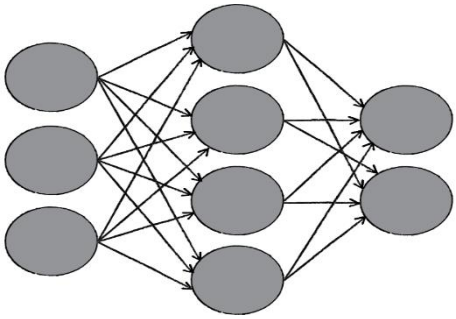
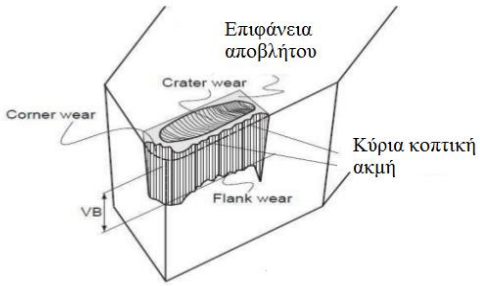
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ: Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ





ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΙΡΗΝΑΙΟΣ ΜΠΑΛΛΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ…….……5

Κεφάλαιο 1: Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ……..7

1.1 Εισαγωγή στις κατεργασίες…….....……7
1.2 Η κατεργασία της κοπής……..…….....…….10
1.2.1 Βασικές παράμετροι των κατεργασιών κοπής……..…11
1.2.2 Οι δυνάμεις της κοπής……...……. 13
1.2.3 Σχηματισμός αποβλήτου……...……..14
1.2.4 Η συναλλαγή θερμότητας στην κοπή……...17
1.2.5 Υγρά κοπής……...18
1.2.6 Ποιότητα παραγόμενης επιφάνειας……..19
1.2.6.1 Τραχύτητα επιφανείας……..20
1.2.7 Η κατεργασιμότητα του υλικού……21

1.3 Τα κοπτικά εργαλεία (cutting tools)……..21

1.3.1 Υλικά κοπτικών εργαλείων……..……...22

1.3.1.1 Το κυβικό βοριονιτρίδιο (CBN)……....24

1.3.2 Φθορά κοπτικού εργαλείου (tool wear)……..……26

1.3.3 Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου (tool life)……...…….30

1.4 Η τόρνευση (turning)…….…33

1.4.1 Τα κοπτικά εργαλεία της τόρνευσης……...……36

Κεφάλαιο 2: ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ……..……..39

2.1 Εισαγωγή…….. 39

2.2 Ιστορικό…….41

2.3 Ο νευρώνας……42

2.3.1 Συναρτήσεις ενεργοποίησης……43

2.4 Αρχιτεκτονική δικτύων…….....……..47

2.4.1 Δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης……..49

2.4.2 Δίκτυα με ανάδραση……49

2.5 Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων…….....……..49

2.5.1 Νόμοι εκπαίδευσης……..51

2.5.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης……52

2.5.2.1 Αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης……..…52

2.5.2.2 Παράγοντας ορμής…….....…….……54

2.5.2.3 Μεταβολή του ρυθμού εκπαίδευσης…….....….54

2.5.2.4 Ο αλγόριθμος Levenberg – Marqduart……..55

2.6 Οφέλη και προβληματισμοί……...57

2.7 Ερευνητικό έργο σχετικό με την παρούσα εργασία……..57

Κεφάλαιο 3: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΕ……..65

3.1 Εισαγωγή……...…65

3.2 Πειράματα τόρνευσης……...……66

3.2.1 Πειράματα με ΚΕ κυβικού βοριονιτρίτη……66

3.3 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής ΚΕ με τη χρήση ΤΝΔ……72

3.4 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής ΚΕ με τη χρήση μεθόδων σχεδιασμού πειραμάτων……80

3.4.1 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με πειράματα Full Factorial…….…….……....81

3.4.2 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με τη μέθοδο Taguchi L_{16}……..…....88

3.4.3 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με τη μέθοδο Taguchi L_9……..94

3.4.4 Συμπεράσματα……...……100

Βιβλιογραφία……..……..…….……101

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο καίριος ρόλος της κατεργασίας της κοπής στη μηχανολογία είναι αδιαμφισβήτητος. Η κοπή, είναι μία κατεργασία, με την οποία μπορούμε αφαιρώντας υλικό από ένα ακατέργαστο τεμάχιο, να παράγουμε ένα προϊόν με ακριβείς διαστάσεις και υψηλής ποιότητας επιφάνεια. Στόχος της κοπής, δεν είναι μόνο η παραγωγή τεμαχίων στην επιθυμητή μορφή, αλλά και η οικονομική της διεξαγωγή. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν, είναι τόσο τα υλικά που πρόκειται να κατεργαστούμε όσο και οι συνθήκες της κοπής, όπως η πρόωση, το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής.

Επιπλέον, μία πολύ σημαντική παράμετρος είναι το κοπτικό εργαλείο. Κάθε κατεργαζόμενο υλικό, κόβεται ιδανικά από κοπτικό εργαλείο συγκεκριμένου υλικού. Αυτό το κοπτικό εργαλείο, με την πάροδο του χρόνου φθείρεται και χρειάζεται επανατρόχιση ή αντικατάσταση. Ο βαθμός φθοράς του, εξαρτάται τόσο από το ίδιο το υλικό και τη γεωμετρία του όσο και από τις συνθήκες της κοπής. Επομένως, αν θέλουμε να επιτύχουμε αποδοτικότερη χρήση του, πρέπει να βρούμε τον τρόπο με τον οποίο οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν τη φθορά του.

Τα μέχρι τώρα υπάρχοντα μοντέλα φθοράς των κοπτικών εργαλείων, λάμβαναν κυρίως υπόψη για τον υπολογισμό της, την ταχύτητα της κοπής. Όμως, μία σειρά από πειράματα τόρνευσης σε κοπτικά εργαλεία από CBN (κυβικός βοριονιτρίτης) έδειξαν το δρόμο προς μία αναλυτική σχέση υπολογισμού της διάρκειας ζωής τους, που λαμβάνει υπόψη της τόσο την πρόωση όσο και το βάθος κοπής. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, δε θα χρησιμοποιήσουμε την αναλυτική μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής τους, αλλά την τεχνική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANNs).

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, είναι μία υπολογιστική μέθοδος που έχει την ικανότητα να «εκπαιδεύει» ένα μαθηματικό μοντέλο, ώστε αυτό, μέσα από μία σειρά γνωστών συνδυασμών παραμέτρων ενός φαινομένου, να μπορεί να αποδίδει γενικευμένες πληροφορίες για άγνωστους συνδυασμούς των παραμέτρων αυτών. Στην παρούσα εργασία, λοιπόν, θα επιχειρηθεί η ανάπτυξη μίας αρχιτεκτονικής ANNs η οποία θα μπορεί να υπολογίζει τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων από CBN, κατευθείαν, χωρίς χρήση της αναλυτικής σχέσης, με αφετηρία τα ήδη υπάρχοντα πειράματα τόρνευσης.

Στην περίπτωση που ένα τέτοιο ANN βρεθεί, θα επιχειρηθεί η προσέγγιση του ίδιο φαινομένου, από το ίδιο νευρωνικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας, όμως, λιγότερα πειραματικά δεδομένα από τα πραγματικά διεξαχθείσα. Ο τρόπος που θα επιλεγούν τα δεδομένα αυτά, θα γίνει με μεθόδους επιστημονικές, του κλάδου του σχεδιασμού πειραμάτων (Design of Experiments). Θα δοκιμασθούν τρεις τέτοιες μέθοδοι στο

νευρωνικό δίκτυο που έχει προκύψει αρχικά και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν από τα διεξαχθέντα πειράματα και το αναλυτικό μοντέλο περιγραφής των. Συνεπώς, θα απαντήσουμε στο ερώτημα, αν, οι ερευνητές που διεξήγαγαν τα συγκεκριμένα πειράματα, μπορούσαν φτάσουν στην ίδια αναλυτική σχέση, διεξάγοντας λιγότερα πειράματα.

Για την κατανόηση των αποτελεσμάτων και της διαδικασίας που ακολουθείται στο πειραματικό μέρος, η εργασία είναι χωρισμένη σε τρία κεφάλαια. Καταρχάς (κεφάλαιο 1), παρουσιάζεται η θεωρία που αφορά τις κατεργασίες κοπής και ιδιαίτερα την τόρνευση. Επίσης, παρουσιάζονται τα διάφορα κοπτικά εργαλεία, οι μηχανισμοί και οι μορφές φθοράς τους και οι υπάρχουσες μέθοδοι για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα εργαλεία που είναι κατασκευασμένα από CBN. Στη συνέχεια (κεφάλαιο 2), παρουσιάζεται η θεωρία που είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANNs). Έτσι, πλέον ο αναγνώστης είναι έτοιμος να προχωρήσει στην ανάγνωση του πειραματικού μέρους της εργασίας (κεφάλαιο 3) και να ενημερωθεί για τα συμπεράσματά της. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η επιλογή του κατάλληλου νευρωνικού δικτύου και οι παράμετροι που το συνοδεύουν. Στη συνέχεια, αν το δίκτυο αυτό αποδίδει καλά αποτελέσματα, δοκιμάζονται άλλες μέθοδοι, που απαιτούν λιγότερα πειραματικά σημεία, στο ίδιο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Η ανάλυση, γίνεται σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

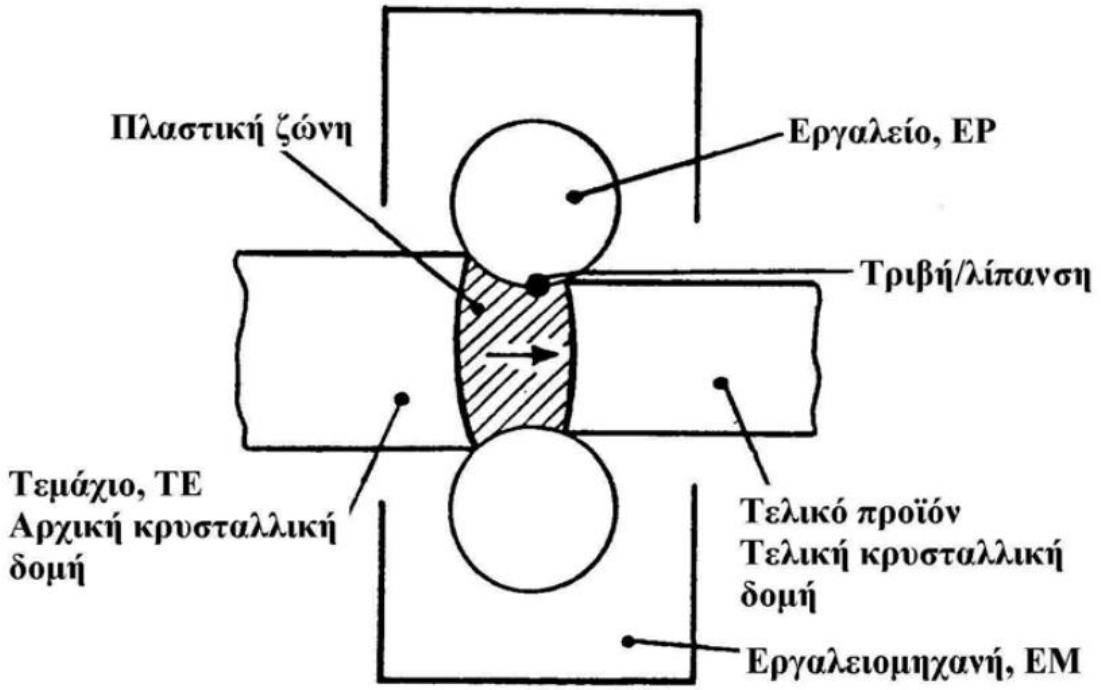
Ατέρμονες ευχαριστίες, εκφράζονται στην παρούσα παράγραφο, στον Λέκτορα κ. Άγγελο Μαρκόπουλο, καθώς και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικόλαο Κάρκαλο, χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των οποίων, η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν μία πολύ πιο δύσκολη διαδικασία.

Κεφάλαιο 1
Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

1.1 Εισαγωγή στις κατεργασίες

Κατεργασία (process) ονομάζεται, γενικά, η διαδικασία με την οποία η ακατέργαστη ύλη μετατρέπεται σε τελικό προϊόν. Με τις κατεργασίες των υλικών, εκμεταλλευόμαστε τις διάφορες τεχνικές και δυνατότητες τις οποίες η έρευνα της επιστήμης των υλικών, της μηχανολογίας και τον κατεργασιών μας έχει παράσχει ώστε να παράγουμε προϊόντα των προδιαγραφών που έχουμε ορίσει. Έτσι, συνδυάζοντας κατάλληλες συνθήκες φόρτισης, ταχύτητας και θερμοκρασίας, εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα των υλικών να παραμορφώνονται πλαστικά, παίρνοντας έτσι την τελική τους μορφή.

Στη γενική περίπτωση, το τεμάχιο (ΤΕ) θεωρείται έλασμα (blank) ή μπιγιέτα (billet). Το κοπτικό εργαλείο (ΕΡ) διαμορφώνει το ΤΕ σύμφωνα με την κατεργασία που θα πραγματοποιηθεί. Το ΤΕ τοποθετείται στην εργαλειομηχανή και κινείται προς ορισμένη κατεύθυνση ενώ το κοπτικό εργαλείο το διαμορφώνει. Έτσι, το κατεργαζόμενο τεμάχιο (ΤΕ) έχει ένα τμήμα του το οποίο είναι ακατέργαστο και διατηρεί την κρυσταλλική του δομή και ένα τμήμα το οποίο έχει ήδη υποστεί κατεργασία και αποτελεί το τελικό προϊόν της. Τέλος, η ζώνη στην οποία επιδρά το κοπτικό εργαλείο (ΕΡ) αποτελεί την πλαστική ζώνη του τεμαχίου (ΤΕ). Είναι φανερό ότι τα τρία αυτά τμήματα αλλάζουν συνεχώς ενόσω η κατεργασία εξελίσσεται. Εξάλλου, η διαδικασία υποβοηθιέται με την επιβολή κατάλληλων συνθηκών τριβής με την παρουσία λιπαντικών ουσιών.



Σχήμα 1.1 Γενική αναπαράσταση της κατεργασίας (process)

Στη συνέχεια, θα αναφέρουμε ποιες είναι οι απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζεται ένας μελετητής για τη διεξαγωγή μιας επιτυχούς κατεργασίας με βάση τα συστατικά της όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Καταρχάς, ως πρόβλημα προς επίλυση θεωρείται η παραγωγή ενός τελικού προϊόντος με καθορισμένη γεωμετρία και ποιότητα, δηλαδή καθορισμένες γεωμετρικές ανοχές και άλλες προδιαγραφές όπως είναι η μέση επιφανειακή τραχύτητα. Για το λόγο αυτό, οφείλουμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες του ακατέργαστου τεμαχίου (ΤΕ) που θα χρησιμοποιήσουμε. Τέτοιες είναι η κατεργασιμότητά του, δηλαδή η δυσκολία μορφοποίησής του εξαιτίας της μικροδομής του, της ελαστικότητάς του, της ταχύτητας παραμόρφωσής του, της θερμικής του αγωγιμότητας κ.α.

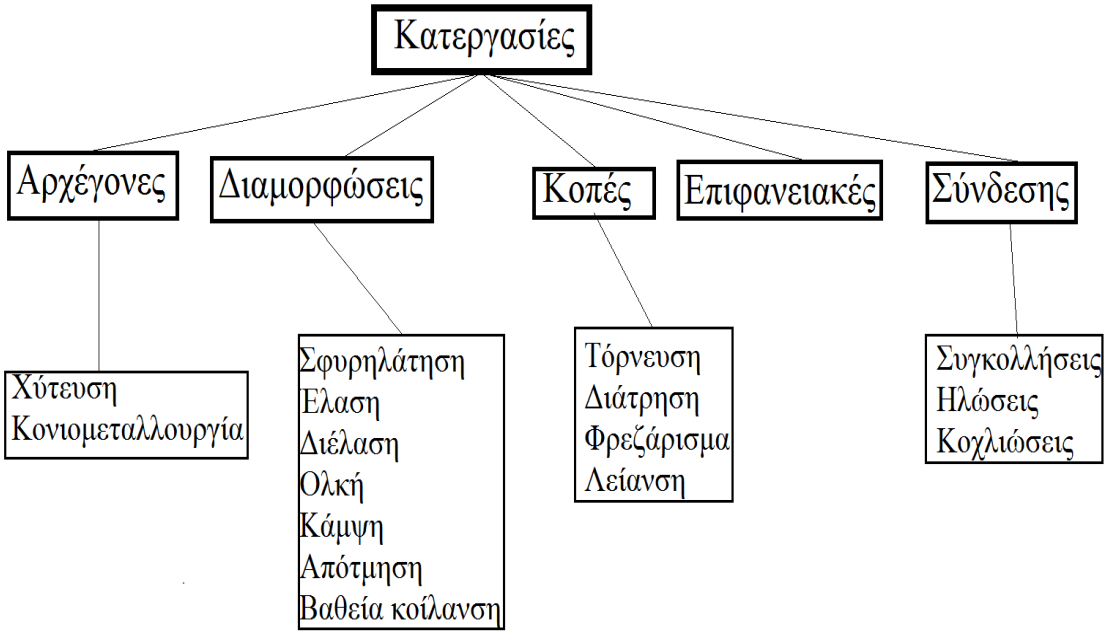
Με βάση αυτές τις πληροφορίες, πρέπει να επιλεχθεί το κατάλληλο κοπτικό εργαλείο (ΕΡ). Για να συμβεί αυτό, πρέπει να λάβουμε υπόψη τη γεωμετρία του, το υλικό του και τη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί κατά την κατεργασία. Επίσης, εργαλεία κατεργασίας διαφορετικής σκληρότητας απαιτούνται για κατεργάσιμα υλικά διαφορετικής σκληρότητας, αφού είναι φανερό ότι ένα υλικό πρέπει να κατεργαστεί από ένα άλλο σκληρότερο υλικό. Ειδάλλως, το κατεργάσιμο υλικό θα κατεργαζόταν το εργαλείο και όχι το αντίστροφο. Έτσι λαμβάνουμε υπόψη τη σκληρότητα του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, διαφορετικά εργαλεία προσδίδουν διαφορετικούς βαθμούς ακριβείας στην κατεργασία και η επιλογή των γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Έπειτα, πρέπει να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η λίπανση της περιοχής όπου διεξάγεται η κατεργασία. Ως επί το πλείστον, στις κατεργασίες αναπτύσσεται τριβή ανάμεσα σε μεταλλικά υλικά η οποία παράγει μεγάλα ποσά θερμότητας. Έτσι, οι λιπαντικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για κάθε περίπτωση, φέρνουν στο «τραπέζι» της μελέτης νέες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συνεπώς, λαμβάνεται υπόψη η ικανότητα ενός λιπαντικού να απομακρύνει σε επαρκή βαθμό την παραγόμενη θερμότητα, αφού μελετηθεί ποιες είναι οι απαιτήσεις για απομάκρυνσή της μετά από την εξέταση των τριβολογικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας κοπτικού εργαλείου (ΕΡ) και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ταυτόχρονα, δημιουργείται ένα θεωρητικό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο θα παραμορφωθεί το τεμάχιο (ΤΕ) ώστε να προκύψει το τελικό προϊόν. Έτσι, ο μελετητής – μηχανικός μπορεί να σχεδιάσει και να επιλέξει με σιγουριά το πώς θα παράξει τελικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Τελικά, στην περίπτωση που όλα τα άλλα έχουν καθοριστεί, επιλέγεται η εργαλειομηχανή που θα χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία. Είναι φανερό ότι κάθε κατεργασία απαιτεί διαφορετική διαθέσιμη ισχύ, ενώ κάθε εργαλειομηχανή δεν ταιριάζει με όλα τα κοπτικά εργαλεία ούτε μπορεί να διεξάγει όλες τις πιθανές κατεργασίες. Επίσης, η επιθυμία μας για συγκεκριμένες γεωμετρικές και ποιοτικές ανοχές δεν μπορεί να ικανοποιηθεί αν δε λάβουμε υπόψη και την ακρίβεια που προσδίδει στη διαδικασία η εργαλειομηχανή έναντι μίας άλλης. Ακόμη, γενικότερα θέματα μηχανολογικού σχεδιασμού, όπως η οικονομοτεχνική του προβλήματος και η ανάγκη ή όχι για μαζική ή όχι παραγωγή, μπορεί να επιβάλει την επιλογή ή όχι μιας συγκεκριμένης εργαλειομηχανής.

