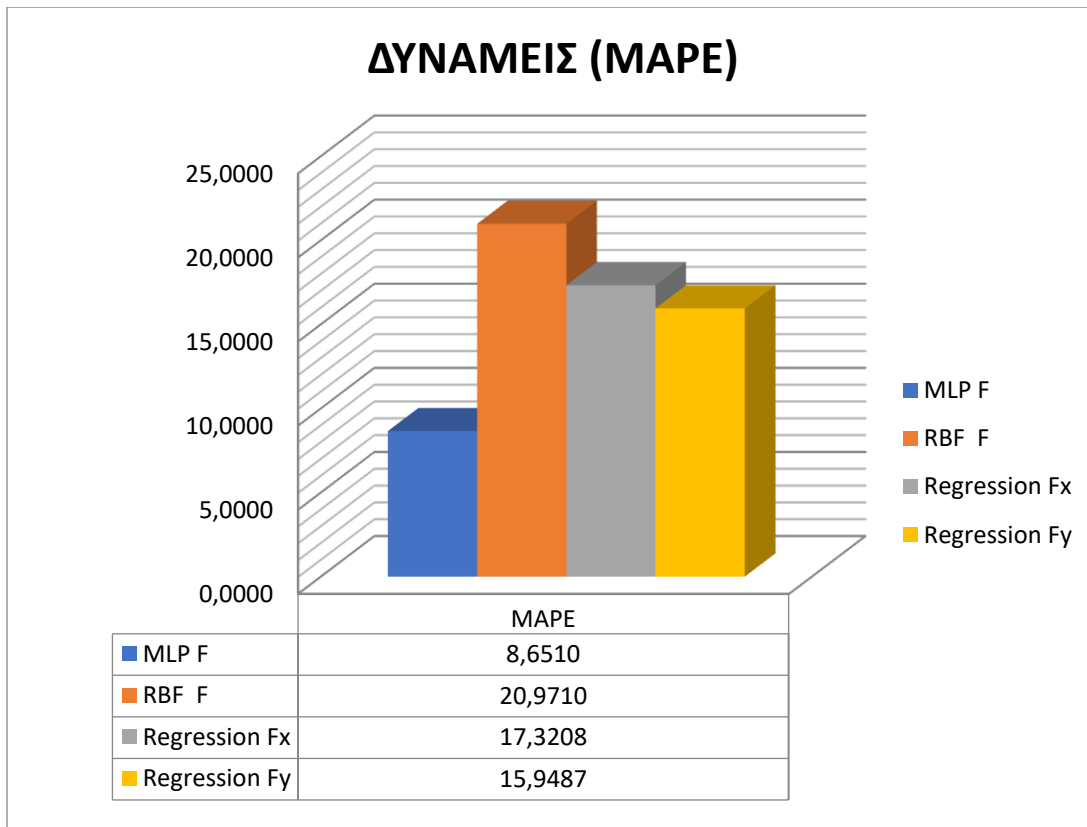
Έχοντας καταλήξει στα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου παλινδρόμησης αλλά και των 2 είδη νευρωνικών δικτύων (MLP και RBF), αυτό που μένει είναι να δειχθεί ποια είναι η καλύτερη μέθοδος. Αυτό επιτυγχάνεται με μία σύγκριση των αποτελεσμάτων, και συγκεκριμένα των MAPE. Δηλαδή, η μέθοδος που έχει το πιο μικρό μέσο ποσοστιαίο

σφάλμα, είναι αυτομάτως η καλύτερη. Στον πίνακα 15 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά αποτελέσματα:

MAPE (ΔΥΝΑΜΕΙΣ)			
MLP	RBF	REGRESSION	
ΔΥΝΑΜΗ F (F _x και F _y)	ΔΥΝΑΜΗ (F _x και F _y)%	ΔΥΝΑΜΗ F _x %	ΔΥΝΑΜΗ F _y *
8.6510	20.9711	17.3208	15.9487

Πίνακας 15.