Οι κατεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Για λόγους απλότητας, θα παρουσιαστεί ένας εύχρηστος τρόπος εποπτείας τους, επειδή κάτι

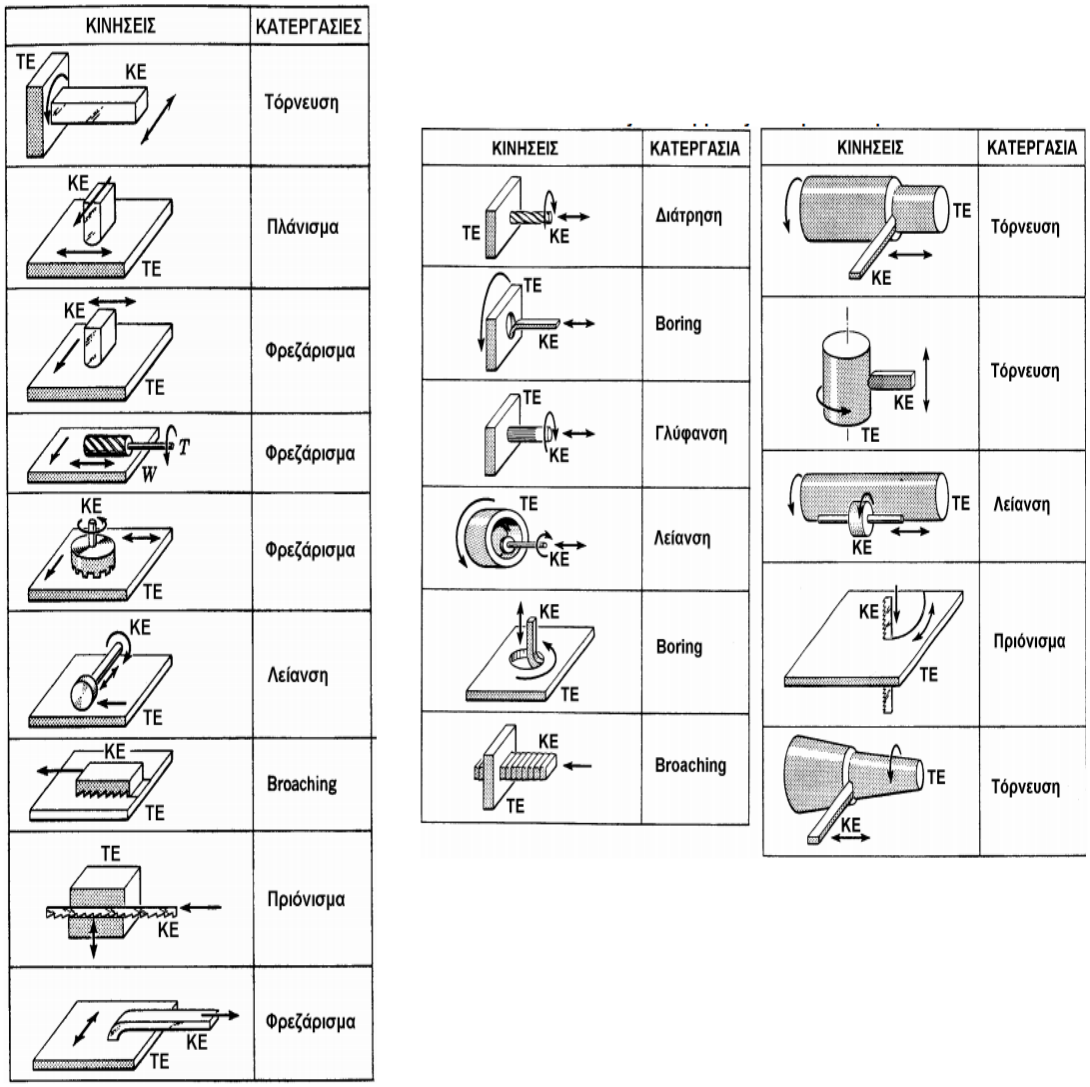
διαφορετικό θα ξέφευγε από το σκοπό της παρούσας εργασίας, όπως αυτός θα γίνει φανερός στα επόμενα κεφάλαια. Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μια κατηγορία κατεργασιών είναι αυτές στις οποίες το υλικό αρχικά έχει ακαθόριστο σχήμα και αποκτά την επιθυμητή γεωμετρία μετά από την κατεργασία. Μία τέτοια κατεργασία είναι η χύτευση. Ακόμη, κατεργασίες στις οποίες το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά και διατηρείται η μάζα του ονομάζονται διαμορφώσεις. Περαιτέρω, οι διαμορφώσεις μπορούν να διαχωριστούν σε διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος όπως η κάμψη και η βαθεία κοίλανση και διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού όπως η σφυρηλάτηση και η ολκή. Επιπλέον, υπάρχουν οι κατεργασίες σύνδεσης όπως οι συγκολλήσεις και οι επιφανειακές κατεργασίες που έχουν ως σκοπό να προσδώσουν βελτιωμένες ιδιότητες στην ήδη κατεργασμένη επιφάνεια. Τέλος, συναντάμε τις κατεργασίες αποβολής υλικού ή κατεργασίες κοπής, που θα μας απασχολήσουν σε αυτό το κεφάλαιο και στην παρούσα εργασία εν γένει.



Σχήμα 1.2 Η ταξινόμηση των κατεργασιών

1.2 Η κατεργασία της κοπής

Φυσικά, όπως ισχύει στις περισσότερες κατεργασίες, επιθυμούμε να διαμορφώσουμε ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο στην επιθυμητή μορφή. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλές ποιότητες και μικρές γεωμετρικές ανοχές που δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν με άλλες κατεργασίες. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της μορφής ενός ήδη κατεργασμένου τεμαχίου, εξαιτίας της ποιότητας που μπορεί να προσδώσει σε αυτό. Από την άλλη μεριά, κατά την κοπή ενός τεμαχίου, υλικό για το οποίο έχουν δαπανηθεί πόροι αποβάλλεται και εν γένει δε χρησιμοποιείται αλλού ούτε ανακυκλώνεται εύκολα. Κάτι τέτοιο μπορεί να καταστήσει ασύμφορη μία κατεργασία κοπής. Σε έναν ιδανικό κόσμο, θα επιθυμούσαμε κάθε κατεργασία που διεξάγουμε να γίνεται χωρίς να χάνουμε υλικό, κατασκευάζοντας για παράδειγμα όλα τα προϊόντα με χύτευση. Παρόλα αυτά, οι κατεργασίες κοπής είναι ακόμα πολύ σημαντικές σε όλες τις εκφάνσεις της μηχανουργικής τεχνολογίας.



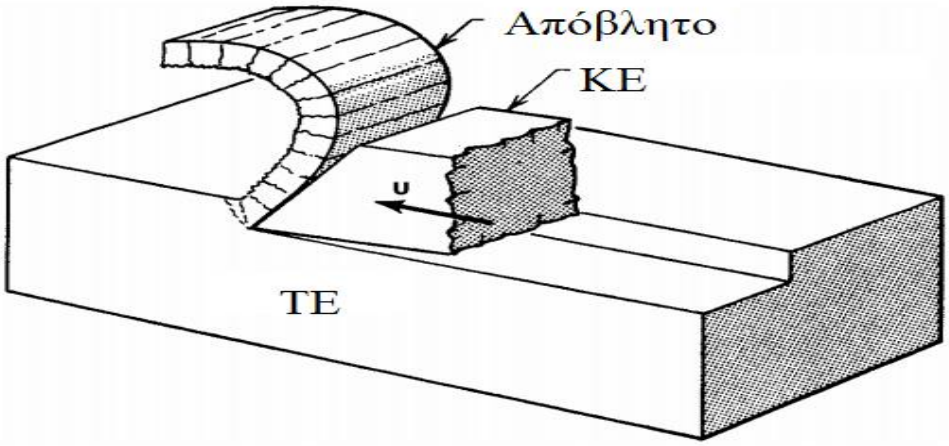
Σχήμα 1.3 Διάφορες κατεργασίες κοπής

Σε μία κατεργασία κοπής, το κοπτικό εργαλείο (ΚΕ) κινείται σε σχέση με το ΤΕ κατά τη διεύθυνση της κοπής, με συγκεκριμένη ταχύτητα, ενώ συγχρόνως αποβάλλεται υλικό, κινούμενο επί του ΚΕ, το οποίο ονομάζεται απόβλιττο. Έτσι, έχουν προκύψει ποικίλες κατεργασίες κοπής, όπως φαίνονται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα:

1.2.1 Βασικές παράμετροι των κατεργασιών κοπής

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν μία κατεργασία κοπής είναι τρεις:

- Το κατεργαζόμενο τεμάχιο (ΤΕ)
- Το κοπτικό εργαλείο (ΚΕ)
- Το απόβλιττο, δηλαδή το αφαιρούμενο υλικό.



Σχήμα 1.4 Η κατεργασία της κοπής

Οι βασικές μεταβλητές μίας κατεργασίας κοπής σχετίζονται άμεσα με τα τρία συστατικά της που αναφέρθηκαν παραπάνω και είναι:

- Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και η οξύτητα της κοπτικής (ή των κοπτικών του) ακμής (ακμών)
- Το υλικό του κοπτικού εργαλείου και κατ' επέκταση η ποιότητα της επιφάνειάς του
- Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιείται, όπως η ακρίβειά της και η ακαμψία της.
- Οι συνθήκες κοπής (cutting conditions) όπως η πρόωση (feed), το βάθος κοπής (cutting depth), η ταχύτητα κοπής (cutting speed) και η ταχύτητα περιστροφής του τεμαχίου (spindle speed)

Οι συνθήκες κοπής είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι μίας τέτοια κατεργασίας:

Η ταχύτητα κοπής είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο. Κατά την κίνηση αυτή δαπανάται το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος της κοπής.

Το βάθος κοπής είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο υλικό.

Η πρόωση εκφράζει το μήκος του υλικού που γίνεται διαθέσιμο στο κοπτικό εργαλείο προς κοπή. Στον τόρνο, η κίνηση ανάμεσα σε κοπτικό εργαλείο και κατεργαζόμενο τεμάχιο γίνεται από το κοπτικό εργαλείο και εκφράζει τη μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος του άξονα περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Εκφράζεται δε σε μονάδες απόστασης ανά περιστροφή του τεμαχίου. Κατά την κίνηση αυτή δαπανάται ένα πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος της κοπής.

Η ταχύτητα περιστροφής είναι η σχετική ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το τεμάχιο σε σχέση με το κοπτικό εργαλείο. Την ταχύτητα αυτή προσδίδει είτε το κοπτικό εργαλείο είτε το κατεργαζόμενο τεμάχιο, ανάλογα με την κατεργασία, όπως είχε ήδη φανεί και στο *σχήμα 1.3*.

Όταν μεταβάλλουμε τις βασικές μεταβλητές μίας κατεργασίας κοπής, παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές σε αυτή:

- Μεταβάλλεται ο ρυθμός φθοράς του κοπτικού εργαλείου, κάτι που θα μας απασχολήσει εκτενώς στην παρούσα εργασία
- Αλλάζει η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας που παράγεται κατά την κοπή
- Το απόβλιττο που προκύπτει κατά την κατεργασία αλλάζει μορφή
- Διαμορφώνονται αναλόγως οι δυνάμεις και η ενέργεια που δαπανάται κατά την κατεργασία. Άμεση συνέπεια, ή και αιτία, αν θέλει κανείς να εξετάσει αντίστροφα το πρόβλημα, είναι οι αλλαγές στη θερμοκρασία και των τριών βασικών παραμέτρων της κοπής (ΚΕ, ΤΕ, απόβλιττο).

Προτού εξετάσουμε λεπτομερώς τι συμβαίνει κατά την κοπή, τόσο από μηχανική όσο και από ενεργειακή άποψη, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε στο βασικό μοντέλο που αναπαριστά τη γεωμετρία ενός κοπτικού εργαλείου.

Τα κοπτικά εργαλεία, ανάλογα με το είδος της κατεργασίας διακρίνονται σε:

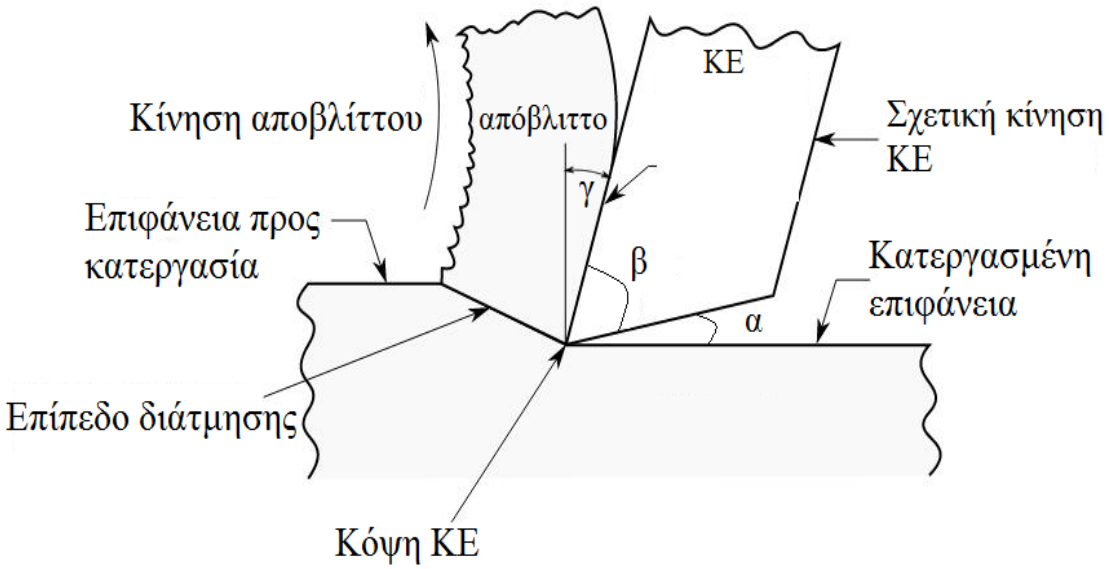
- Απλής σημειακής επαφής, καθορισμένης γεωμετρίας. Για την αποβολή υλικού είναι υπεύθυνη μόνο μία κόψη του (π.χ. τόρνευση)
- Πολλαπλής σημειακής επαφής, καθορισμένη γεωμετρία (π.χ. φρεζάρισμα). Στην κοπή συμμετέχουν περισσότερες κόψεις του κοπτικού εργαλείου
- Μη καθορισμένης γεωμετρίας. Για παράδειγμα ένας λειαντικός τροχός έχει ακανόνιστη γεωμετρία λόγω της φύσης και του σκοπού της κατεργασίας την οποία επιτελεί.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για ένα κοπτικό εργαλείο είναι:

- Η γωνία ελευθερίας α: όταν αυξάνεται αυτή η γωνία, μειώνεται η τριβή ανάμεσα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και τις επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου που πρόσκεινται στην κόψη του.

- Η γωνία αποβλήτου γ: σχηματίζεται από την επιφάνεια του αποβλήτου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του κοπτικού εργαλείου.
- Η γωνία σφήνας β: σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια του αποβλήτου

Οι γωνίες α, γ, β είναι συμπληρωματικές.



Σχήμα 1.5 Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου

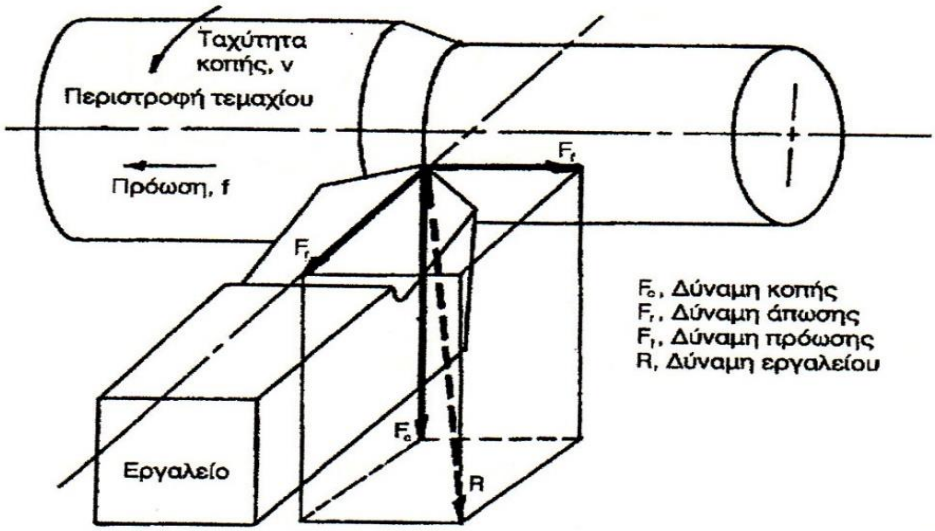
1.2.2 Οι δυνάμεις της κοπής

Οι κατεργασίες κοπής χωρίζονται στην:

- Ορθογωνική κοπή όπου η κόψη του ΚΕ είναι κάθετη προς τη διεύθυνση κοπής.
- Λοξή κοπή: Η κόψη του ΚΕ σχηματίζει γωνία ως προς τη διεύθυνση κοπής.

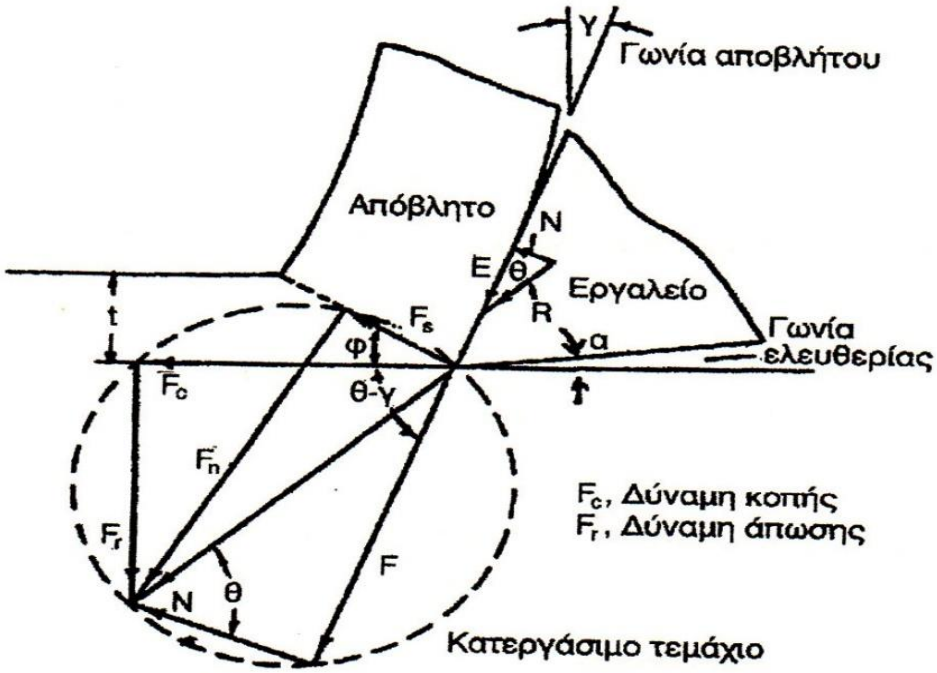
Η λοξή κοπή αποτελεί τη γενίκευση της ορθογωνικής κοπής. Σε αυτή, χρησιμοποιείται, όπως και στην ορθογωνική κοπή, ένα κοπτικό εργαλείο σαν σφήνα για την αφαίρεση του υλικού. Στο *σχήμα 1.6* απεικονίζεται ένα τεμάχιο το οποίο κόβεται λοξά από κοπτικό εργαλείο. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους αντίστοιχους άξονες λέγονται δυνάμεις κοπής, άπωσης και πρόωσης.

Η ορθογωνική κοπή απαιτεί η τέμνουσα άκρη του κοπτικού εργαλείου να είναι κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Το επίπεδο στο οποίο γίνεται η κοπή είναι παράλληλο στην επιφάνεια του τεμαχίου που κατεργάζεται. Επομένως, η ροή του υλικού μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται στις 2 διαστάσεις. Επιπλέον, αν υποθέσουμε ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό του αποβλήτου, τότε έχουμε επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση.



Σχήμα 1.6 Δυνάμεις στη λοξή κοπή

Δύναμη πρόωσης εδώ δεν υφίσταται, όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.7*.



Σχήμα 1.7 Δυνάμεις στην ορθογωνική κοπή

Η δύναμη F είναι η δύναμη τριβής ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το απόβλητο ενώ η N είναι η κάθετη στην επιφάνεια του ΚΕ και του αποβλήτου που προκαλεί την τριβή. Επάνω στο επίπεδο διάτμησης έχουμε δύο συνιστώσες. Την Fs που είναι εφαπτομενική σε αυτό και την Fn που είναι κάθετη σε αυτό.

Διατυπώνοντας μαθηματικά τι συμβαίνει στην ορθογωνική κοπή έχουμε:

$$Fn = Fc\sin\varphi + Fr\cos\varphi$$
$$F = Fc\sin\gamma + Fr\cos\gamma$$
$$N = Fc\cos\gamma - Fr\sin\gamma$$
$$Fs = Fc\cos\varphi - Fr\sin\varphi \quad (1)$$

Επίσης, ισχύει:

$$Fs = \sqrt{F^2 + N^2}\cos(\varphi + \theta - \gamma) = \frac{kt_1}{\sin\varphi} \ ,$$

όπου k είναι το όριο διαρροής του υλικού σε διάτμηση στην επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση και t_1 είναι το βάθος κοπής.

Η συνολική δύναμη που ασκείται στο εργαλείο είναι:

$$R = \sqrt{F^2 + N^2} = \frac{kt_1}{\sin\varphi\cos(\varphi + \theta - \gamma)}$$

Η δύναμη κοπής Fc είναι η μία συνιστώσα της R και η δύναμη άπωσης Fr η κάθετή της. Ισχύει εύλογα:

$$Fc = \sqrt{F^2 + N^2}\cos(\theta - \gamma) = \frac{kt_1\cos(\theta - \gamma)}{\sin\varphi\cos(\varphi + \theta - \gamma)} \quad (2)$$

και

$$Fr = \sqrt{F^2 + N^2}\sin(\theta - \gamma) = \frac{kt_1\sin(\theta - \gamma)}{\sin\varphi\cos(\varphi + \theta - \gamma)}$$

Το επίπεδο διάτμησης σχηματίζει γωνία φ και με τη διεύθυνση της κοπής ώστε η Fc να ελαχιστοποιείται. Σύμφωνα με τη σχέση (2) πρέπει:

$$2\varphi - \gamma + \theta = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Από (1) και (3) έχουμε:

$$Fc = \frac{2kt_1\cos(\theta - \gamma)}{1 - \sin(\theta - \gamma)} = 2kt_1\cot\varphi$$

Η γωνία φ υπολογίζεται ως: $r_c = \frac{t_1}{t_2} = \frac{(SS)\sin\varphi}{(SS)\sin(\frac{\pi}{2} - \varphi + \gamma)} = \frac{\sin\varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} = \frac{v_c}{v}$

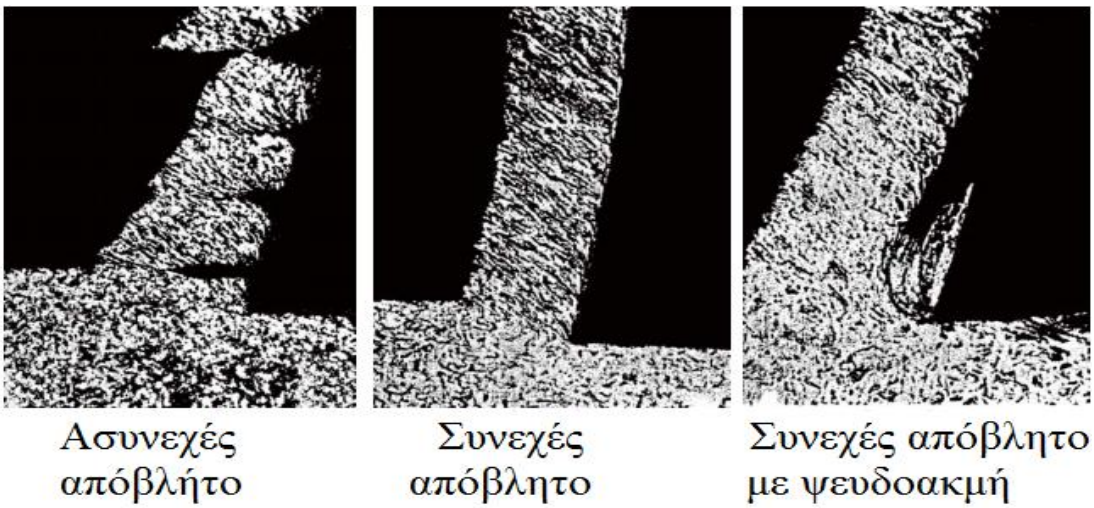
όπου t_2 είναι το πάχος του αποβλήτου, (SS) το μήκος του επιπέδου διάτμησης, v_c η ταχύτητα του αποβλήτου και v η ταχύτητα της κοπής. r_c ορίζεται ως ο δείκτης ή συντελεστής συμπιέσεως του αποβλήτου και εκφράζει το βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το υλικό κατά τον σχηματισμό του αποβλήτου.

1.2.3 Σχηματισμός αποβλήτου

Η μελέτη της μορφής του αποβλήτου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασμένης επιφάνειας. Ο μηχανισμός με τον οποίο σχηματίζεται καθορίζει τις δυνάμεις κοπής και την ισχύ της και επηρεάζει τη φθορά το κοπτικού εργαλείου. Αντίστροφα, ο μηχανισμός επηρεάζεται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου, τις συνθήκες κοπής όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως και τα δυναμικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής, κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου. Τα απόβλητα που σχηματίζονται, χωρίζονται κυρίως στις εξής κατηγορίες:

- Συνεχές απόβλητο
- Συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή
- Ασυνεχές απόβλητο με ψευδοακμή

Το συνεχές απόβλητο σχηματίζεται κατά την κοπή όλκιμων υλικών και κραμάτων όπως ο μαλακός χάλυβας, το αργίλιο κ.α., σε μεγάλες ταχύτητες κοπής και με τη χρήση κοπτικών εργαλείων από σκληρομέταλλο. Το απόβλητο που σχηματίζεται, τείνει να είναι συνεχές όσο αυξάνουμε την ταχύτητα κοπής, τη γωνία αποβλήτου ή τη χρήση υγρού κοπής. Πρόκειται για μία βέλτιστη κατάσταση από πλευράς καταναλισκόμενης ισχύος, ανάπτυξης δυνάμεων της κοπής, φθοράς του κοπτικού εργαλείου και τραχύτητας της επιφάνειας που παράγεται.



Σχήμα 1.8 Σχηματισμοί αποβλήτου

Το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή σχηματίζεται όπως το συνεχές απόβλητο. Η διαφορά του έγκειται στο ότι μικρά κομμάτια μετάλλου έχουν συγκολληθεί στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, το απόβλητο κινείται πλέον κατά μήκος της ψευδοακμής αυτής. Αν η ψευδοακμή είναι μεγάλη, η ποιότητα της επιφάνειας που παράγεται ελαττώνεται. Βέβαια, η παρουσία ψευδοακμής προστατεύει το κοπτικό εργαλείο από τη φθορά του. Μπορούμε να διακόψουμε το σχηματισμό του αν αυξήσουμε απότομα την ταχύτητα κοπής όταν αυτό αρχίσει να σχηματίζεται.

1.2.4 Η συναλλαγή θερμότητας στην κοπή

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που δαπανάται για τη διεξαγωγή μίας κατεργασίας κοπής μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα. Είναι, δε, συγκεντρωμένη σε ένα πολύ μικρό μέρος (θερμική ζώνη).

Υπολογισμοί έχουν δείξει ότι η μέγιστη θερμοκρασία αναπτύσσεται στο μέτωπο του κοπτικού εργαλείου σε κάποια απόσταση από την κόψη του. Με την αύξηση της ταχύτητας κοπής, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται αυξάνεται. Η υψηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί είναι η θερμοκρασία τήξης του υλικού. Έτσι, υλικά που έχουν χαμηλότερα σημεία τήξης αυτά των κοπτικών εργαλείων μπορούν να επιδεχτούν κατεργασία από τα τελευταία σε οποιαδήποτε ταχύτητα κοπής. Για παράδειγμα, τα κράματα Al και Mg κόβονται με οποιαδήποτε ταχύτητα από τα περισσότερα κοπτικά εργαλεία.

Ο Kroneberg διατύπωσε ότι η μέση θερμοκρασία θ_F στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου και αποβλήτου εξαρτάται από:

- Τη διατομή του αποβλήτου (A)
- Την ταχύτητα κοπής (v)
- Την ειδική αντίσταση κοπής (k_s)
- Τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού του ΤΕ (λ)
- Το γινόμενο της πυκνότητας επί την ειδική θερμότητα του υλικού του τεμαχίου (h)

Μετά από διαστατική ανάλυση και πλήθος πειραμάτων, προκύπτει η παρακάτω σχέση που δίνει τη μέση θερμοκρασία στη διεπιφάνεια ΚΕ/αποβλήτου:

$$\theta_F = \frac{0,67 k_s v^{0,44} A^{0,22}}{\lambda^{0,44} h^{0,56}}$$

Παρότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας απομακρύνεται με τη βοήθεια του αποβλήτου, ένα μέρος της περνάει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλονται οι διαστάσεις του, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Επίσης, όπως υπονοήθηκε πιο πάνω, η ταχύτητα κοπής περιορίζεται εξαιτίας της θερμότητας που συγκεντρώνεται στο κοπτικό εργαλείο.

1.2.5 Υγρά κοπής

Τα υγρά κοπής επιτελούν τις εξής λειτουργίες:

- Λίπανση
- Ψύξη
- Προστασία

Η λίπανση υποβοηθά τη μείωση της τριβής ανάμεσα στο απόβλητο και το κοπτικό εργαλείο. Όπως σε πάρα πολλές εφαρμογές της μηχανολογίας είναι απαραίτητη. Σε κοπές υψηλών ταχυτήτων είναι απαραίτητη και βελτιώνει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας και την κατανάλωση ενέργειας κατά την κοπή.

Η ψύξη είναι απαραίτητη για την απομάκρυνση των ποσών θερμότητας που εκλύονται κατά την κοπή λόγω της τριβής ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το απόβλητο. Τα υγρά κοπής απορροφούν κάποιο ποσό θερμότητας, επομένως το τεμάχιο και το απόβλητο ψύχονται. Έτσι, η παρουσία ενός κατάλληλου υγρού κοπής μπορεί να μας επιτρέψει να διεξάγουμε μία κοπή σε υψηλότερη ταχύτητα, κάτι που έχει σημασία όπως θα φανεί στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

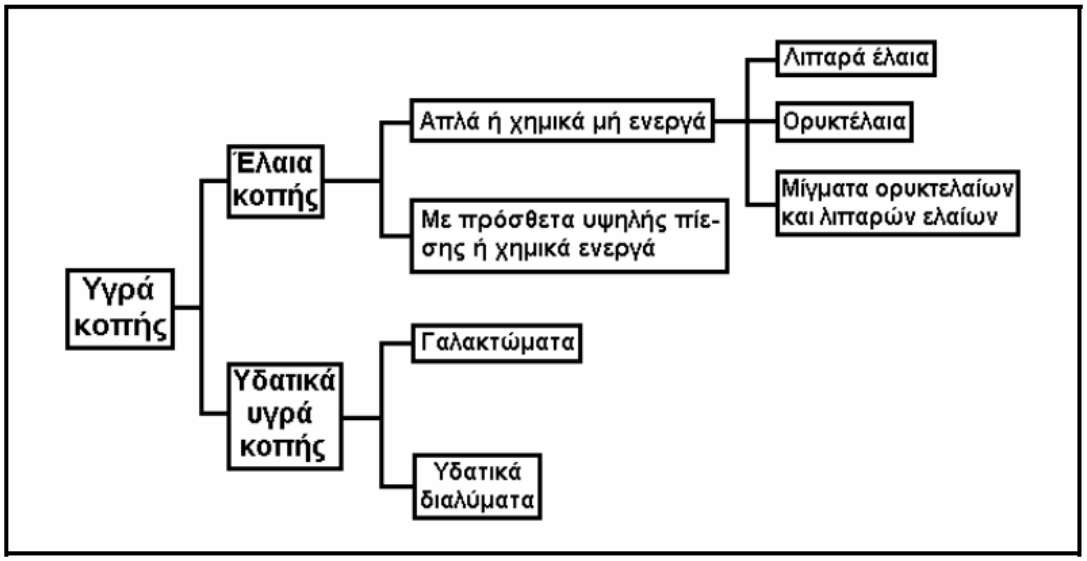
Τέλος, το υγρό κοπής αναλαμβάνει προστατευτικό ρόλο. Απομακρύνοντας τμήματα του αποβλήτου, μειώνει την τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας, αυξάνοντας έτσι την ποιότητά της. Επίσης, μπορεί να προστατεύσει το εργαλείο από το να συγκολληθούν σε αυτό τμήματα του μετάλλου που κόβεται.

Αντιθέτως, τα υγρά κοπής μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα φαινόμενα. Εκτός από το ότι η εισπνοή τους από τον άνθρωπο κάθε άλλο παρά υγιεινή είναι, προκαλούν δυσάρεστες οσμές ή και καπνό αν καούν. Επίσης, η επαφή τους με το ανθρώπινο δέρμα ενδέχεται να προκαλέσει ερεθισμούς. Ακόμη, ακατάλληλα υγρά κοπής ενδέχεται να διαβρώσουν το υλικό του κοπτικού εργαλείου ή τα διάφορα μέρη της εργαλειομηχανής (π.χ. ρουλεμάν) που θα έρθουν σε επαφή με αυτό. Με την πάροδο του χρόνου, η χημική σύσταση ενός υγρού κοπής ενδέχεται να αλλάξει λόγω της αλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον. Επίσης, μικρά κομμάτια μετάλλου ενδεχομένως να ενσωματωθούν σε αυτό. Έτσι, σιγά σιγά το υγρό κοπής μπορεί να χάσει την αποτελεσματικότητά του και οι συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η κατεργασία να αλλάξουν. Αν πρόκειται να απορρίψουμε κάποιο υγρό κοπής, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι μιλάμε για επικίνδυνα απόβλητα που απαιτούν ειδικές διαδικασίες ώστε να απορριφθούν χωρίς να προκαλέσουν επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Έτσι, όταν καλούμαστε να επιλέξουμε υγρό κοπής, αυτό πρέπει να επιλεγεί βάσει των εξής κριτηρίων:

- Πόσο επηρεάζει την κοπτική ικανότητα του εργαλείου
- Πόσο θα βελτιώσει ή όχι την παραγόμενη επιφάνεια
- Τις προστατευτικές του ικανότητες
- Τα υλικά του των ΤΕ, ΚΕ
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Μία βασική ταξινόμηση των υγρών κοπής φαίνεται στο σχήμα 1.9:



Σχήμα 1.9 Ταξινόμηση των υγρών κοπής

Η αναφορά στο ποιο λιπαντικό προτιμάται για κάθε κατεργασία ξεφεύγει του παρόντος. Αναφέρουμε μόνο ότι, τα έλαια κοπής προτιμώνται για μικρής ταχύτητας κοπές ενώ τα γαλακτώματα και τα υδατικά διαλύματα προτιμώνται σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής.

1.2.6 Ποιότητα παραγόμενης επιφάνειας

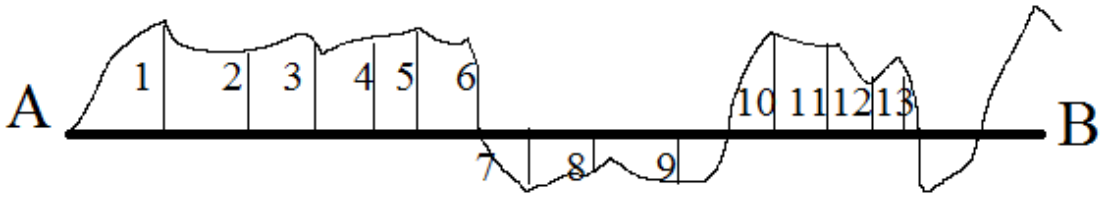
Η ποιότητα της επιφάνειας που προκύπτει από μία κατεργασία κοπής, έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από το τεμάχιο από το οποίο προήλθε. Αυτό συμβαίνει, σύμφωνα με ό,τι αναφέρθηκε προηγουμένως, εξαιτίας θερμικών, χημικών, μηχανικών και φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Οι αλλαγές που παρατηρούνται στην ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτή που αναμένουμε εξαρτώνται από την τριβή, τη φθορά του κοπτικού εργαλείου και τη λίπανση. Όταν ένα εργαλείο φθείρεται, αλλάζει η επιφάνεια και η γεωμετρία του. Αυτό δυσχεραίνει την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας. Επίσης, η επίδραση της λίπανσης στην ποιότητα επιφανείας συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Μετά από μία κατεργασία κοπής, η παραγόμενη επιφάνεια ενδέχεται να κατεργαστεί εκ νέου για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Για παράδειγμα, μπορεί να υποστεί λείανση για να εξασφαλιστούν οι απαιτούμενες τιμές τραχύτητας. Επιπλέον, σε μεγάλες γραμμές παραγωγής, δείγμα των παραγόμενων προϊόντων ελέγχεται για την ποιότητά του με καταστρεπτικές ή μη μεθόδους. Ακόμη, προδιαγραφές ενός τεμαχίου που είναι μετρήσιμες, ελέγχονται ως προς την επιτυχία των επιθυμητών ανοχών τους.

1.2.6.1 Τραχύτητα επιφανείας

Κορυφαία ένδειξη όσον αφορά την ποιότητα μιας επιφάνειας αποτελεί η τραχύτητά της. Περιγράφεται εν γένει από την μέση τιμή της (R_α) ή τη ενδεικνυόμενη τιμή της (R_q ή R_{RMS}).



Σχήμα 1.10 Μέτρηση τραχύτητας επιφανείας

Κατά μήκος μιας κεντρικής γραμμής ΑΒ που θεωρείται ότι χωρίζει την επιφάνεια σε δύο συνολικά ίσα εμβαδά εκατέρωθέν της μετρούνται τα ύψη των κοιλοτήτων και των βουνών. Η μέση τραχύτητα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$R_\alpha = \frac{1+2+3+...+n}{n}$$

όπου οι αριθμοί συμβολίζουν την απόσταση κάθε σημείου από την κεντρική γραμμή. Τα ύψη λαμβάνονται ως θετικές τιμές είτε βρίσκονται πάνω είτε κάτω από την κεντρική γραμμή.

Η ενδεικνυόμενη τιμή της τραχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$R_q = \sqrt{\frac{1^2+2^2+3^2+...+n^2}{n}}$$

Γενικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι τα μm (μικρόμετρα) ή στο αγγλοσαξονικό σύστημα οι μin. (μικροίντσες). Ισχύει 1 μm = 40 μin.

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η τιμή της μέγιστης τραχύτητας (R_{max}). Αυτή είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στη βαθύτερη κοιλότητα και την υψηλότερη κορυφή. Εκφράζει το ύψος του υλικού που πρέπει να αφαιρέσουν προκειμένου να προκύψει μια λεία επιφάνεια.

Στην πράξη, χρησιμοποιείται κυρίως η μέση τιμή της τραχύτητας, καθότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη. Η σχέση της με την ενδεικνυόμενη τιμή της τραχύτητας για δεδομένο προφίλ επιφανείας είναι συγκεκριμένη. Για παράδειγμα, αν έχουμε μια επιφάνεια με καμπύλη ημιτόνου κατά μήκος της, η ενδεικνυόμενη τιμή είναι 10% μεγαλύτερη από τη μέση τιμή τραχύτητας. Εμπειρικά, αυτό το ποσοστό ισχύει για τις περισσότερες κατεργασίες κοπής, ενώ για άλλες όπως η λείανση είναι 20% ενώ για το Honing 40%.

Προκειμένου να μετρήσουμε την τραχύτητα μίας επιφάνειας, χρησιμοποιούμε ειδικές συσκευές του εμπορίου, τα τραχύμετρα ή μετρητές προφίλ επιφανείας. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα όργανα, φέρουν ένα εργαλείο από διαμάντι με πολύ οξεία κόψη, το οποίο κινείται κατά μήκος ευθείας γραμμής πάνω στην επιφάνεια. Εναλλακτικά, ειδικά μικροσκόπια μάς επιτρέπουν να μετρήσουμε την τραχύτητα επιφανείας. Τέλος, μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των στερεοσκοπικών φωτογραφιών.

1.2.7 Η κατεργασιμότητα του υλικού

Κατεργασιμότητα ενός υλικού ονομάζουμε το σύνολο των ιδιοτήτων του που το καθιστούν «εύκολα» κατεργάσιμο. Για παράδειγμα, ένα υλικό που προκαλεί μικρότερη φθορά στο ίδιο κοπτικό εργαλείο απ’ ότι ένα άλλο, είναι πιο κατεργάσιμο. Ποσοτικά, αυτό μπορεί να εκφραστεί ως σύγκριση των πεδίων φθοράς που προκαλεί το υλικό για την ίδια μεταβολή των διαστάσεων του από το κοπτικό εργαλείο.

Εφόσον η κατεργασιμότητα συνδέεται άμεσα με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, έχει σχέση και με την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας. Εκτός της φθοράς, η σύγκριση μπορεί να γίνεται με βάση την ενέργεια που δαπανάται κατά την κατεργασία ή τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται. Άρα, συνολικά, ένα υλικό υψηλής κατεργασιμότητας προκαλεί μικρή φθορά στο κοπτικό εργαλείο, με μικρή δαπάνη ενέργειας και καλή ποιότητα επιφάνειας.

Για την ταξινόμηση των υλικών με βάση την κατεργασιμότητά τους χρησιμοποιούνται οι δείκτες κατεργασιμότητας. Πρόκειται περί ποιοτικών δεικτών που αποδίδουν μια ένδειξη κατεργασιμότητας σε ένα υλικό. Ενδεικτικά, ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας έχει δείκτη κατεργασιμότητας 25. Αντίθετα, ο χάλυβας AISI 1212 έχει δείκτη κατεργασιμότητας 100.

1.3 Τα κοπτικά εργαλεία (cutting tools)

Το κοπτικό εργαλείο αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για της σύγχρονες κατεργασίες κοπής. Επιπλέον, ο ρόλος του στη διαμόρφωση του κόστους μίας κατεργασίας είναι πολύ ουσιαστικός. Οι σύγχρονες απαιτήσεις των κατεργασιών, προϋποθέτουν την ανάπτυξη εργαλείων που θα αντέχουν στις υψηλές τάσεις από τις

οποίες καταπονούνται. Το ιδανικό υλικό ενός κοπτικού εργαλείου, συνδυάζει υψηλή σκληρότητα, προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί τα άλλα υλικά και μεγάλη διάρκεια ζωής για να μην είναι ασύμφορη οικονομικά η χρήση του. Επίσης, πρέπει να είναι φυσικά και χημικά σταθερό, προκειμένου να μην αλλοιώνεται η κοπτική του ικανότητα, κάτι που θα σήμαινε μείωση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας, άρα και αύξηση του κόστους λόγω των επιπλέον διαδικασιών που θα απαιτούνταν για τη διατήρηση της ποιότητας. Με σκοπό να επιτευχθούν όλα αυτά, χρησιμοποιούνται επικαλύψεις, που αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων, καθώς και τις ιδιότητές τους στις διάφορες θερμοκρασίες. Γενικά όμως, δεν υπάρχει υλικό που να συνδυάζει βέλτιστα όλες τις επιθυμητές ιδιότητες. Επομένως, έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά υλικά και τεχνικές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι ουσιαστική βελτίωση στο αποτέλεσμα που προσπαθούμε να επιτύχουμε μέσω μιας κατεργασίας κοπής, δε συμβαίνει, ούτε συνέβη ιστορικά, με βελτίωση της τεχνολογίας των υλικών, αλλά με τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κοπτικών εργαλείων. Αυτό, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων μέσω διαδικασιών βελτίωσης του σχεδιασμού της κοπτικής τους ακμής. Οι σχεδιασμοί αυτοί, μείωσαν τις δυνάμεις κοπής, αύξησαν την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας και μείωσαν αθροιστικά το κόστος των κατεργασιών κοπής. Συμπερασματικά, η έρευνα επικεντρώνεται τόσο στη βελτίωση της γεωμετρίας, όσο και στην αξιοποίηση των επιτευγμάτων των υλικών, με στόχο όσο το δυνατόν πιο επιθυμητά αποτελέσματα.

1.3.1 Υλικά κοπτικών εργαλείων

Τα υλικά των κοπτικών εργαλείων διακρίνονται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα.

Τα σιδηρούχα, που ονομάζονται εργαλειοχάλυβες, διακρίνονται σε:

- Ανθρακοχάλυβες και τα κράματά τους
- Χυτοκράματα
- Ταχυχάλυβες (HSS)

Τα μη σιδηρούχα υλικά διακρίνονται σε:

- Σκληρομέταλλα
- Κεραμικά υλικά
- Βιομηχανικό διαμάντι
- Συνθετικά υπέρσκληρα υλικά

Οι ανθρακούχοι χάλυβες αποτέλεσαν το πρώτο υλικό κατασκευής κοπτικών εργαλείων. Έχουν το πιο χαμηλό κόστος κτήσης από τα υπόλοιπα κοπτικά εργαλεία και οι ιδιότητές τους καθορίζονται από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (0,8 – 1,5 %). Χάνουν εύκολα τη σκληρότητά τους σε μεγάλες ταχύτητες κοπής ή μεγάλες προώσεις και βάθη κοπής εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται.

Έτσι, η κατεργασία με ανθρακοχάλυβες έχει τελικά υψηλό κόστος που συνοδεύεται από χαμηλή παραγωγικότητα.

Οι κραματωμένοι ανθρακοχάλυβες έχουν κραματωθεί από μέταλλα όπως το χρώμιο Cr, το μαγγάνιο Mn, το βολφράμιο W, το μολυβδένιο Mo, το βανάδιο V, το νικέλιο Ni και το πυρίτιο Si σε ποσοστό μικρότερο από 3%. Βελτιώνουν τις ιδιότητες των χαλύβων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, διατηρώντας την σκληρότητά τους μέχρι, περίπου, τους 500 ^{o}C.