Από τον παραπάνω πίνακα στον οποίο παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα όσον αφορά τη δύναμη F, παρατηρείται ότι τη μικρότερη τιμή, σχεδόν υποδιπλάσια σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, εμφανίζεται στο νευρωνικό δίκτυο MLP οπότε αυτομάτως γίνεται η καλύτερη μέθοδος πρόβλεψης (όσον αφορά τη δύναμη κοπής). Στο ραβδόγραμμα της εικόνας 4.5 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των απόλυτων ποσοστιαίων σφαλμάτων για την δύναμη κοπής.

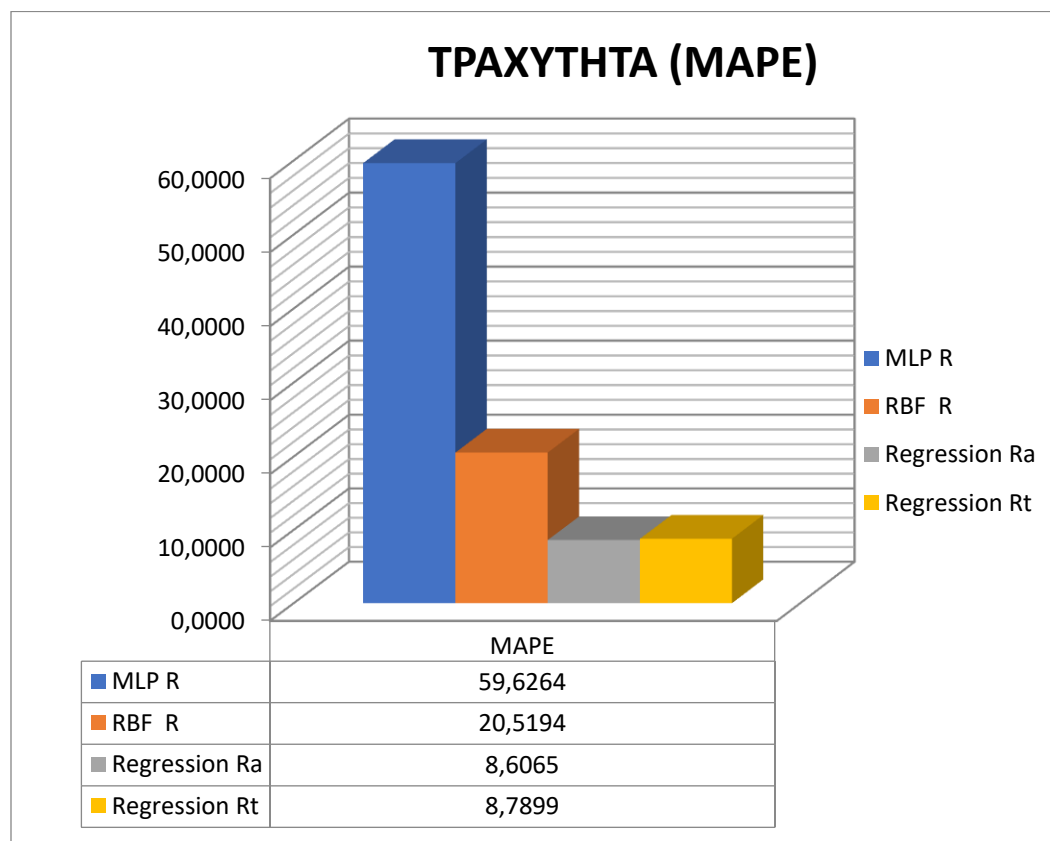


Εικόνα 4.5: Διάγραμμα σύγκρισης MAPE (όσον αφορά τις δυνάμεις)

MAPE (ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ)			
MLP	RBF	REGRESSION	
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (Ra και Rt)%	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (Ra και Rt)%	ΜΕΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Ra%	ΕΥΡΟΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ Rt%
59.6264	20.5194	8.6065	8.7899

Πίνακας 16.