Οι ταχυχάλυβες (HSS – High Speed Steels), περιέχουν χρώμιο Cr, βολφράμιο W, μολυβδένιο Mo, βανάδιο V, κοβάλτιο Co και άνθρακα C. Καλύπτουν όλο το φάσμα ταχυτήτων και συνθηκών κοπής γενικότερα, καθότι παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (600 ^{o}C), μεγάλη διάρκεια ζωής και σχετικά χαμηλό κόστος. Επίσης, έχουν καλή αντοχή σε κραδασμούς και κρουστικά φορτία, η δε επανατρόχισή τους είναι μία εύκολη διαδικασία.

Τα χυτοκράματα ή στελλίτες είναι μη σιδηρούχα υλικά που αποτελούνται από κοβάλτιο Co, χρώμιο Cr, βολφράμιο W και άνθρακα. Τα βρίσκουμε σε μορφή πλακιδίων, επομένως ενσωματώνονται σε ειδικά στελέχη της εργαλειομηχανής της κοπής. Παρότι έχουν μικρότερη σκληρότητα από τους ταχυχάλυβες, τη διατηρούν ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές ταχύτητες κοπής με μέτριες τιμές πρόωσης.

Τα σκληρομέταλλα παράγονται συνήθως με κονιομεταλλουργία. Καρβίδια βαρέων μετάλλων (π.χ. WC – καρβίδιο του βολφραμίου) συνδέονται, κατά βάση, με συνδετική ύλη το κοβάλτιο Co. Διατηρούν την σκληρότητά τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής. Είναι δε τόσο ευρεία η χρήση τους, ώστε έχουν τυποποιηθεί κατά ISO. Κάθε τέτοια ομάδα χαρακτηρίζεται από τη σύνθεση του υλικού του κοπτικού εργαλείου, καθώς και από διάφορα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η σκληρότητά του, η αντοχή του σε κάμψη και θλίψη και το μέτρο ελαστικότητάς του. Επίσης, αναφέρεται ο συντελεστής θερμικής διαστολής του για να υπολογίζεται η αλλαγή στις διαστάσεις του κατά την κατεργασία.

Όσον αφορά τα κεραμικά υλικά, με αυτά μπορούμε να επιτύχουμε ταχύτητες κοπής σχεδόν τριπλάσιες από αυτές των σκληρομετάλλων. Το βασικό τους υλικό είναι το Al2O3 ή Si3N4 με συνδετικό μέσο πυρίμαχα οξείδια Mg και Si Μπορούμε δε να κατεργαστούμε σχεδόν όλα τα κατεργαζόμενα υλικά (εκτός από Al, Ti, Zr) εξαιτίας της μεγάλης σκληρότητας των αντίστοιχων κοπτικών εργαλείων σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, έχουν μεγάλη αντίσταση απέναντι στον ερπυσμό και στην οξείδωση, μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό συντελεστή διάχυσης.. Ωστόσο, είναι ευαίσθητα σε καμπτικά και κρουστικά φορτία και απότομες θερμοκρασιακές εναλλαγές. Τέλος, δεν απαιτούν τη χρήση υγρού κοπής, ενώ η χρήση τους διευρύνεται, ιδιαίτερα σε εργαλειομηχανές CNC.

Το διαμάντι, είναι το πιο σκληρό υλικό που χρησιμοποιείται στα κοπτικά εργαλεία. Η κόψη του, παραμένει πρακτικά άφθαρτη παρά τη συνεχή κοπή. Έτσι, έχει πρακτικά άπειρη διάρκεια ζωής. Επίσης, εμφανίζει πολύ μικρή τριβή με τα μέταλλα και δεν απαιτεί τη χρήση υγρού κοπής. Γι' αυτό, η ποιότητα της επιφάνειας που αποδίδει, είναι

ένα πλεονέκτημα που δύσκολα μπορεί να αντισταθμιστεί. Όμως, επειδή πρόκειται για ψαθυρό υλικό, δεν αντέχει πολύ στα κρουστικά φορτία. Έτσι, απαιτείται μεγάλη στιβαρότητα των εργαλειομηχανών στις οποίες θα χρησιμοποιηθεί και μεγάλη ακρίβεια στις κινήσεις, χωρίς κραδασμούς. Τέλος, παρότι δεν αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες κοπής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αναπτύσσει πολύ μεγάλη τριβή, χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλο φάσμα ταχυτήτων κοπής.

1.3.1.1 Το κυβικό βοριονιτρίδιο (CBN)

Το κυβικό βοριονιτρίδιο (ή κυβικός βοριονιτρίτης) ή CBN είναι ένα συνθετικό, υπέρσκληρο υλικό, μία αλλοτροπική μορφή του βοριονιτρίτη. Είναι το δεύτερο πιο σκληρό υλικό που υπάρχει, μετά το διαμάντι. Όμως, δεν οξειδώνεται στον αέρα και αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, είναι πολύ χρήσιμο για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων.

Παρότι το 2013 βρέθηκαν για πρώτη φορά ίχνη CBN σε πετρώματα υψηλής περιεκτικότητας χρωμίου (Cr), στο Θιβέτ, η παρασκευή του γίνεται εργαστηριακά. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ομοιάζουν με αυτές από τις οποίες παράγεται το διαμάντι από το γραφίτη.

Καταρχάς, για να παράγουμε CBN, πρέπει να συνθέσουμε πρώτα βοριονιτρίτη με εξαγωνική κρυσταλλική μορφή (BN). Αυτό γίνεται από την αντίδραση τριοξειδίου του βορίου (B_2O_3) ή βορικού οξέος ($B(OH)_3$) με αμμωνία ή ουρία ($CO(NH_2)_2$) σε περιβάλλον αζώτου.

Η παραγωγή του τριοξειδίου του βορίου (B_2O_3) γίνεται με θέρμανση βόρακα, παρουσία θειικού οξέος. Ο βόρακας, είναι ένα ένυδρο ορυκτό του βορίου. Το όνομά του σημαίνει «λευκό» εξαιτίας του χρώματός του. Σχηματίζεται κατά την εξάτμιση υδάτινων μαζών, κυρίως από λίμνες οι οποίες δεν έχουν νερό όλη την εποχή του χρόνου, παρά μόνο την εποχή των πολλών βροχοπτώσεων. Συνήθως βρίσκεται στο Θιβέτ, στην Τουρκία, στη Βολιβία, στο Μεξικό και σε περιοχές της Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Μετά τη θέρμανση του, διαχωρίζεται αυτοβούλως από το υπόλοιπο μείγμα και συλλέγεται.

Το βορικό οξύ, είτε βρίσκεται στη φύση, είτε παρασκευάζεται στο εργαστήριο. Για παράδειγμα, το βρίσκουμε στο θαλασσινό νερό ή σε φυτά. Ακόμα υπάρχει σε κάποια περιεκτικότητα στο βόρακα και σε ηφαιστειογενή περιβάλλοντα. Στο εργαστήριο, μπορεί να παρασκευαστεί, αντιδρώντας βόρακα με υδροχλωρικό οξύ ως εξής:

$$Na_2B_4O_7 + 10H_2O + 2\,HCl \rightarrow 4\,B(OH)_3 + 2\,NaCl + 5\,H_2O$$

Έτσι, οι αντιδράσεις βορικού οξέος ή τριοξειδίου του βορίου, παράγουν την εξαγωνική μορφή του βοριονιτρίτη (BN) ως ακολούθως:

$$B_2O_3 + 2\,NH_3 \rightarrow 2\,BN + 3\,H_2O \;\left(T = 900^{\circ}C\right)$$
$$B\left(OH\right)_3 + NH_3 \rightarrow BN + 3\,H_2O \;\left(T = 900^{\circ}C\right)$$
$$B_2O_3 + CO\left(NH_2\right)_2 \rightarrow 2\,BN + CO_2 + 2\,H_2O \;\left(T > 1000^{\circ}C\right)$$

Ο βοριονιτρίτης που προκύπτει δεν έχει συγκεκριμένη κρυσταλλική μορφή και περιέχει 5-8% B_2O_3. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί θέρμανση σε θερμοκρασία >1500°C η οποία όχι μόνο ξεφορτώνεται το B_2O_3 αλλά προσδίδει και την εξαγωνική κρυσταλλική μορφή του BN.

Στη συνέχεια, ο εξαγωνικής δομής BN, θερμαίνεται και συμπιέζεται, οπότε προκύπτει ο κυβικός BN. Για να γίνει αυτό, απαιτείται πίεση 5-18 GPa και θερμοκρασία 1730 – 3230 ^{o}C. Οι απαιτήσεις μπορούν να ελαττωθούν στα 4-7 GPa και 1500oC αν προσθέσουμε μία ποσότητα B_2O_3. Επιπλέον, μπορούμε να μειώσουμε περαιτέρω τις απαιτήσεις πίεσης και θερμοκρασίας, προσθέτοντας κάποιον καταλύτη της διαδικασίας όπως το λίθιο ή το μαγνήσιο.

Τα πλακίδια PCBN συναντώνται σε διάφορες μορφές. Για λόγους κόστους, αν η κατεργασία που θα διεξάγουμε το επιτρέπει, προτιμούμε πλακίδια που περιέχουν PCBN μονάχα στις κοπτικές τους ακμές. Το υπόλοιπο πλακίδιο, κατασκευάζεται συνήθως από σκληρομέταλλο.

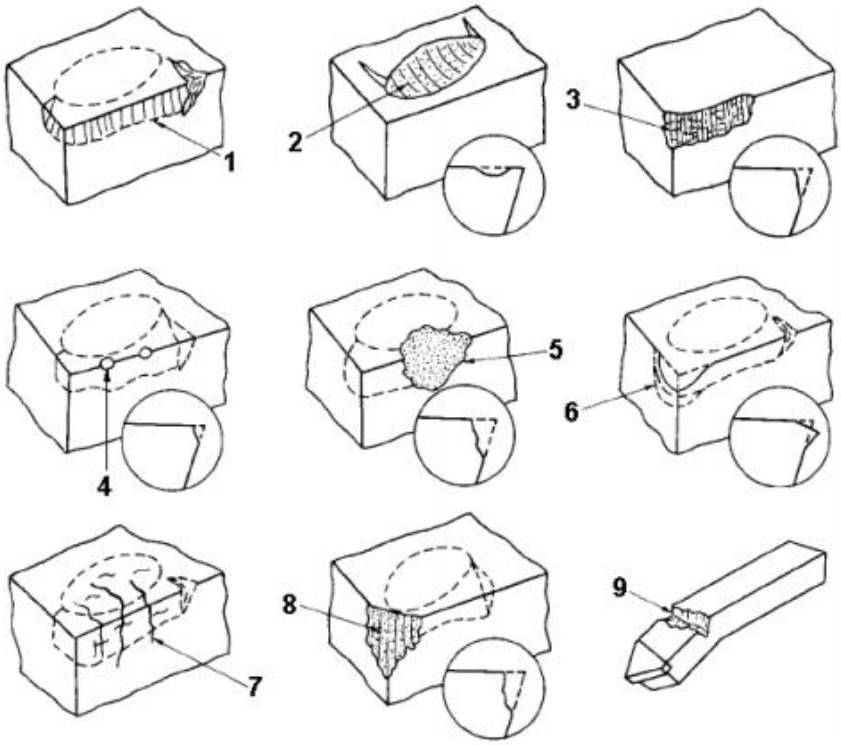
Σχήμα 1.11 Πλακίδιο PCBN με δύο κοπτικές ακμές στη μία πλευρά του

1.3.2 Φθορά κοπτικού εργαλείου (tool wear)

Τα κοπτικά εργαλεία των κατεργασιών κοπής υπόκεινται σε φθορές που οφείλονται τόσο σε μηχανικά όσο και σε θερμικά φαινόμενα. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται δεν είναι μόνο πολύ υψηλές αλλά και πολύ ακανόνιστα κατανεμημένες. Έτσι, δεν έχουν όλα τα σημεία του κοπτικού εργαλείου την ίδια θερμοκρασία, κάτι που επιτείνει την καταπόνηση. Επίσης, σε μία κατεργασία κοπής, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να πάρει πολύ υψηλές τιμές (της τάξης των 10^6 C/s). Επιπλέον, τόσο οι τάσεις που προκαλούνται από την πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου στη ζώνη επαφής του με το ΚΕ, όσο και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στη ζώνη επαφής ΚΕ και αποβλήτου, φθείρουν το κοπτικό εργαλείο.

Έτσι προκύπτουν τα εξής είδη φθοράς:

- Πεδίο φθοράς (Flank wear) στην ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ (1)
- Φθορά κρατήρα (Crater wear) στην επιφάνεια του αποβλήτου (2)
- Απολέπιση στην περιοχή γύρω από την κόψη λόγω σχηματισμού ψευδοκόψης και δεσμών συγκόλλησης (3)
- Μικροθραύσεις στην κόψη του ΚΕ (Chipping) (4)
- Τοπική θραύση της κόψης (Edge cracking) (5)
- Πλαστική παραμόρφωση της ακής του ΚΕ (6)
- Θερμά ρήγματα, λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών (7)
- Θραύση της ακής του ΚΕ λόγω κρουστικών φορτίων (8)
- Θραύση του στελέχους του ΚΕ λόγω κάμψης (9)



Σχήμα 1.12 Διάφορα είδη φθοράς ΚΕ

Ο σχηματισμός και η λύση συγκολλητών δεσμών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ψευδοκόψης (3). Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται εξαιτίας της τριβής μεταξύ αποβλήτου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά τη διάρκεια της κοπής, έχει ως συνέπεια την απόσπαση μικρών κομματιών από το εργαλείο προς το τεμάχιο ή το απόβλητο.

Οι μικροθραύσεις στην ακή του ΚΕ (4) περιγράφουν τη θραύση πολύ μικρών κομματιών στην ακή του, ένα φαινόμενο που ομοιάζει με αυτό του σπασίματος της μύτης ενός μολυβιού. Τα κομμάτια αυτά μπορούν να είναι πάρα πολύ μικρά (microchipping) ή μεγαλύτερα (fracture). Το φαινόμενο δεν εξελίσσεται σταδιακά όπως το πεδίο φθοράς, αλλά συνοδεύεται από ξαφνική απώλεια του υλικού του ΚΕ και επηρεάζει κατά πολύ την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Οι λόγοι εμφάνισης των μικροθραύσεων είναι δύο. Αφενός, τα κρουστικά φορτία, λόγω διακοπτόμενης κοπής ή μεγάλων κραδασμών και η θερμική κόπωση, εξαιτίας των απότομων εναλλαγών θερμοκρασίας (7), ή και πάλι εξαιτίας διακοπτόμενης κατεργασίας (8). Η θραύση, συνήθως, συμβαίνει σε ένα σημείο όπου υπάρχει ήδη κάποιο ελάττωμα ή κάποια μικρορωγμή. Επίσης, την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων φθορών επιτείνει η επιλογή μεγάλων τιμών πρόωσης ή βάθους κοπής ή η παρουσία ξένων σωμάτων (π.χ. άμμος) στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Μεγάλες γωνίες αποβλήτου ευνοούν αυτό το είδος φθοράς, το οποίο μπορεί να εμφανιστεί πιο εύκολα αν προϋπάρχει εκτεταμένη φθορά κρατήρα. Αν θέλουμε να αντιμετωπίσουμε αυτά τα φαινόμενα, προτιμούμε υλικά ΚΕ με καλύτερη αντίσταση στη θερμότητα και στα κρουστικά φορτία.

Η πλαστική παραμόρφωση της ακής του ΚΕ (6) συμβαίνει εξαιτίας της απώλειας της σκληρότητάς του. Αυτή συμβαίνει για εργαλεία που δεν έχουν καλή συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με άλλα που έχουν είτε μεγαλύτερο πάχος, είτε επικαλύψεις που τα ενισχύουν απέναντι σε αυτά τα θερμικά φαινόμενα.

Ακόμη, μπορούν να συμβούν και φθορές λόγω οξείδωσης, οι οποίες εναποθέτουν οξείδια στις επιφάνειες του ΚΕ και λόγω της μικρής τους συνεκτικότητας συμπαρασύρονται μαζί με κομμάτια του. Σε πολύ δυσμενείς συνθήκες, η οξείδωση μπορεί να προκαλέσει ακόμα και θραύση της κόψης.

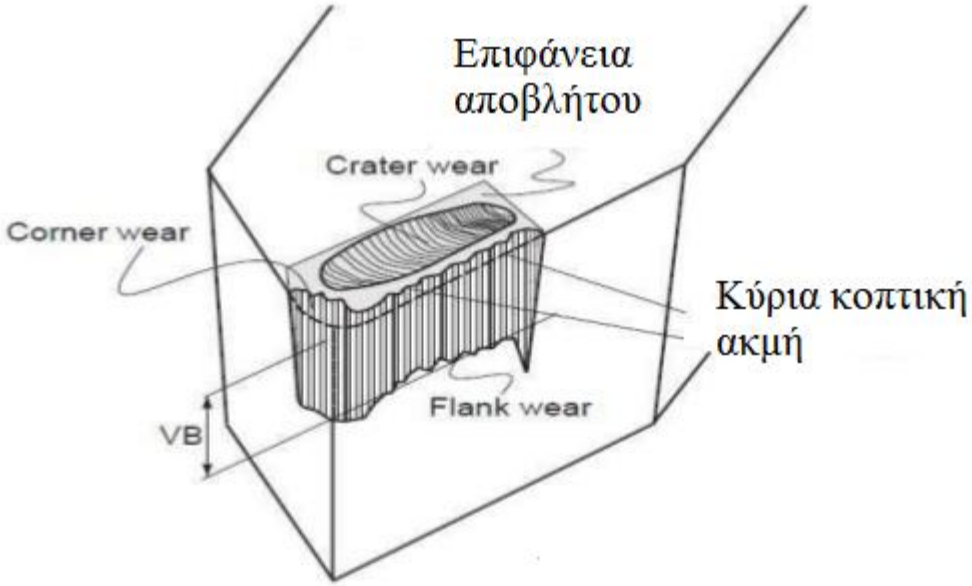
Οι δύο πιο σημαντικοί τύποι φθοράς είναι η φθορά κρατήρα και η ανάπτυξη πεδίου φθοράς. Η ανάλυση της τελευταίας περίπτωσης θα γίνει πιο λεπτομερώς, καθότι έχει σημασία για την παρούσα εργασία. Επομένως, τώρα θα παρουσιάσουμε τη φθορά κρατήρα.

Φθορά κρατήρα

Η φθορά κρατήρα δημιουργείται καθώς το απόβλητο κινείται στην επιφάνεια ΚΕ και αποβλήτου. Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται, αυξάνουν τη θερμοκρασία και έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κρατήρα, συνήθως παράλληλου με την κύρια κόψη του ΚΕ. Παρότι, ο κρατήρας ενδέχεται να αυξήσει τη γωνία αποβλήτου και να

μειώσει τις δυνάμεις κοπής, εξασθενεί την κόψη του ΚΕ αφού τις ίδιες φορτίσεις πρέπει να λάβει, μετά τη φθορά, μικρότερη επιφάνεια.

Επίσης, η χημική συγγένεια (chemical affinity) ανάμεσα στο υλικό του αποβλήτου και του ΚΕ, τους επιτρέπει να σχηματίζουν χημικούς δεσμούς και να αντιδρούν μεταξύ τους. Το φαινόμενο αυτό, περιγράφεται με τη βοήθεια του μηχανισμού διάχυσης, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο άτομα του υλικού του αποβλήτου εισέρχονται στο χώρο των ατόμων του κοπτικού εργαλείου και αντίστροφα. Το φαινόμενο επηρεάζεται δυσμενώς από την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς, το μεγαλύτερο μέγεθος κρατήρα παρουσιάζεται σε εκείνο το σημείο όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη, πρακτικά περίπου στη μέση της επιφάνειας επαφής ΚΕ και αποβλήτου. Το δε φαινόμενο επιτείνεται από το γεγονός ότι το απόβλητο συνεχώς απομακρύνεται συμπαρασύροντας άτομα του ΚΕ.

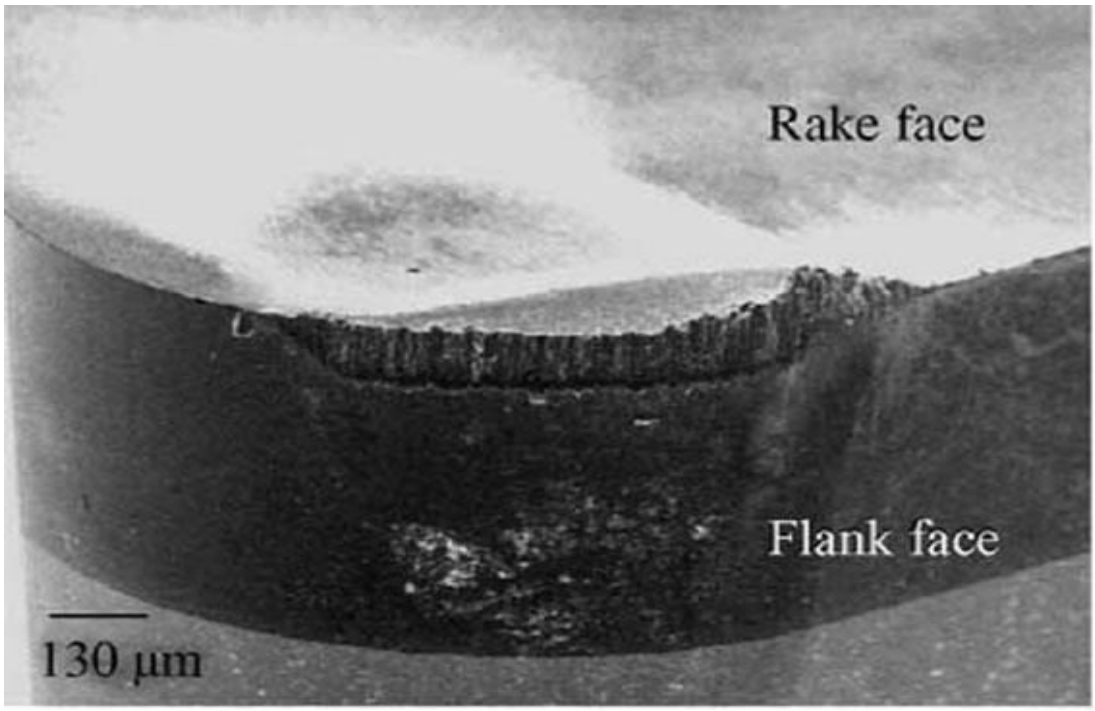


Σχήμα 1.13 Φθορά κρατήρα που συνυπάρχει με πεδίο φθοράς

Πεδίο φθοράς

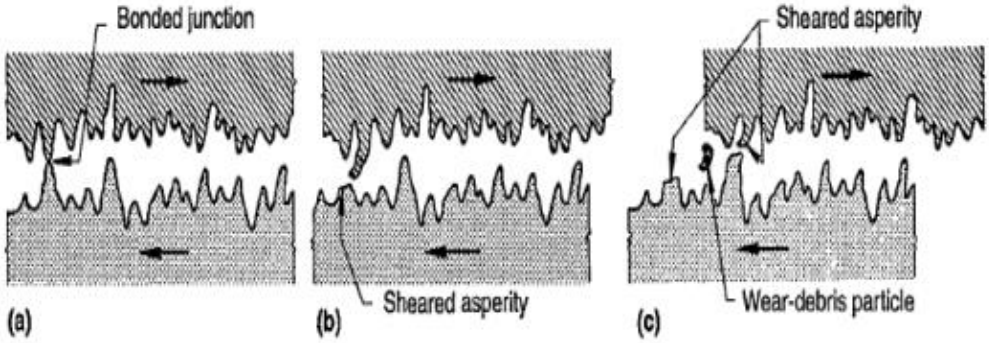
Το πεδίο φθοράς (flank wear) εμφανίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια ΚΕ και στο τεμάχιο εξαιτίας της τριβής. Έτσι, δημιουργείται μία περιοχή φθοράς η οποία μπορεί να μετρηθεί αν διακόψουμε την κοπή. Το πλάτος του πεδίου που δημιουργείται, είναι, συνήθως, κριτήριο για την αντικατάσταση ενός ΚΕ. Το φαινόμενο εξελίσσεται γρήγορα αρχικά, στη συνέχεια σταθεροποιείται και επιταχύνεται ραγδαία όσο πλησιάζουμε στα όρια της διάρκειας ζωής του ΚΕ. Όταν

εξελίσσεται το πεδίο φθοράς, η διαστατική ακρίβεια της κατεργασίας μειώνεται, η ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας μειώνεται και η θερμοκρασία της κοπής αυξάνεται. Γι' αυτό, είναι ανεπιθύμητη.



Σχήμα 1.14 Flank wear

Οι μηχανισμοί που προκαλούν το πεδίο φθοράς είναι αυτοί της απόξεσης (abrasive wear) και της προσκόλλησης (adhesive wear). Ο πρώτος μηχανισμός μπορεί να αναφέρεται και σαν φθορά λόγω τριβής, Κατά το μηχανισμό αυτό, σκληρά μόρια του κατεργασμένου τεμαχίου κυλούν επάνω στην επιφάνεια του ΚΕ και το κόβουν. Το φαινόμενο συνοδεύεται από ανάπτυξη μεγάλων ποσών θερμότητας.



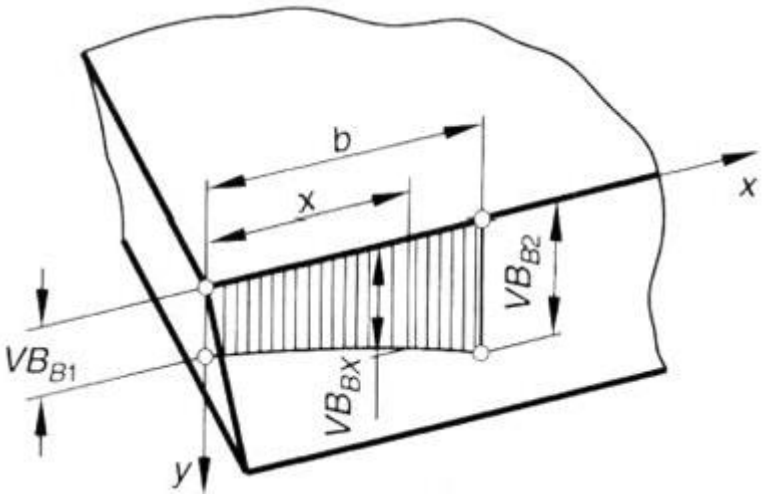
Σχήμα 1.15 Φθορά λόγω προσκόλλησης

Η φθορά λόγω προσκόλλησης, χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο της μικροσυγκόλλησης. Όταν η κορυφή της μιας επιφάνειας έρθει σε επαφή με μια κορυφή της συνεργαζόμενης επιφάνειας, τότε είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια

μικροσυγκόλληση (microwelding) αυτών, λόγω της θερμότητας που παράγεται από την τριβή (a). Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να δημιουργηθεί στη μια επιφάνεια κορυφή μικρότερου ύψους και στην άλλη επιφάνεια κορυφή μεγαλύτερου από το κανονικό ύψος (b). Καθώς οι δύο επιφάνειες συνεχίζουν να κινούνται η μία πάνω στην άλλη, η κορυφή με το μεγαλύτερο ύψος μπορεί να συγκρουστεί με μια νέα κορυφή της άλλης επιφάνειας με αποτέλεσμα νέα συγκόλληση ή θραύση και αφαίρεση μέρους αυτής (c). Έτσι, έχουμε τελικά ένα μηχανισμό όπου σχηματίζονται συγκολλητοί δεσμοί οι οποίοι στη συνέχεια λύονται, με αποτέλεσμα τη φθορά του ΚΕ.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι η διεπιφάνεια μεταξύ δύο επιφανειών, οι οποίες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, το οποίο αποτελείται από τις δύο μεταλλικές επιφάνειες και (συνήθως) ένα λιπαντικό με τα κατάλληλα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά, τα οποία εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Βέβαια, πλέον αναπτύσσονται ΚΕ που δε χρειάζονται την παρουσία λιπαντικού για περιβαλλοντικούς και άλλους λόγους που αναφέρθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται και με τους όρους scoring, scuffing, galling και seizing.

Το πλάτος του πεδίου φθοράς, επιλέγεται πολλές φορές ως κριτήριο για να θεωρήσουμε ότι ένα ΚΕ έχει φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής του. Τη μέτρησή του μπορούμε να διεξάγουμε διακόπτοντας την κατεργασία και μετρώντας την αντίστοιχη διάσταση με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Στο πειραματικός μέρος της παρούσας εργασίας, θα δούμε ότι ως κριτήριο για την αλλαγή του ΚΕ που θα χρησιμοποιηθεί, επιλέγεται πλάτος πεδίου φθοράς ίσο με 0,4mm.



Σχήμα 1.16 Μέτρηση πλάτους πεδίου φθοράς

1.3.3 Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου (tool life)

Η διάρκεια ζωής του ΚΕ, που συνήθως μετριέται σε min, είναι μία σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό μίας κατεργασίας. Εργαλεία που φθείρονται γρήγορα,

δεν είναι μόνο ασύμφορα οικονομικά αλλά επηρεάζουν δυσμενώς την επιφάνεια που παράγεται κατά την κοπή. Εναλλακτικά, μπορεί να συναντήσει κανείς το μήκος κοπής, το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο παρά η διάρκεια ζωής του ΚΕ πολλαπλασιασμένη επί την ταχύτητα κοπής, και εκφράζει το μήκος του τεμαχίου που μπορεί να κόψει το ΚΕ προτού χρειαστεί αντικατάστασή του (ή επανατροχισμός της ακής του αν έχουμε ΚΕ από ταχυχάλυβα).

Τα κριτήρια για να θεωρήσουμε ότι ένα ΚΕ έφτασε στο τέλος της διάρκειας ζωής του ποικίλουν. Είναι είτε άμεσα, όπως η μέτρηση του βάθους φθοράς κρατήρα ή του πλάτους του πεδίου φθοράς, είτε παρατηρούμενη (π.χ. ολική θραύση της κόψης του ΚΕ), είτε έμμεσα. Τα έμμεσα κριτήρια περιλαμβάνουν παραμέτρους της κοπής, όπως η τραχύτητας της επιφάνειας που παράγεται, η μεταβολη των δυνάμεων κοπής και οι γεωμετρικές ανοχές του παραγόμενου τεμαχίου.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ΚΕ, ο Taylor πρότεινε μία σχέση η οποία λάμβανε υπόψη της μόνο την ταχύτητα κοπής, η οποία ομολογουμένως επηρεάζει περισσότερο από άλλες παραμέτρους τη διάρκεια ζωής. Η σχέση έχει τη μορφή:

$$V_c \cdot T^n = C$$

όπου Vc είναι η ταχύτητα κοπής, T η διάρκεια ζωής και n και C σταθερές που εξαρτώνται από τα υλικά του τεμαχίου και του ΚΕ. Η εξίσωση αυτή ισχύει ικανοποιητικά για απλούς ανθρακούχους χάλυβες με μικρά βάθη κοπής και προώσεις.

Έτσι, γεννήθηκε η ανάγκη για μία νέα εξίσωση, που θα λαμβάνει υπόψη του και την πρόωση και το βάθος κοπής της κατεργασίας. Ο Taylor, γενικεύοντας τα πειράματά του, κατέληξε στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathrm{T} = \frac{K}{V_c^{1/n_1} f^{1/n_2} a_p^{1/n_3}}$$

όπου f είναι η πρόωση, a_p το βάθος κοπής και K σταθερά. Οι συντελεστές n_1, n_2, n_3 εξαρτώνται τόσο από τα υλικά της κατεργασίας όσο και από τις μεταξύ τους τιμές.

Αξίζει γενικά να σημειώσουμε, ότι για να διατηρήσουμε τη διάρκεια ζωής ενός ΚΕ σταθερή, αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής, πρέπει να μειώσουμε την πρόωση και το βάθος κοπής. Αντίστροφα, μειώνοντας την ταχύτητα κοπής, οδηγούμαστε σε μεγαλύτερη αποβολή υλικού, αφού πρέπει να αυξήσουμε το βάθος κοπής και την πρόωση.

Άλλες εξισώσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία είναι οι εξής:

$$Wu: \ T = \frac{C_{T1}}{V_C^{C_{T2}+C_{T3}V_c}}$$

$$Granovski: \ T = C_{T1} V_C^{C_{T2}} C_{T3}^{C_{T4}V_C}$$

$$Safonov: \ T = \frac{C_{T1}}{C_{T2}^{C_{T3}V_c}}$$

$$Kronenberg: \ \frac{C_{T1}}{(V_c + C_{T2})^{C_{T3}}}$$

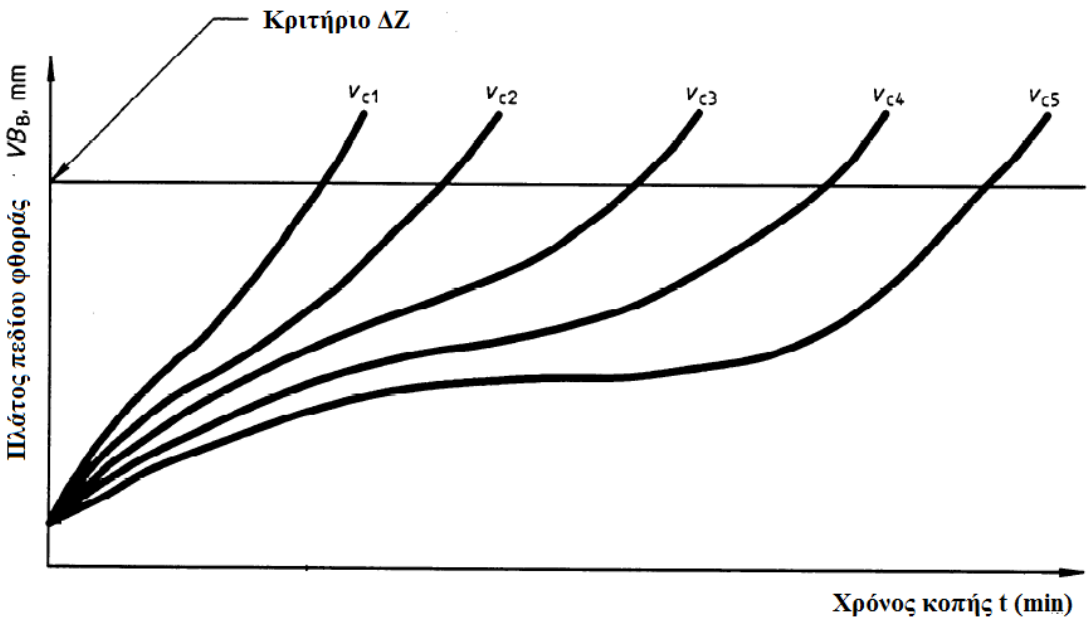
$$Konig - Depiereaux: \ T = C_{T1}^{C_{T2}V_C^{C_{T3}}}$$

$$Temchin: \ T = \frac{C_{T1}}{V_C^{C_{T2}} + C_{T3}}$$

$$Metchisen: \ T = \frac{V_C}{C_{T1}V_C^2 + C_{T2}V_C + C_{T3}}$$

$$Bali: \ T = \frac{C_{T1}V_C}{V_C^{C_{T2}} + V_{T1}}$$

όπου οι συντελεστές C_{T1}, C_{T2}, C_{T3} εξαρτώνται από τις παραμέτρους της κοπής και τα υλικά ΚΕ και τεμαχίου.

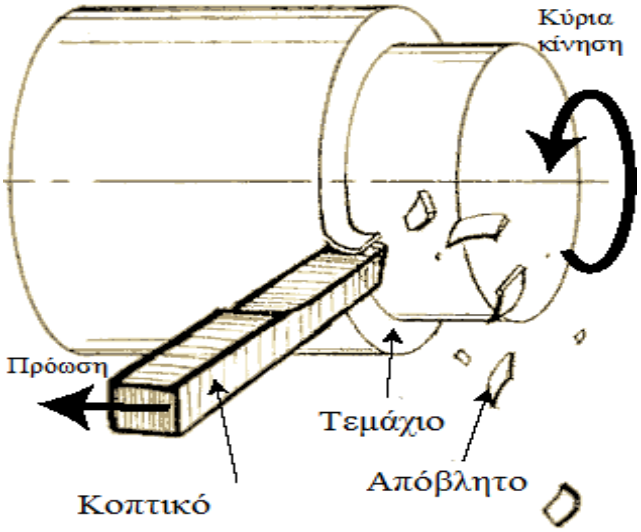


Σχήμα 1.17 Καμπύλες διάρκεια ζωής (ΔΖ) ΚΕ

Είναι φανερό από τις παραπάνω σχέσεις, ότι έχουν εφαρμογή σε ένα στενό εύρος ταχυτήτων κοπής. Επίσης, έχουν ένα ή κανένα ακρότατο ενώ οι αντίστοιχοι συντελεστές έχουν υπολογιστεί για συγκεκριμένες συνθήκες πρόωσης και κοπής, επομένως η χρήση τους δεν μπορεί να γενικευθεί. Η σημασία αυτού του γεγονότος θα φανεί στο πειραματικό μέρος, όταν και θα μελετηθούν καμπύλες διάρκειας ζωής ΚΕ με 2 τοπικά ακρότατα, συναρτήσει της ταχύτητας κοπής. Πρακτικά πειράματα έχουν δείξει ότι τέτοιες καμπύλες είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα ενώ οι καμπύλες κοπής που παίρνουμε από τη σχέση του Taylor και άλλες, μας δίνουν για κάθε ταχύτητα κοπής, τη διάρκεια ζωής του ΚΕ σε συνάρτηση με το πεδίο φθοράς.

1.4 Η τόρνευση (turning)

Η τόρνευση είναι μία κατεργασία κοπής που θα μας απασχολήσει στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας. Πρόκειται περί κατεργασίας κοπής, η κύρια κίνηση της οποίας είναι η περιστροφική της ατράκτου της εργαλειομηχανής, στην οποία είναι προσδεμένο το τεμάχιο προς κατεργασία. Δευτερευόντως, το κοπτικό εργαλείο μεταφέρεται (πρόωση) και κατεργάζεται το τεμάχιο. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι καθορισμένης γεωμετρίας και η επαφή ανάμεσα στο εργαλείο και στο τεμάχιο είναι απλή και σημειακή.

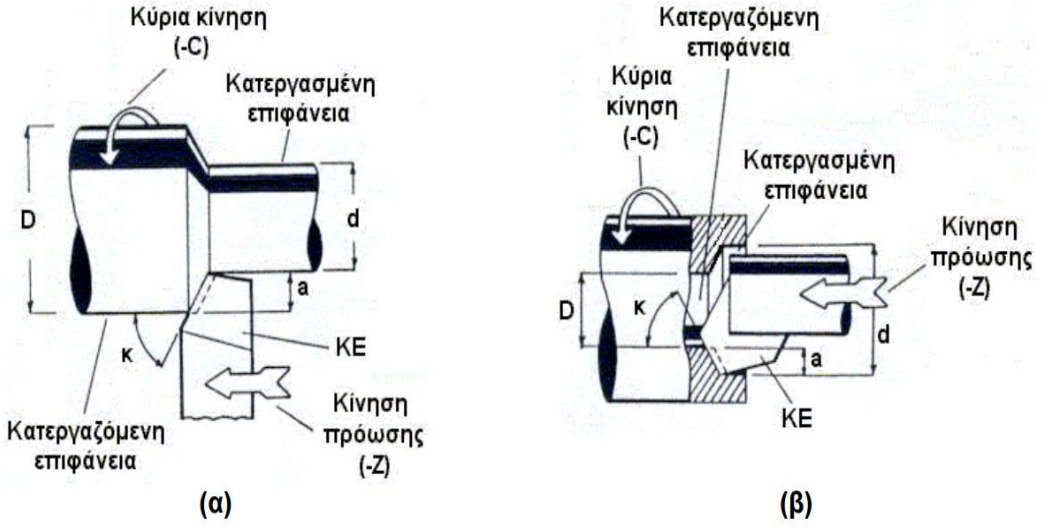


Σχήμα 1.18 Η κατεργασία της τόρνευσης

Αν θελήσουμε να ταξινομήσουμε τα διάφορα είδη τόρνευσης, υπάρχουν πολλοί τρόποι για να το κάνουμε. Για παράδειγμα, αν ο άξονας τόρνευσης είναι οριζόντιος τότε η τόρνευση ονομάζεται οριζόντια. Αντίστοιχα, αν ο άξονας της τόρνευσης είναι κατακόρυφος, τότε η τόρνευση ονομάζεται κατακόρυφη.

Ένας άλλος διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Έτσι, αν το κοπτικό εργαλείο κατεργάζεται μία επιφάνεια εξωτερικά, τότε

έχουμε εξωτερική τόρνευση. Αντίθετα, αν η κατεργασία γίνεται στο εσωτερικό της επιφάνειας του τεμαχίου, τότε η τόρνευση είναι εσωτερική (internal turning ή boring).



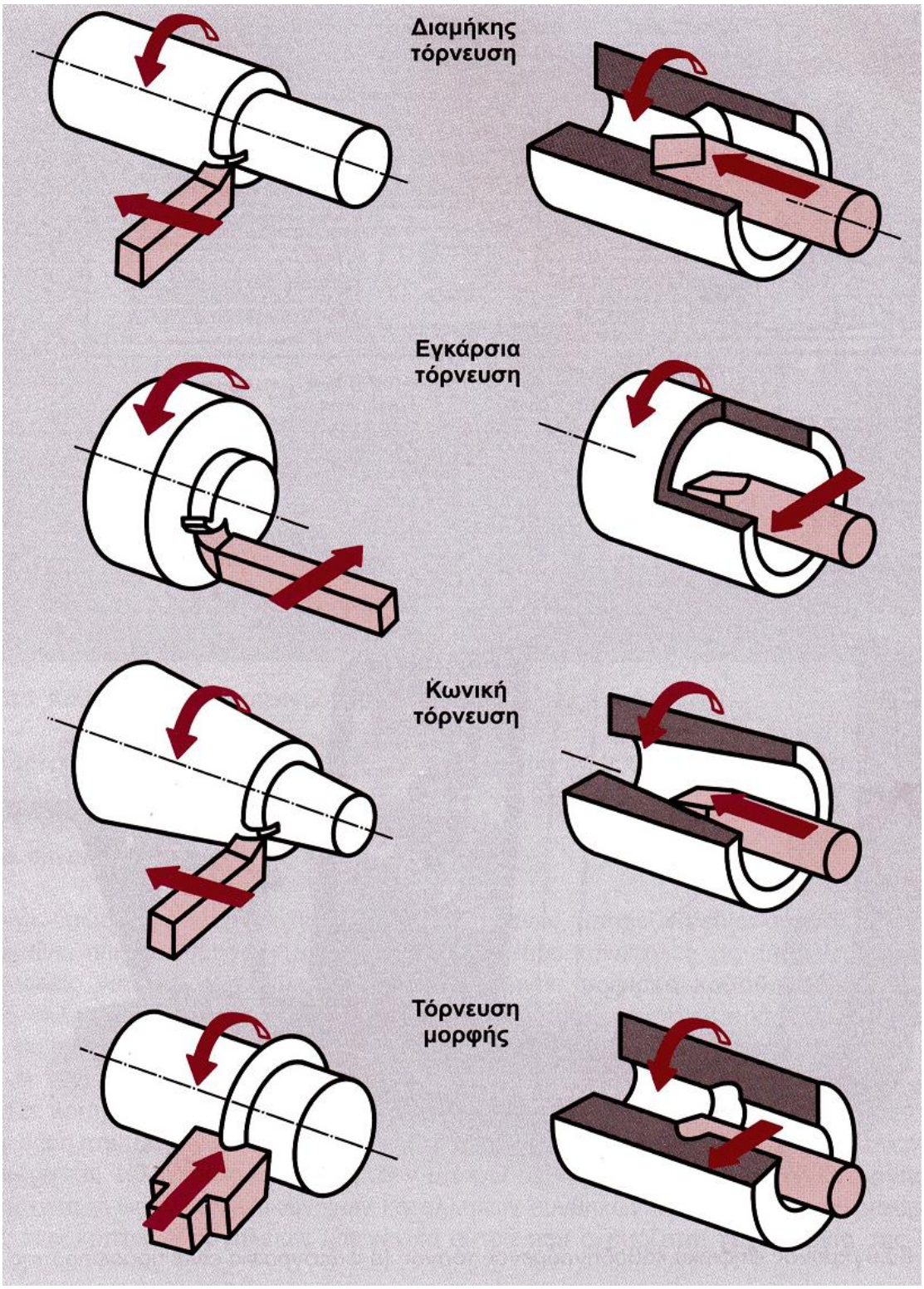
Σχήμα 1.19: Διαμήκης, εξωτερική (α) και εσωτερική τόρνευση (β). Εκτός από τις κινήσεις της κατεργασίας φαίνεται και η γωνία τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου (κ).