Στον πίνακα 16 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα όσον αφορά τη τραχύτητα R. Παρατηρείται ότι τη μικρότερη τιμή, με αρκετά μεγαλύτερη διαφορά από πριν με τις δυνάμεις, εμφανίζεται στο **μοντέλο παλινδρόμησης** οπότε αυτομάτως γίνεται η καλύτερη μέθοδος πρόβλεψης (όσον αφορά την επιφανειακή τραχύτητα R). Στο ραβδόγραμμα της εικόνας 4.6 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των απόλυτων ποσοστιαίων σφαλμάτων για την επιφανειακή τραχύτητα.



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα σύγκρισης MAPE (όσον αφορά την τραχύτητα)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Συμπεράσματα

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η πρόβλεψη των τιμών των δυνάμεων κοπής και της επιφανειακής τραχύτητας κατά το φρεζάρισμα σκληρυμένου χάλυβα με τη χρήση κυρίως των νευρωνικών δικτύων MLP και RBF και η αξιολόγηση της απόδοσής τους μέσω σύγκρισης με τα αποτελέσματα μοντέλων παλινδρόμησης. Για την επίτευξη αυτού έπρεπε να εκτελέσουμε συγκεκριμένα βήματα.

Αρχικά, η εκτέλεση κάποιων πειραμάτων, όπως είναι κατανοητό, είναι απαραίτητο κομμάτι για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Για να μπορέσουν όμως τα πειράματα να υλοποιηθούν, πρέπει να ορίσουμε τις κατάλληλες συνθήκες κοπής. Έτσι, μέσω μίας βιβλιογραφικής ανασκόπησης καταλήξαμε στις κατάλληλες συνθήκες κοπής (όπως αναγράφεται στον πίνακα «αποτελέσματα του πειράματος») καθώς και στο υλικό και το μέγεθος του κοπτικού εργαλείου, το οποίο είναι καρβίδιο και 8mm διάμετρος αντίστοιχα.

Έπειτα, ξεκινώντας με την πειραματική διάταξη, έγινε η επιλογή της φρεζομηχανής CNC, στην οποία θα διεξαχθούν τα πειράματα για τις δυνάμεις κοπής, που είναι συνδεδεμένη με κατάλληλο ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο θα γίνει η συλλογή των πειραματικών μετρήσεων. Αφού γίνει η επιλογή στον αριθμό των πειραμάτων (16), εισάγουμε κατάλληλο κώδικα στην φρεζομηχανή (με τις αντίστοιχες συνθήκες κοπής) και συλλέγουμε τις πειραματικές μετρήσεις για τις δυνάμεις κοπής. Ύστερα, έχοντας γίνει η κοπή στα τεμάχια, με τη βοήθεια ειδικού τραχύμετρου γίνονται οι μετρήσεις για τα 2 μεγέθη της επιφανειακής τραχύτητας (R_a και R_t). Αφού γίνει η επιλογή στον αριθμό των πειραμάτων μέσω της μεθόδου του Taguchi (σύνολο 16 πειράματα με L16 orthogonal array) καταλήγουμε στις τελικές πειραματικές τιμές.

Στη συνέχεια ξεκινάει η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των τιμών της δύναμης κοπής και της επιφανειακής τραχύτητας μέσω των νευρωνικών δικτύων, συγκρίνοντας τα με το μοντέλο παλινδρόμησης έτσι ώστε να ληφθεί η απόφαση για το ποια είναι η καλύτερη μέθοδος πρόβλεψης. Πρώτα, γίνεται η ανάλυση παλινδρόμησης, με τη βοήθεια του Minitab, για κάθε μέγεθος η οποία καταλήγει σε μία εξίσωση (παλινδρόμησης) η οποία μας δίνει την προβλεπόμενη τιμή κάθε μεγέθους. Έπειτα με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων του ANOVA και των γραφημάτων, βγαίνει το συμπέρασμα ότι για τα μεγέθη F_x , R_a και R_t οι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τα παραπάνω μεγέθη είναι κυρίως το βάθος κοπής καθώς και η πρόωση (το βάθος κοπής περισσότερο). Για το μέγεθος F_y , το βάθος κοπής και η πρόωση είναι εξίσου σημαντικοί παράμετροι. Αντίθετα, η ταχύτητα κοπής είναι οριακά μη σημαντική για κανέναν από τα 4 μεγέθη.