Η εσωτερική τόρνευση, παράγει κυλινδρικά εσωτερικά προφίλ, σε τεμάχια τα οποία έχουν ήδη οπή η οποία έχει δημιουργηθεί από άλλη κατεργασία (π.χ. διάτρηση). Παρότι, η εσωτερική τόρνευση διεξάγεται γενικά στον τόρνο (lathe), υπάρχουν και φρέζες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ίδιο τύπο κατεργασίας αλλά μεγαλύτερα τεμάχια.

Ακόμη, ανάλογα με τη σχέση που έχει η κύρια και η δευτερεύουσα κίνηση της τόρνευσης, διακρίνουμε:

- Τη διαμήκη τόρνευση, όπου η πρόωση είναι παράλληλη στον άξονα της τόρνευσης.
- Την εγκάρσια τόρνευση, όπου η πρόωση είναι κάθετη στον άξονα της τόρνευσης. Η εγκάρσια τόρνευση, μπορεί να είναι είτε μετωπική, είτε ακτινική ανάλογα με τη διεύθυνση της κίνησης πρόωσης. Η ακτινική τόρνευση, με τη σειρά της, μπορεί να είναι τόρνευση αποκοπής ή τόρνευση μορφής
- Την κωνική τόρνευση, στην οποία ο άξονας της διεύθυνσης της πρόωσης, τέμνει τον άξονα της τόρνευσης.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται τα είδη τόρνευσης που αναφέρθηκαν αμέσως παραπάνω. Σε αυτά, διακρίνουμε, το τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο, και τα βέλη που υποδεικνύουν την κίνησή τους:



Σχήμα 1.20 Διάφορα είδη τόρνευσης

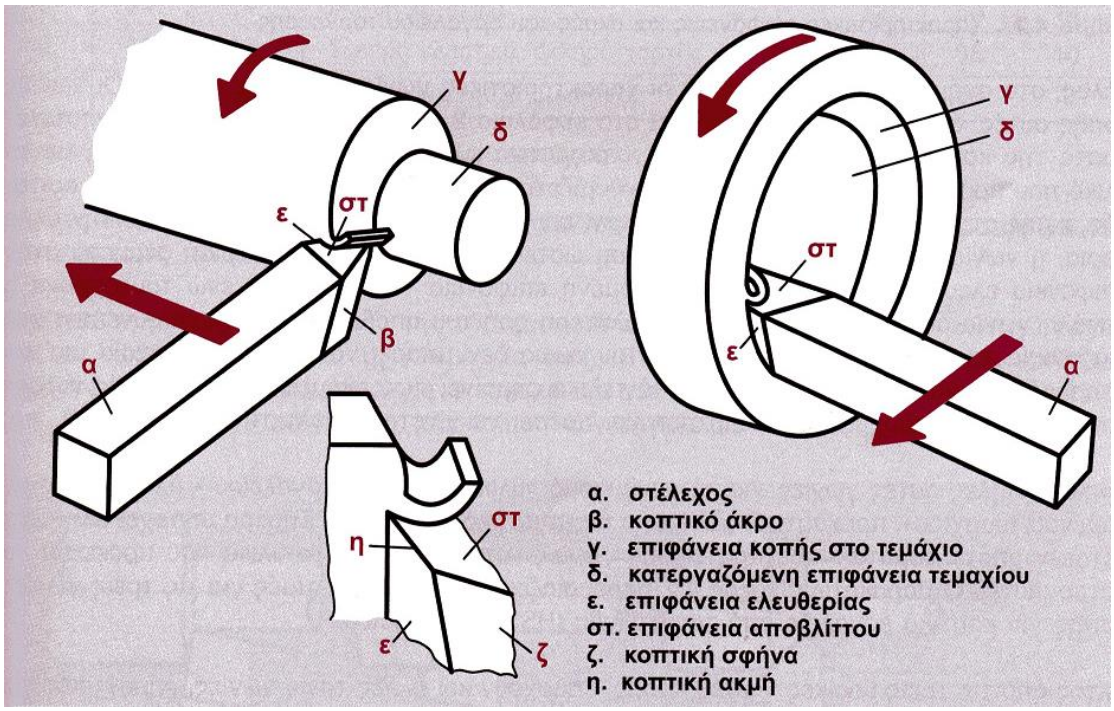
1.4.1 Τα κοπτικά εργαλεία της τόρνευσης

Στην τόρνευση, χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα, ταχυχάλυβα, σκληρομέταλλο ή κεραμικά υλικά. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, θα δούμε ότι θα εξετάσουμε κατεργασίες εσωτερικής τόρνευσης στις οποίες το κοπτικό εργαλείο είναι από κυβικό βοριονιτρίτη.

Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα κοπτικό εργαλείο, δε διαφέρουν σε αυτή την κατεργασία. Έτσι, το κοπτικό εργαλείο πρέπει:

- Να έχει μεγάλη σκληρότητα για να μπορεί να εισχωρήσει και να κατεργαστεί το τεμάχιο. Διαφορετικά, θα συνέβαινε το αντίστροφο.
- Να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, ώστε να μη μειώνεται η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας που παράγεται με την πάροδο του χρόνου.
- Να αντιστέκεται στη θερμότητα που αναπτύσσεται στην κοπή. Καθ' όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα των υγρών κοπής, είναι απαραίτητο να μπορεί να γίνει απρόσκοπτα η τόρνευση παρά τα μεγάλα ποσά θερμότητας που εκλύονται. Επίσης, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να μπορεί να διατηρήσει την σκληρότητά του και στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή.

Η βασική γεωμετρία ενός κοπτικού εργαλείου σε μία κατεργασία κοπής έχει ήδη παρουσιαστεί στο *σχήμα 1.5*. Εδώ, για μία πιο εξειδικευμένη εποπτεία της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου, θα αναφερθούμε συγκεκριμένα στην ανάλυση που αφορά την τόρνευση.

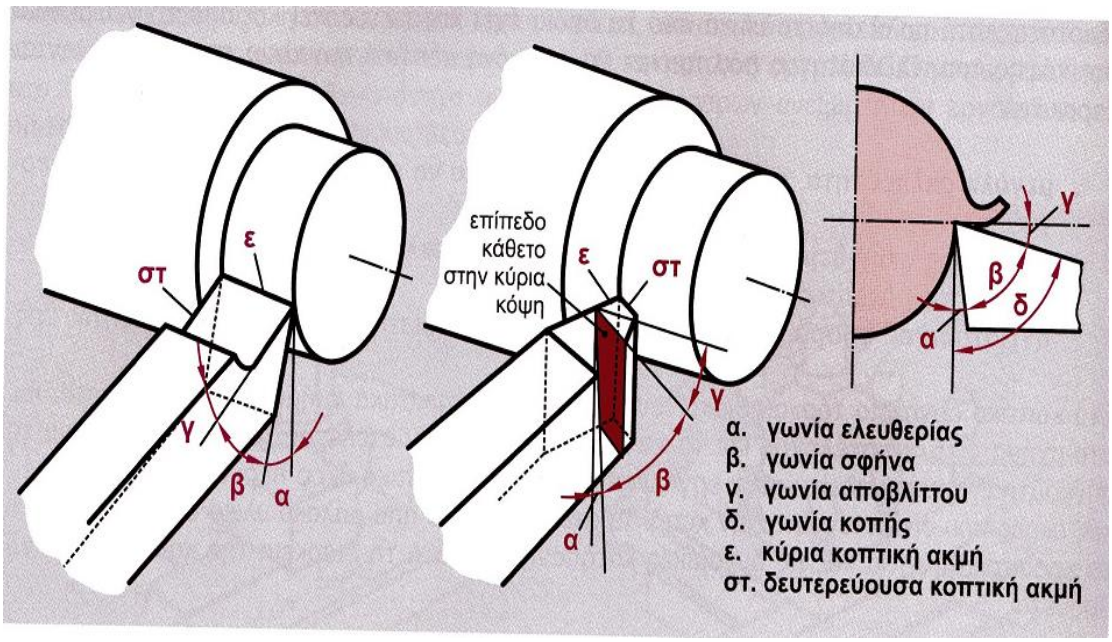


Σχήμα 1.21 Το ΚΕ στην τόρνευση

Τα δύο κύρια τμήματα του κοπτικού εργαλείου είναι το στέλεχος (α) και το κοπτικό άκρο (β). Το στέλεχος, απαιτείται για την συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέτη του τόρνου, ενώ το κοπτικό άκρο περιλαμβάνει τις κοπές που συμμετέχουν στην κοπή. Το στέλεχος είναι από μαλακότερο υλικό ώστε να δέχεται τις δυναμικές καταπονήσεις και τα κρουστικά φορτία που αναπτύσσονται χωρίς να καταστρέφεται. Στο ίδιο σχήμα, βλέπουμε την επιφάνεια του αποβλήτου (στ), που είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία ρέει το απόβλητο. Επίσης, παρατηρούμε την επιφάνεια ελευθερίας που είναι η απέναντι επιφάνεια από την κατεργαζόμενη επιφάνεια του τεμαχίου (δ).

Αν θέλουμε να παρατηρήσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου, έχουμε τα εξής, γνωστά από προηγουμένως:

- Τη γωνία ελευθερίας α
- Τη γωνία σφήνας β
- Τη γωνία αποβλήτου γ



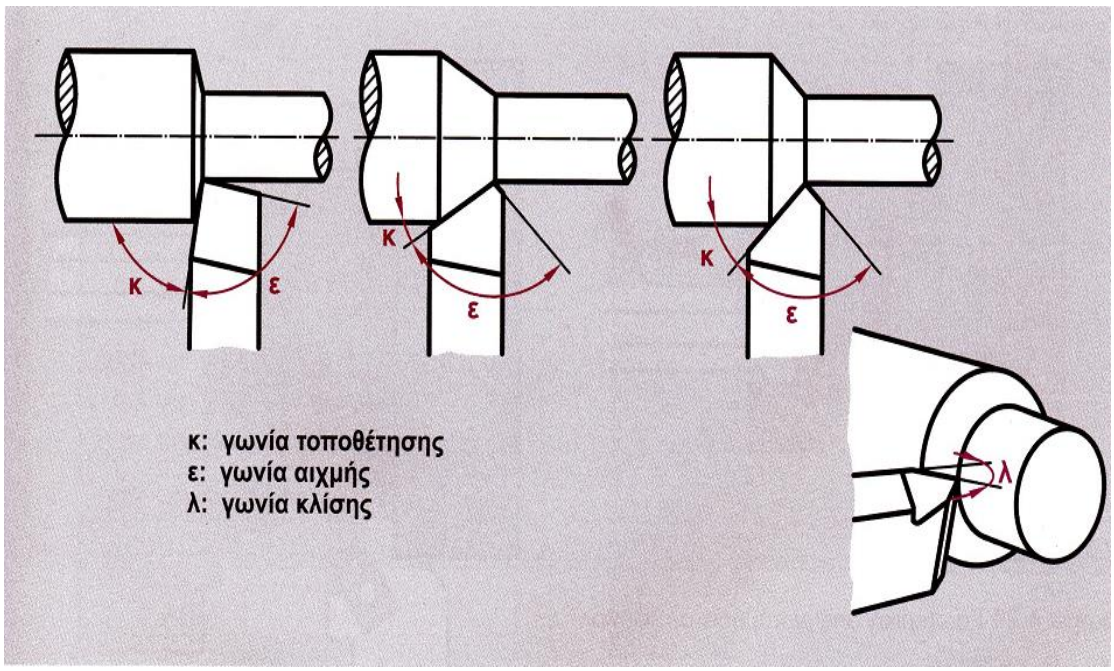
Σχήμα 1.22 Γεωμετρία του ΚΕ στην τόρνευση

Οι γωνίες αυτές, επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της κατεργασμένης επιφάνειας και επιλέγονται ανάλογα με το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Για παράδειγμα, για εργαλείο από ταχυχάλυβα και τόρνευση κραμάτων μαγνησίου, τυπικές τιμές είναι $\alpha=8^o$, $\beta=76^o$ και $\gamma=6^o$. Σημειώνεται ότι, η μεγάλη γωνία σφήνας επιλέγεται γενικά για να αποφευχθεί η θραύση της κοπτικής ακμής του εργαλείου κατά την κατεργασία σκληρών υλικών. Από την άλλη, μεγάλη γωνίας ελευθερίας, μάς επιτρέπει να μειώσουμε την τριβή που δημιουργείται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου και την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Ταυτόχρονα, μεγάλη γωνία αποβλήτου, επιτρέπει στο απόβλητο να ρέει απρόσκοπτα. Έχει αναφερθεί όμως προηγουμένως ότι οι γωνιές αυτές είναι συμπληρωματικές ($\alpha + \beta + \gamma = 90^o$). Επομένως, η επιλογή τους πρέπει να γίνει βέλτιστα και όχι με αυθαίρετο τρόπο. Οι γωνίες για συνήθεις

κατεργασίες τόρνευσης έχουν προκύψει τελικά μετά από πλήθος πειραμάτων και δίνονται σε πίνακες ώστε να επιλέγονται κατευθείαν.

Η ανάλυση αυτή, κρίθηκε αναγκαίο να αναφερθεί ειδικά για την τόρνευση, καθότι στην τελευταία εισάγονται τρεις νέες γωνίες κοπής, σημαντικές για την κατεργασία. Αυτές είναι:

- Η γωνία τοποθέτησης κ. Είναι η γωνία ανάμεσα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και την κύρια κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου. Μία μεγάλη τιμή της γωνίας κ, το πάχος του αποβλήτου μειώνεται, κάτι που γενικά είναι επιθυμητό, καθότι όπως έχουμε πει νωρίτερα, δεν επιθυμούμε να απορρίπτουμε υλικό. Από την άλλη, σε αυτή την περίπτωση, η φόρτιση που δέχεται το εργαλείο κατανέμεται σε ένα πολύ μικρό χώρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της φθορά τους και τη μείωση του χρόνου ζωής του. Έτσι, τελικά, μία τυπική τιμή για τη γωνία αυτή είναι οι 45°.
- Η γωνία αιχμής ε. Είναι η γωνία ανάμεσα στην κύρια και στη δευτερεύουσα κοπτική ακμή του εργαλείου. Εργαλεία με μικρή γωνία αιχμής, γίνεται πολύ αιχμηρά σε σύντομο χρονικό διάστημα. Γι' αυτό συνήθως κυμαίνεται γύρω στις 90°.
- Η γωνία κλίσης λ. Η γωνία αυτή ορίζει τη θέση της κοπτικής ακμής ως προς την οριζόντια θέση. Έτσι, το εργαλείο μπορεί να τοποθετηθεί είτε οριζόντια είτε με κλίση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της εκχόνδρισης, έχει προκύψει γωνία λ μεταξύ 3° και 5° καθότι έτσι το απόβλητο ρέει πιο εύκολα.



Σχήμα 1.23 Επιπλέον παράμετροι στην τόρνευση

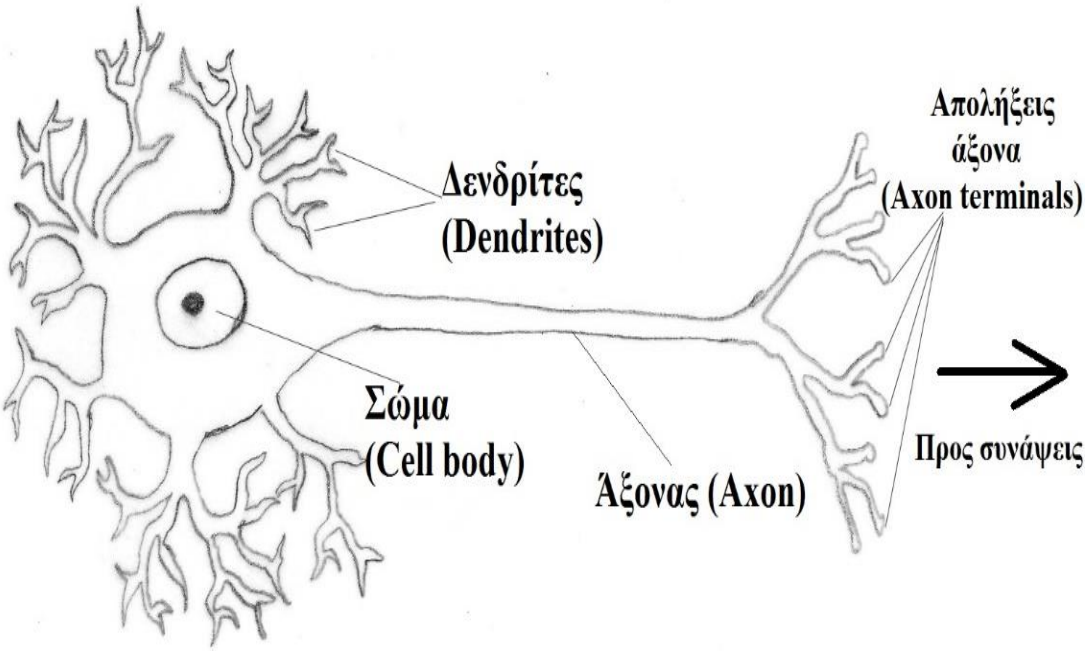
Κεφάλαιο 2
ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Εισαγωγή

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks - ANNs) είναι μοντέλα διάδοσης και επεξεργασίας πληροφοριών, εμπνευσμένα από τον τρόπο με τον οποίο ο ανθρώπινος εγκέφαλος επεξεργάζεται τις πληροφορίες που του είναι διαθέσιμες. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει την ικανότητα να πραγματοποιεί πολλούς παράλληλους και κατά κανόνα σύνθετους και μη γραμμικούς υπολογισμούς σε πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Έτσι, λαμβάνει υπόψη του πολλές πληροφορίες και οδηγείται σε σωστές αποφάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

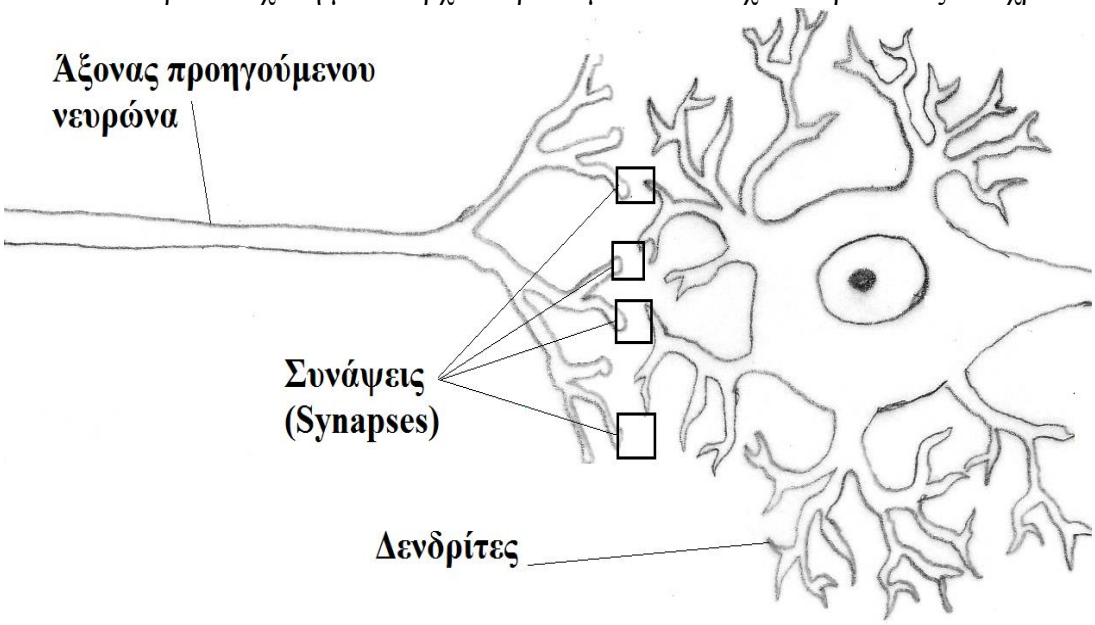
Γενικά, το ανθρώπινο νευρικό σύστημα λειτουργεί σε τρία επίπεδα. Αρχικά, οι δέκτες (receptors) δέχονται ερεθίσματα από το περιβάλλον και αφού τα μετατρέψουν σε ηλεκτρικούς παλμούς τα στέλνουν στον εγκέφαλο, που αποτελεί το δεύτερο επίπεδο. Ο εγκέφαλος, επεξεργάζεται παράλληλα τις πολλές πληροφορίες που δέχεται (inputs) και παράγει με τη σειρά του ηλεκτρικούς παλμούς οι οποίοι μετατρέπονται σε αποκρίσεις του ανθρώπινου σώματος στο τρίτο επίπεδο του ανθρώπινου νευρικού συστήματος (effectors). Η επεξεργασία αυτή γίνεται σε κατάλληλα στοιχεία τα οποία ονομάζονται νευρώνες (neurons) και συνδέονται μεταξύ τους με συνάψεις.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από μερικά εκατομμύρια νευρώνων οι οποίοι παρότι λειτουργούν με σχετικά μικρή ταχύτητα μπορούν εκτελούν πολύπλοκους υπολογισμούς. Αυτό συμβαίνει διότι οι νευρώνες συνδέονται μεταξύ τους κατά χιλιάδες συνάψεις και έχουν την ικανότητα τόσο να δέχονται όσο και να εκπέμπουν σήματα σε παράλληλο χρόνο.



Σχήμα 2.1 Ο νευρώνας

Κάθε νευρώνας αποτελείται από το σώμα του (cell body), τον άξονά του (axon) και τους δενδρίτες του (dendrites). Οι δενδρίτες δέχονται τα σήματα από τους άλλους νευρώνες, τα οποία στη συνέχεια αθροίζονται και παράγουν το σήμα εξόδου. Μέσω του άξονα, το σήμα εξόδου μεταφέρεται με τη βοήθεια των απολήξεων του στις συνάψεις και από εκεί στους δενδρίτες των άλλων νευρώνων οι οποίοι με τη σειρά τους διαμορφώνουν το σήμα εξόδου του νευρώνα στον οποίο ανήκουν. Η μεγάλη σημασία αυτής της ανταλλαγής πληροφοριών, έγκειται στο γεγονός ότι η επίδραση κάθε σύναψης στο νευρώνα με τον οποίο συνδέεται αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, εκπαιδεύεται δηλαδή, ώστε τα σήματα που εκπέμπει τελικά να είναι καλύτερα σε σχέση με τα αρχικά ερεθίσματα που δέχεται προϊόντος του χρόνου.



Σχήμα 2.2 Οι συνάψεις

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs) αποτελούν τη μαθηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ένα πλήθος νευρώνων, δέχονται μια εισερχόμενη πληροφορία (input), εκτελούν μαθηματικούς υπολογισμούς (συνήθως μικρής πολυπλοκότητας) και μεταβιβάζουν το αποτέλεσμα σε άλλους νευρώνες με τους οποίους συνδέονται. Τελικά, στο τελευταίο επίπεδο νευρώνων, προκύπτει η τελική πληροφορία (output).

Κάθε τέτοιο δίκτυο, μπορεί να εκπαιδεύεται (training) με τη βοήθεια γνωστών συνόλων πληροφοριών εισόδου που αντιστοιχούν σε επίσης γνωστές τιμές εξόδου. Έτσι, μπορεί να προσαρμόζει την επιρροή κάθε νευρώνα στους υπόλοιπους με τους οποίους είναι συνδεδεμένος. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα, το δίκτυο να μπορεί να προβλέψει σωστές τιμές εξόδου δεδομένων τιμών εισόδου που δεν ήταν εξαρχής γνωστές. Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε ποικίλες εφαρμογές όπως η προσέγγιση συναρτήσεων (function approximation), η ομαδοποίηση δεδομένων (classification, clustering κ.α.), η αριθμητική ανάλυση με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, το φιλτράρισμα ανεπιθύμητων μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου κ.α. Το πλεονέκτημά τους έναντι του συμβατικού προγραμματισμού είναι εμφανές, λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα των ANNs στο να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους στα εισαγόμενα δεδομένα που δέχονται και να παρουσιάζουν,

έτσι, βέλτιστη συμπεριφορά. Η δε ταχύτητα των υπολογισμών είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που επιτυγχάνουμε συμβατικές τεχνικές προγραμματισμού, αφού οι υπολογισμοί σε κάθε επίπεδο νευρώνων (layer) εκτελούνται παράλληλα (parallel computing) και όχι διαδοχικά (sequentially).

2.2 Ιστορικό

Οι πρώτες προσπάθειες προσομοίωσης έγιναν από τους Warren McCullogh και Walter Pitts (1943). Εκείνοι ανέπτυξαν υπολογιστικά μοντέλα του ανθρώπινου νευρικού συστήματος βασιζόμενοι στη λογική των ορίων (threshold logic). Κάθε νευρώνας μπορούσε να λειτουργεί δυαδικά, με καθορισμένα όρια (thresholds). Έτσι, εξομοιώθηκαν απλές λειτουργίες όπως αυτές μιας λογική πύλης AND ή OR.

Στο τέλος της δεκαετίας του ’40, ο ψυχολόγος Donald Hebb δημιούργησε τη δική του θεωρία για το πώς λειτουργούν οι συνάψεις του εγκεφάλου, η οποία ονομάστηκε θεωρία του Hebb. Η θεωρία αυτή αποτέλεσε τη βάση της μελλοντικής θεωρίας μη επιτηρούμενης εκμάθησης (unsupervised learning) και χρησιμοποιήθηκε την εποχή που αναπτύχθηκε σε μηχανές Turing. Αργότερα, οι Farley και Clark προσπάθησαν να προσομοιώσουν ένα δίκτυο βασισμένο στη θεωρία του Hebb στο πανεπιστήμιο του MIT χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή. Άλλες ομάδες που εργάστηκαν στον τομέα των νευρωνικών δικτύων ήταν οι Rochester και Holland και οι Haibit και Duda.

Το 1958, ο Rosenblatt δημιούργησε το Perceptron, το οποίο αποτελεί έναν πρώτο αλγόριθμο για προβλήματα αναγνώρισης προτύπου (pattern recognition). Επρόκειτο για ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο τριών επιπέδων που ήταν ικανό να συσχετίσει μια δεδομένη είσοδο με μία τυχαία έξοδο.

Στο πανεπιστήμιο του Stanford, το 1960 δημιουργήθηκε το ADALINE (ADAptive Linear Element). Επρόκειτο για μια αναλογική συσκευή που χρησιμοποιούσε για την εκπαίδευση έναν κανόνα του ελάχιστου μέσου τετραγώνου (least mean square error). Το σύστημα αυτό ανέπτυξαν οι Widrow και Hoff.

Το 1969, οι Minsky και Papert δημοσίευσαν μία έρευνα στην οποία τόνιζαν δύο προβλήματα των Perceptrons. Καταρχάς, η υπολογιστική τους ισχύς δεν επαρκούσε για τη χρήση πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων, εξαιτίας του πολύ μεγάλου χρόνο που απαιτούνταν για όλους τους υπολογισμούς των νευρώνων. Ένα άλλο μειονέκτημα που αναφερόταν, ήταν η αδυναμία αυτών των συστημάτων να προσομοιώσουν τη λογική πύλη exclusive-OR. Αυτή η πύλη με δύο εισόδους 0 ή 1, δίνει στην έξοδό της αποτέλεσμα ένα όταν μόνο ένα από τα δύο inputs ισούται με 1. Από εκείνη την περίοδο και μέχρι να αναπτυχθούν συστήματα με σημαντική υπολογιστική ισχύ, η έρευνα σχετικά με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συρρικνώθηκε σημαντικά.

Ωστόσο, η πρόοδος δε σταμάτησε. Το 1972, ο Henry Klopf ανέπτυξε έναν τρόπο εκμάθησης με τεχνητούς νευρώνες που βασίζεται στην εταιρόσταση (heterostasis). Εταιρόσταση μπορεί να επιτευχθεί από οποιονδήποτε μηχανισμό ο

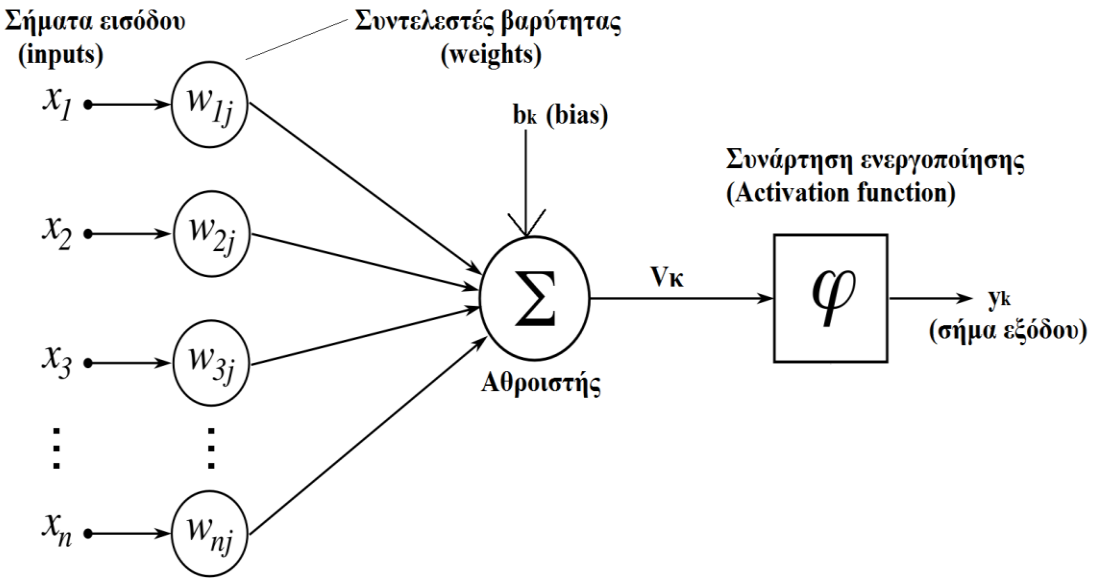
οποίος μπορεί να μένει σε μία στατική κατάσταση η οποία όμως μπορεί να αλλάζει (π.χ. θερμοστάτης κεντρικής θέρμανσης).

Η μεγάλη καινοτομία που επηρέασε σημαντικά τη χρήση ANNs έως σήμερα ήταν η μέθοδος εκμάθησης με οπισθόδρομη διάδοση. Η μέθοδος αυτή που αναπτύχθηκε από τον Werbos (1975) επέτρεψε την εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων πολλών επιπέδων αρκετά γρήγορα και χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σήμερα. Ουσιαστικά επρόκειτο για εξέλιξη του Perceptron με καλύτερο κανόνα εκμάθησης, πιο πολλά επίπεδα νευρώνων και διαφορετική συνάρτηση ενεργοποίησης στα ενδιάμεσα επίπεδα.

Τόσο η τεχνολογική πρόοδος όσο και η επιτυχής έρευνα σε εκείνα τα χρόνια, επανάφερε το ενδιαφέρον της ερευνητική κοινότητας στον τομέα της εκμάθησης μηχανής (machine learning) και των ANNs γενικότερα. Έτσι, σήμερα διδάσκονται μαθήματα και διεξάγονται έρευνες σε οποιονδήποτε τομέα ενέχει στοιχεία ανάλυσης δεδομένων, κάτι απαραίτητο αν λάβουμε υπόψη την υπολογιστική ισχύ και τον τεράστιο όγκο δεδομένων που είναι διαθέσιμα.

2.3 Ο νευρώνας

Ένας νευρώνας είναι μια μονάδα λήψης και επεξεργασίας πληροφοριών και αποτελεί το θεμελιώδες στοιχείο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.3,* ενώ η λειτουργία του θα αναλυθεί ευθύς αμέσως.



Σχήμα 2.3 Ο τεχνητός νευρώνας

Αυτός αποτελείται από ένα πλήθος συνάψεων (συνδετικών στοιχείων) κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή βαρύτητας. Πιο αναλυτικά, από τη σύναψη j εισέρχεται ένα σήμα x_j το οποίο αφού πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή βαρύτητας w_{kj} εισέρχεται στο νευρώνα k. Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται στο νευρώνα ενώ ο δεύτερος στο σήμα εισόδου. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι ενώ στον ανθρώπινο εγκέφαλο οι συντελεστές βαρύτητας έχουν μόνο θετικές τιμές, στους τεχνητούς νευρώνες οι δυνατές τιμές είναι πραγματικές.

Στη συνέχεια τα σήματα, αφού πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές βαρύτητας αθροίζονται με τη βοήθεια ενός αθροιστή. Στο άθροισμα συμμετέχει ένα ακόμα σήμα το οποίο ονομάζεται bias και το οποίο μεταβάλλει την καθολική επιρροή που έχουν τα σήματα x_j στο νευρώνα. Το bias, δηλαδή μεταβάλλει την τιμή που εισέρχεται στη συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα.

Η συνάρτηση ενεργοποίησης φ() είναι μια συνάρτηση που περιορίζει το εύρος του σήματος που δέχεται από τον αθροιστή προτού προκύψει το τελικό σήμα εξόδου y_k.

Είναι φανερό, ότι ισχύουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$u_k = \sum_{j=1}^{m} w_{kj} x_j$$

$$v_k = u_k + b_k$$

$$y_k = \varphi(v_k)$$

με τα σύμβολα να έχουν τη σημασία που περιεγράφηκε παραπάνω:

$\varphi(v_k)$: η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα k

y_k: το σήμα εξόδου του νευρώνα k

$x_1, x_2, \ldots, x_m$: τα σήματα εισόδου στον νευρώνα k

$w_{k1}, w_{k2}, \ldots, w_{km}$: οι συντελεστές βαρύτητας του νευρώνα k

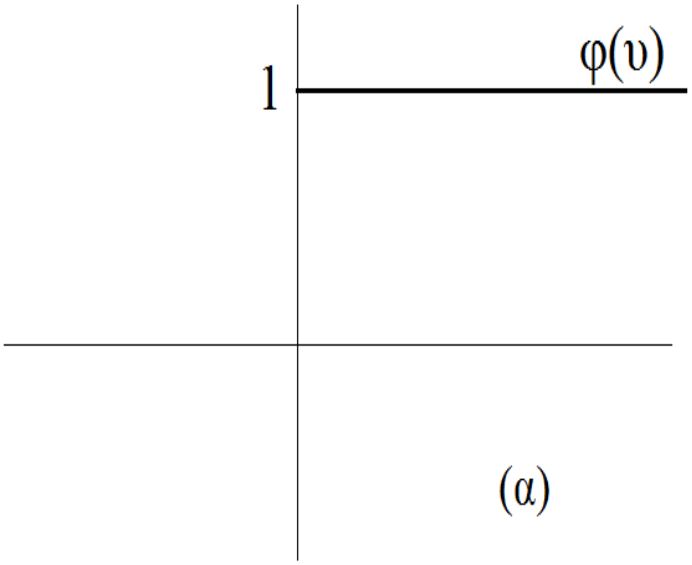
b_k: το bias του νευρώνα k

v_k: η δυναμική ενεργοποίηση ή προκληθέν τοπικό πεδίο του νευρώνα k

2.3.1 Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης φ(v) καθορίζει το σήμα εξόδου του νευρώνα k συναρτήσει της δυναμικής ενεργοποίησης v_k. Οι συνηθέστερες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στην πράξη παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Βηματική ή συνάρτηση Heaviside (α):



Σχήμα 2.4 Η βηματική συνάρτηση

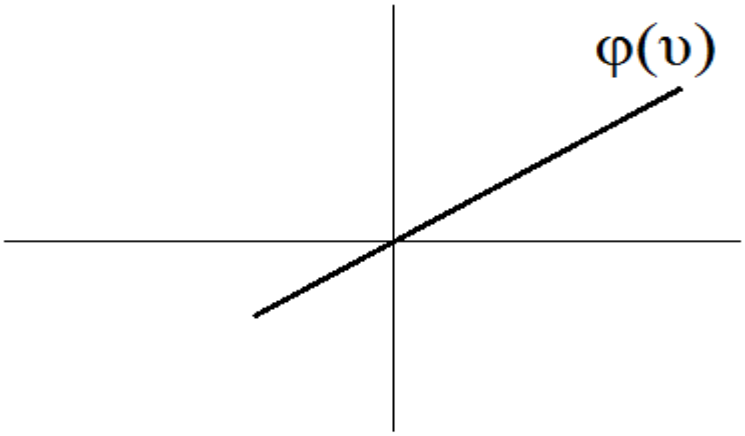
$$\varphi(v_k)=\begin{Bmatrix}1, & v_k>0\\ 0, & v_k<0\end{Bmatrix}$$

Φυσικά, το σήμα εξόδου που προκύπτει είναι:

$$y_k=\begin{Bmatrix}1, & v_k>0\\ 0, & v_k<0\end{Bmatrix}$$

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στην ταξινόμηση προτύπων (pattern recognition), δηλαδή στην αναγνώριση κοινών χαρακτηριστικών ανάμεσα σε πλήθος δεδομένων.

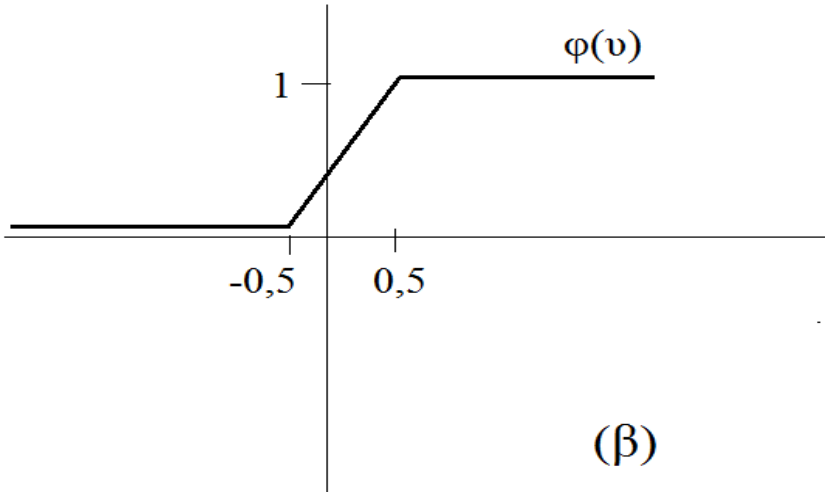
2. Γραμμική συνάρτηση:



$$\varphi(v_k)=v$$

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται όταν το πρόβλημα που μοντελοποιούμε έχει μάλλον γραμμική συμπεριφορά. Επίσης χρησιμοποιείται στο τελευταίο επίπεδο νευρώνων ενός ANN στην περίπτωση που δε θέλουμε η έξοδος μας να περιορίζεται στο πεδίο [-1,+1] στην περίπτωση που οι προηγούμενοι νευρώνες ενεργοποιούνται με τη σιγμοειδή συνάρτηση (sigmoid function).

3. Γραμμική συνάρτηση ξεχωριστών βημάτων (Rectified Linear Function – RELU) (β):



Σχήμα 2.6 Η συνάρτηση RELU

$$\varphi(v_k)=\begin{cases} 1, & v_k \geq 0.5 \\ v, & -0.5 < v_k < 0.5 \\ 0, & v_k \leq -0.5 \end{cases}$$

Αυτή η συνάρτηση προσπαθεί να προσομοιάσει τη συμπεριφορά ενός μη γραμμικού ενισχυτή. Αν δεν επέλθει κορεσμός τότε η συνάρτηση αυτή είναι απλώς γραμμική, ενώ αν η ενίσχυση μεγαλώσει πολύ εκφυλίζεται στη βηματική συνάρτηση.

4. Σιγμοειδής συνάρτηση:

$$\varphi(v_k) = \frac{1}{1+e^{-\alpha v_k}}$$

όπου ο συντελεστής α ονομάζεται παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης.

Πρόκειται για την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Μεταβάλλοντας το συντελεστή κλίσης α παρατηρούμε ότι η συνάρτηση αυτή λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Η συνάρτηση αυτή μας επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων είτε γραμμικών είτε μη γραμμικών συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων συναρτήσεων που παρουσιάστηκαν.

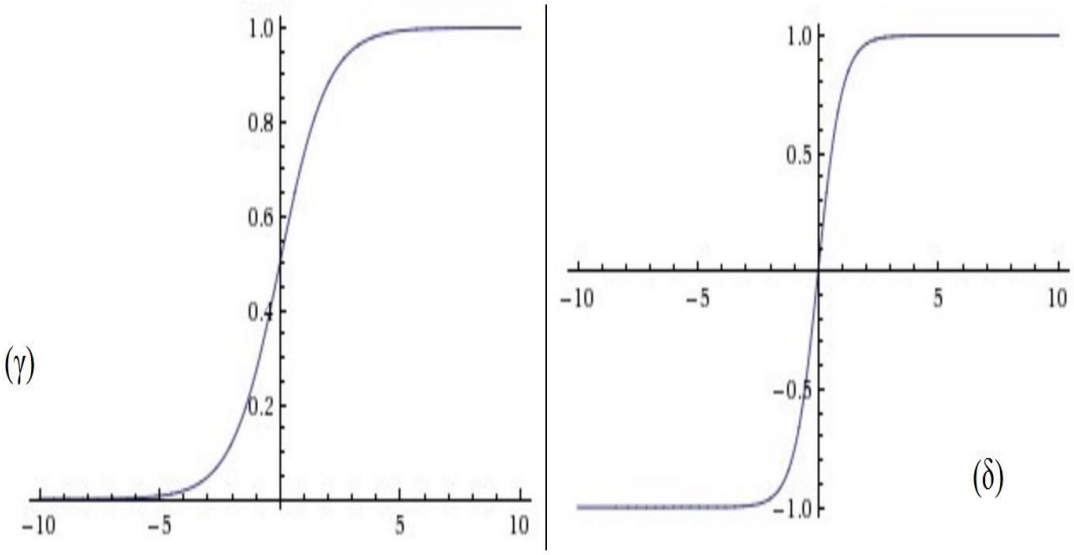
Οι παραπάνω συναρτήσεις έχουν εύρος τιμών από 0 έως +1. Είναι ορισμένες φορές επιθυμητό, το εύρος της συνάρτησης ενεργοποίησης να μεταβάλλεται από -1 έως +1. Αν επιθυμούμε κάτι τέτοιο χρησιμοποιούμε την παρακάτω βηματική συνάρτηση:

$$\varphi(v_k)=\begin{Bmatrix} 1, & v_k>0 \\ 0, & v_k=0 \\ -1, & v_k<0 \end{Bmatrix}$$

ή αντί της σιγμοειδούς συνάρτησης, τη συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης:

$$\varphi(v_k) = \tanh(v_k)$$

Ανάλογα με την εφαρμογή, συμφέρει η χρήση της μίας ή της άλλης συνάρτησης, αλλά η ανάλυση αυτών των λόγων ξεφεύγει του παρόντος.



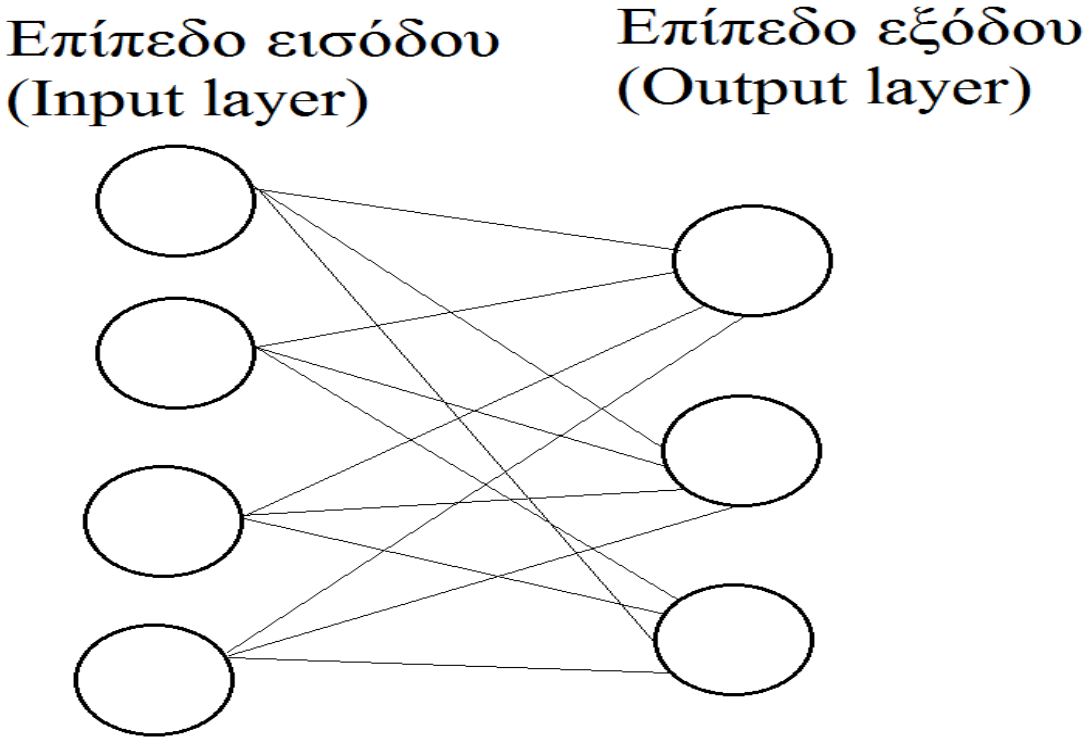
Σχήμα 2.7 Η συνάρτηση tanh(u) (γ) και η σιγομειδής συνάρτηση (δ)

2.4 Αρχιτεκτονική δικτύων

Αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου καλούμε τον τρόπο με τον οποίο αναπαρίσταται και δομείται το νευρωνικό δίκτυο, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι νευρώνες. Οι τελευταίοι, τοποθετούνται σε επίπεδα (layers).