Μέσω αυτών των τιμών υπολογίζεται το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE (το οποίο γίνεται για την αξιολόγηση της μεθόδου) για κάθε μέγεθος, βάση του οποίου θα γίνει ύστερα η σύγκριση με τα νευρωνικά δίκτυα.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, κατασκευάστηκαν ξεχωριστά μοντέλα νευρωνικών δικτύων για τις συνιστώσες της δύναμης (F_x, F_y) και τις παραμέτρους της τραχύτητας (R_a, R_t). Όσον αφορά τα μοντέλα MLP έγινε στην αρχή διερεύνηση για την επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου εκπαίδευσης, συγκρίνοντας τέσσερις διαφορετικούς αλγορίθμους και στη συνέχεια διερεύνηση για την επιλογή του καταλληλότερου αριθμού νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο, τόσο για το μοντέλο των δυνάμεων, όσο και για το μοντέλο των τραχυτήτων. Ο καλύτερος αλγόριθμος εκπαίδευσης αποδεικνύεται ο *trainlm* για τις δυνάμεις κοπής και για την τραχύτητα ενώ ο κατάλληλος αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο είναι 2 και 4 αντίστοιχα.

Όσον αφορά τα δίκτυα RBF, έγινε διερεύνηση για την επιλογή του κατάλληλου αριθμού νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο, που είναι 2 για τις δυνάμεις κοπής αλλά και για την επιφανειακή τραχύτητα. Με τη βοήθεια του MATLAB, γίνεται η ανάλυση των νευρωνικών δικτύων MLP και RBF. Με μία σειρά βημάτων (περισσότερα βήματα στο MLP ως πιο πολύπλοκα δίκτυα) και με τη βοήθεια του μέσου τετραγωνικού σφάλματος MSE, καταλήγουμε στα τελικά αποτελέσματα του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος MAPE για τις δυνάμεις κοπής και για την επιφανειακή τραχύτητα. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα σφάλματα MAPE των 2 νευρωνικών δικτύων με αυτών του μοντέλου παλινδρόμησης, παρατηρείται ότι όσον αφορά τις δυνάμεις κοπής, το νευρωνικό δίκτυο MLP υπερέχει των υπολοίπων λόγω του ότι έχει το μικρότερο σφάλμα. Όσον αφορά την τραχύτητα, το MLP έχει το μεγαλύτερο σφάλμα ενώ το μοντέλο της παλινδρόμησης το μικρότερο, πράγμα που το κάνει να υπερέχει έναντι των νευρωνικών στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των μοντέλων νευρωνικών δικτύων σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τα μοντέλα παλινδρόμησης προκύπτει ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση δε διαπιστώνεται σαφής υπεροχή των μοντέλων νευρωνικών δικτύων όσον αφορά την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, καθώς παρατηρήθηκε υπεροχή του μοντέλου MLP στην περίπτωση της δύναμης κοπής αλλά το μοντέλο αυτό υπολείπεται σημαντικά του μοντέλου παλινδρόμησης στην περίπτωση της τραχύτητας. Έτσι, προκύπτει ότι για περιπτώσεις με σχετικά μικρό αριθμό πειραμάτων όπως η παρούσα, λόγω του ότι δεν υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων, είναι δυνατόν η απόδοσή τους να είναι δυσμενέστερη της απόδοσης των μοντέλων παλινδρόμησης, τα οποία δεν επηρεάστηκαν σε τέτοιο βαθμό από τον αριθμό των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων.

Βιβλιογραφία

- Agarwal, A. (2018, October 5). *Linear Regression using Python*. Retrieved October 2018, from Towards Data science: <https://towardsdatascience.com/linear-regression-using-python-b136c91bf0a2>.
- Arsecularatne, J., Zhang, L., Montross, C., & Mathew, P. (2005, June 30). On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 9.
- Balisnomo, R. (2009, January 21). *Introduction To Taguchi Method*. Retrieved from in SlideShare: <https://www.slideshare.net/rbalisnomo/Introduction-To-Taguchi-Method-05Sep08>
- Börner, R., Winkler, S., Junge, T., Titsch, C., Schubert, A., & Drosse, W. G. (n.d.). Generation of functional surfaces by using a simulation tool for surface prediction and micro structuring of cold-working steel with ultrasonic vibration assisted face milling. *Journal of Materials Processing Tech*, p. 11.
- Chengyong, W., Feng, D., Dewen, T., Lijuan, Z., Suyang, L., & Yingxing, X. (2016, June 2). Modeling and simulation of the high-speed milling of hardened steel SKD11 (62 HRC) based on SHPB technology. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, p. 14.
- Cui, X., Wang, D., & Guo, J. (2016, May 19). Performance optimization for cemented carbide tool in high-speed milling of hardened steel with initial microstructure. *International Journal of Mechanical Sciences*, p. 8.
- Elhami, S., Razfar, M., & Farahnakian, M. (2015, September 25). Analytical numerical and experimental study of cutting force during thermally enhanced ultrasonic assisted milling of hardened AISI 4140. *International Journal of Mechanical Sciences*, p. 14.
- Face milling*. (n.d.). Retrieved from Sandvik Coromant: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>.
- Li, J., Jing, L., & Chen, M. (2008, October 6). An FEM study on residual stresses included by high-speed end-milling of hardened steel SKD11. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 6.

Liu, Z., Guo, Y., Sealy, M., & Liu, Z. (2015, September 21). Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 8.

Smithy. (n.d.). *Face Milling*. Retrieved from Smithy: <https://smithy.com/machining-handbook/chapter-4/page/49>.

Thepsonthi, T., Hamdi, M., & Mitsui, K. (2008, October 21). Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, p. 7.

TORMACH LABS. (n.d.). *What Is Face Milling and Why Should You Bother?* Retrieved from TORMACH LABS: <https://www.tormach.com/blog/face-milling-bother/>

Γαλάνης, Η. Κ. (2008). *Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων ανά Ομάδα*. Λαμία.
Γεωργούλη, Κ. (2015). *Τεχνητή Νοημοσύνη*. Ζωγράφου: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Εμμανουήλ, Μ. (2012). *Μηχανουργική Τεχνολογία*. Καβάλα.

Θεοδόση-Κοκκίνου, Λ. (2013). *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και εφαρμογές στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*. Πάτρα.

Θεοχαρίδου, Ζ. (2011). *Μέθοδοι Ανάλυσης Αποκομμένων Δεδομένων σε Παραγοντικούς και Παραμετρικούς Σχεδιασμούς*. Αθήνα.

Κτιστάκη, Μ. (n.d.). *ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ- ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ*.

Κυριάκου, Ν. (2013). *Σχεδιασμός, προσομοίωση και κατασκευή τεμαχίων σε ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή φρεζαρίσματος με χρήση του τέταρτου άξονα της*. Ηράκλειο.

Λοπρέστη, Σ., & Μπαχά, Γ. (1977). *ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΜΟΣ Β'*. Αθήνα: ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ.

Λύκας, Α. (n.d.). *Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα*.

Μανωλάκος, Δ. (2011). *ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ Γ Πρόχειρες Σημειώσεις*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Ντέζες, Δ. (2019). *ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ*. Αθήνα.

Τοτόνης, Τ. (2012). *Αριθμητική Προσομοίωση της Διάτρησης*. Αθήνα:
<http://dspace.lib.ntua.gr>.