Οι νευρώνες που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο λειτουργούν παράλληλα ενώ το πρώτο επίπεδο περιέχει τις μεταβλητές εισόδου του δικτύου (inputs). Στο επίπεδο αυτό δε γίνεται κάποιος υπολογισμός, αλλά τα σήματα προκύπτουν από την εφαρμογή που εξετάζουμε και απλώς αθροίζονται γραμμικά προτού μεταβούν στο επόμενο κατά σειρά επίπεδο.

Ανάμεσα στο επίπεδο εισόδου (input layer) και στο επίπεδο εξόδου (output layer) υπάρχουν τα κρυμμένα επίπεδα (hidden layers). Ονομάζονται κρυμμένα διότι δεν έχουν κάποια φυσική σημασία για την εφαρμογή/πρόβλημα που μοντελοποιούμε αλλά βοηθούν το δίκτυο να συσχετίσει ακριβέστερα τα σήματα εισόδου με αυτά της εξόδου. Είναι δε εύλογο, πώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημάτων εισόδου, χρειαζόμαστε περισσότερα κρυμμένα επίπεδα. Εξάλλου, οι νευρώνες που ανήκουν σε κρυμμένα επίπεδα λέγονται κρυμμένοι νευρώνες (hidden neurons).

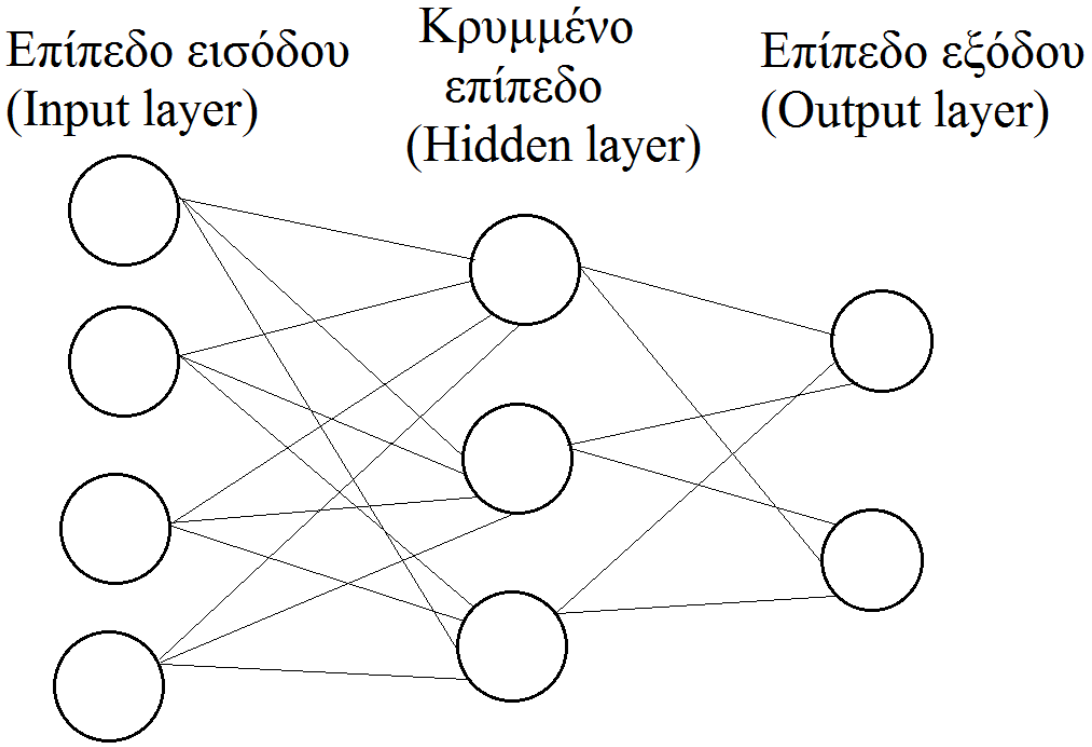


Σχήμα 2.8 Νευρωνικό δίκτυο 4-3 (χωρίς κρυμμένο επίπεδο)

Τέλος, το επίπεδο εξόδου (output layer) υπολογίζει την έξοδο του δικτύου. Είναι φανερό ότι ο αριθμός των νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου καθορίζεται από το προς εξέταση πρόβλημα και τις παραμέτρους του που μελετούμε. Αντίθετα, η

επιλογή του αριθμού των κρυμμένων επιπέδων καθώς και τον αριθμό των νευρώνων που αποτελούν το καθένα αφήνεται στην κρίση του μελετητή. Όσα περισσότερα κρυμμένα επίπεδα επιλέγουμε και με όσους περισσότερους νευρώνες, τόσο πιο πολύπλοκοι υπολογισμοί είναι δυνατό να διεξαχθούν. Γενικά, είναι επιθυμητό να βρεθεί αυτή η αρχιτεκτονική του δικτύου από την οποία προκύπτει αποδεκτό αποτέλεσμα, με όσο το δυνατόν πιο απλή αρχιτεκτονική. Έτσι, στην πράξη, συνήθως προκύπτουν δίκτυα με ένα ή δύο κρυμμένα επίπεδα. Ένα δίκτυο στο οποίο κάθε νευρώνας είναι συνδεδεμένος με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου ονομάζεται πλήρως συνδεδεμένο, ειδάλλως ονομάζεται μερικώς συνδεδεμένο.

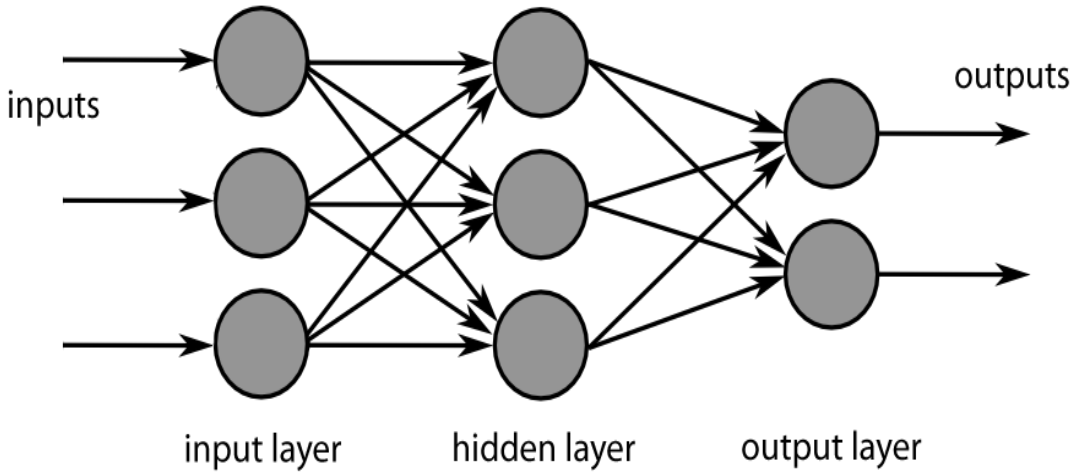
Όσον αφορά την αναφορά μας στη δομή ενός δικτύου, θα αναφερόμαστε σε αυτά στη μορφή a-b-c εννοώντας ότι αποτελείται από a νευρώνες στο επίπεδο εισόδου, b νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο και c νευρώνες στο επίπεδο εξόδου. Έτσι, ένα δίκτυο 3-5-5-1 έχει 3 μεταβλητές εισόδου, 2 κρυμμένα επίπεδα με 5 νευρώνες έκαστο και 1 μεταβλητή εξόδου.



Σχήμα 2.9 Νευρωνικό δίκτυο 4-3-2 με ένα κρυμμένο επίπεδο

2.4.1 Δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης (feedforward networks)

Τα δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι τα σήματα των συνάψεων μεταδίδονται από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου και όχι αντίθετα. Χρησιμοποιείται συνήθως για αναγνώριση προτύπων (pattern recognition).



Σχήμα 2.10 Νευρωνικό δίκτυο 3-3-2 εμπρόσθιας τροφοδότησης

2.4.2 Δίκτυα με ανάδραση

Σε αυτά τα δίκτυα τα σήματα μπορούν να μεταδίδονται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή βρόχων ανατροφοδότησης. Για κάθε σύνολο μεταβλητών εισόδου, υπάρχει ένα σημείο ισορροπίας του δικτύου το οποίο αλλάζει αν αλλάξουμε τις εισόδους του.

2.5 Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων (training)

Αφού καθοριστεί η αρχιτεκτονική του δικτύου, προκειμένου να μοντελοποιήσουμε όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικά το πρόβλημα που εξετάζουμε, πρέπει να ρυθμίσουμε κατάλληλα τους συντελεστές βαρύτητας κάθε σύναψης. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη βοήθεια των αλγορίθμων εκπαίδευσης. Σκοπός τους είναι η εκμετάλλευση των υπαρχόντων δεδομένων (δηλαδή των input data που δίνουν γνωστά output data) ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα τόσα στην εισαγωγή γνωστών όσο και άγνωστων δεδομένων.

Οι μέθοδοι εκπαίδευσης κατατάσσονται κυρίως στις επιτηρούμενες (supervised) και μη-επιτηρούμενες (unsupervised). Στην μη-επιτηρούμενη εκπαίδευση,

εισάγονται ποικίλα διανύσματα εισόδου τα οποία στη συνέχεια κατατάσσονται μαζί με παρόμοια διανύσματα εισόδου. Έτσι, τελικά, οι συντελεστές βαρύτητας μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε παρόμοια διανύσματα εισόδου να προκαλούν παρόμοια διανύσματα εξόδου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που έχουμε είναι ατελή (δεν έχουμε δεδομένα εξόδου).

Στην επιτηρούμενη εκπαίδευση δίνονται ως δεδομένα στο δίκτυο, διανύσματα εισόδου καθώς και τα διανύσματα εξόδου που προκύπτουν από αυτά. Το δίκτυο, μέσω της εκμάθησης μεταβάλλει τους συντελεστές βαρύτητας ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή έξοδος για τα ήδη δοθέντα αλλά και για άγνωστα αρχικά inputs. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, το δίκτυο διατηρεί τους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν και υπολογίζει άλλα διανύσματα εξόδου που του ζητούμε χωρίς να τους μεταβάλλει. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται αν το δεδομένο δίκτυο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά το πρόβλημα που μελετάται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως θα αναφερθεί εκτενώς στη συνέχεια, επιλέγουμε ένα δίκτυο συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής. Στη συνέχεια τροφοδοτούμε το δίκτυο με διανύσματα εισόδου – εξόδου γνωστά από πειραματικά δεδομένα. Το δίκτυο υπολογίζει τα σφάλματα που προκύπτουν και μεταβάλλει ανάλογα τους συντελεστές βαρύτητας μέχρι το σφάλμα να ελαχιστοποιηθεί με βάση τους κανόνες που θέτει ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος εκπαίδευσης. Πρόκειται, δηλαδή, για επιτηρούμενη εκπαίδευση.

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με ένα κρυμμένο επίπεδο, με m εισόδους, n νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο, και l νευρώνες στο επίπεδο εξόδου. Στην αρχή, δίνουμε τυχαίες τιμές στους συντελεστές βαρύτητας του δικτύου. Εισάγουμε, το επιθυμητό διάνυσμα εισόδου που περιέχει τα σήματα x_j (j=1,2,…,m) και προκύπτουν τα αντίστοιχα σήματα εξόδου y_k (k=1,2,…,n) του δικτύου. Έτσι, το σήμα εξόδου του νευρώνα k του κρυμμένου επιπέδου είναι:

$$y_k = \varphi_k\left(\sum_{j=0}^{m} x_j \cdot w_{kj}\right)$$

όπου φ_κ θεωρήσαμε τη συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα k.

Η τιμή του bias θεωρείται απλώς μια σύναψη με συντελεστή βαρύτητας ίσο με 1 και αυτό θα υποτίθεται για λόγους απλότητας σε όλη την ανάλυση που ακολουθεί.

Το σήμα εξόδου του νευρώνα k του κρυμμένου επιπέδου είναι ένα από τα σήματα εισόδου των νευρώνων του επιπέδου εξόδου. Υπενθυμίζεται ότι κάθε νευρώνας ενός επιπέδου συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου, το δίκτυο είναι, δηλαδή, πλήρως συνδεδεμένο. Έτσι, το σήμα εξόδου του νευρώνα i του επιπέδου εξόδου είναι:

$$o_i = \varphi_i\left(\sum_{k=0}^{k} y_k \cdot v_{ik}\right)$$

όπου φ_i θεωρήσαμε τη συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα i.

Υποθέτοντας ότι έχουμε διαθέσιμα για την εκπαίδευση Q ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου – εξόδου καθένα από τα οποία συμβολίζουμε με p, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε ζευγάρι είναι:

$$E_p = \frac{1}{2}\sum_{1}^{l}(d_{p,i} - o_{p,i})^2$$

όπου $d_{p,i}$ είναι το επιθυμητό διάνυσμα εξόδου. Στην παραπάνω εξίσωση, οι μεταβλητές είναι πλέον διανύσματα (πίνακες).

Επιθυμούμε η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος να μηδενιστεί. Για το λόγο αυτό, υπολογίζουμε την παράγωγο του σφάλματος και διορθώνουμε τους συντελεστές βαρύτητας των συνάψεων. Κάθε φορά που το δίκτυο «περνάει» από όλα τα ζευγάρια διανυσμάτων εκπαίδευσης, ολοκληρώνεται μια εποχή (epoch) της εκπαίδευσης του δικτύου. Η εκπαίδευση σταματά μετά από κάποιο αριθμό εποχών, θεωρητικά όταν το σφάλμα μηδενιστεί, ή πρακτικά, σύμφωνα με κάποιο κανόνα που επιβάλλει ο νόμος εκπαίδευσης που θα επιλέξουμε.

2.5.1 Νόμοι εκπαίδευσης (training rules)

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι συντελεστές βαρύτητας μετά από κάθε εποχή καθορίζεται από μαθηματικούς αλγορίθμους οι περισσότεροι από τους οποίους βασίζονται στον κανόνα του Hebb. Σύμφωνα με αυτόν, που είναι και ο αρχαιότερος (1949), αν ένας νευρώνας λάβει σήμα από έναν άλλο νευρώνα και τα δύο σήματα είναι του ίδιου προσήμου, ο συντελεστής βαρύτητας της μεταξύ τους σύναψης πρέπει να αυξηθεί.

Ο νόμος του Hopfield αποτελεί εξέλιξη του νόμου του Hebb. Σύμφωνα με αυτόν, καθορίζεται και το πόσο θα αλλάζουν οι συντελεστές βαρύτητας ως εξής: αν το σήμα εισόδου και το σήμα εξόδου ενός νευρώνα είναι ομόσημα, ο συντελεστής βαρύτητας αυξάνεται ανάλογα με το ρυθμό εκπαίδευσης που έχουμε επιλέξει, ενώ αν είναι ετερόσημα μειώνεται ανάλογα και πάλι με το ρυθμό εκπαίδευσης.

Τέλος, ο κανόνας Windrow – Hoff ή κανόνας delta (διαφοράς) ή κανόνας της ελάχιστης μέσης τετραγωνικής ρίζας (least mean square rule) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του δικτύου οπισθοδρομείται προς προηγούμενα επίπεδα, ένα επίπεδο τη φορά, και οι συντελεστές βαρύτητας μεταβάλλονται έτσι ώστε το σφάλμα αυτό να μειωθεί. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πρώτο επίπεδο του δικτύου. Το δίκτυο αυτό είναι εμπρόσθιας τροφοδοσίας με οπισθόδρομη διάδοση (feedforward backpropagation network).

2.5.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης (training algorithms)

Είναι πιο εύκολο να κατανοήσουμε τους αλγορίθμους που εφαρμόζονται για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, εφόσον έχουμε ήδη αναφερθεί στους νόμους εκπαίδευσης προηγουμένως. Η επιστήμη της στατιστικής και της ανάλυσης δεδομένων έχει αποδώσει μεγάλο αριθμό τέτοιων αλγορίθμων, καθένας από τους οποίους αποδεικνύεται στην πράξη κατάλληλος για συγκεκριμένο τύπο προβλημάτων. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, εδώ, για λόγους καλής εποπτείας της παρούσας εργασίας, θα αναφερθούμε σε αλγορίθμους εκπαίδευσης που σχετίζονται ή χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι στην πράξη δοκιμάζονται διαφορετικοί αλγόριθμοι εκπαίδευσης και μελετώνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν, ώστε να επιλεγεί ο καταλληλότερος για το μελετώμενο πρόβλημα.

2.5.2.1 Αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης (backpropagation algorithm)

Ο παρών αλγόριθμος, αποτελεί τη ραχοκοκαλιά των αλγορίθμων εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Παρότι είχε ανακαλυφθεί από το 1980, άρχισε να γίνεται ευρέως γνωστός όταν τον παρουσίασαν οι David E. Rumelhart , Geoffrey E. Hinton και Ronald J. Williams στη δημοσίευσή τους με τίτλο «Αναπαραστάσεις εκμάθησης με τη χρήση σφαλμάτων οπισθόδρομης διάδοσης» το 1986. Στη δημοσίευση αυτή, παρουσιάζονται αρκετά νευρωνικά δίκτυα στα οποία ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δίνει λύση πολύ πιο γρήγορα από προγενέστερες προσπάθειες. Έτσι, ορισμένα προβλήματα τα οποία παρέμεναν άλυτα, πλέον μπόρεσαν να λυθούν με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.

Η ουσία της συγκεκριμένης τεχνικής συνίσταται στον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και η διάδοσή του «προς τα πίσω» με στόχο τη μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας σε κάθε σύζευξη (του bias συμπεριλαμβανομένου) μέχρις ότου το σφάλμα μειωθεί στο επιθυμητό επίπεδο. Σκοπός της επιτυχούς εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι η τιμή εξόδου του όταν του εισάγουμε μια άγνωστη τιμή εισόδου, να είναι κοντά στην τιμή εξόδου που αντιστοιχεί σε μία γνωστή, παρόμοια τιμή εισόδου. Έτσι, σιγά - σιγά, το δίκτυο προσεγγίζει τη συνάρτηση σύμφωνα με την οποία περιγράφεται το πρόβλημα που εξετάζεται.

Ας δούμε όμως τη μαθηματική διατύπωσή του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης:

Όταν εισάγεται ένα ζεύγος διανυσμάτων εισόδου – εξόδου κατά την εκπαίδευση, η μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας του κρυμμένου επιπέδου (w_{kj}) και του επιπέδου εξόδου (v_{ik}) μεταβάλλονται κατά τις παρακάτω τιμές αντίστοιχα:

$$\Delta_p w_{kj} = -\alpha \frac{\partial E_p}{\partial w_{kj}} \text{ και } \Delta_p v_{ik} = -\alpha \frac{\partial E_p}{\partial v_{ik}}$$

όπου α ο ρυθμός εκπαίδευσης του δικτύου. Επιλέγοντας μεγάλο ρυθμό εκπαίδευσης η λύση δε θα είναι ευσταθής διότι οι μεταβολές θα είναι ίσως πολύ μεγάλες. Από την άλλη μεριά, ένας πολύ μικρός ρυθμός εκπαίδευσης καθιστά την ταχύτητα σύγκλισης της διαδικασίας αργή. Γενικά, επιλέγεται αυθαίρετα και απαιτούνται δοκιμές προκειμένου να βρεθεί μία καταρχήν βέλτιστη επιλογή του.

Από προηγουμένως, ισχύουν οι σχέσεις:

$$y_k = \varphi_k(\sum_{j=0}^{m} x_j \cdot w_{kj}) \qquad o_i = \varphi_i(\sum_{k=0}^{n} y_k \cdot v_{ik}) \quad E_p = \frac{1}{2}\sum_{1}^{l}(d_{p,i} - o_{p,i})^2$$

Επομένως προκύπτει: $\frac{\partial E_p}{\partial v_{ik}} = -\delta_i \cdot y_{p,k}$ και $\frac{\partial E_p}{\partial w_{kj}} = -\delta_k \cdot x_{pj}$

όπου $\delta_i = (d_{p,i} - o_{p,i}) \cdot \varphi_i'$ και $\delta_k = (\sum_{i=1}^{l} \delta_i \cdot v_{ik}) \cdot \varphi_k'$

και $\varphi_i' = \frac{\partial o_{p,i}}{\partial \sum_{k=0}^{n} y_{p,k} \cdot v_{ik}}$, $\varphi_k' = \frac{\partial y_{p,k}}{\partial \sum_{j=1}^{m} x_j \cdot w_{kj}}$

Αναφέραμε προηγουμένως ότι υποθετικά διαθέτουμε Q ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου – εξόδου. Για κάθε ζεύγος διανυσμάτων, οι συντελεστές βαρύτητας μεταβάλλονται, επομένως η συνολική μεταβολή τους αφού το δίκτυο επεξεργαστεί όλα τα ζευγάρια αυτά είναι:

$$\Delta w_{kj} = -\alpha \sum_{p=1}^{Q} \frac{\partial E_p}{\partial w_{kj}} \text{ και } \Delta v_{ik} = -\alpha \sum_{p=1}^{Q} \frac{\partial E_p}{\partial v_{ik}}$$

Οι νέοι συντελεστές βαρύτητας είναι:

$$w_{kj}^{(T+1)} = w_{kj}^{(T)} + \Delta w_{kj} \qquad \text{και} \qquad v_{ik}^{(T+1)} = v_{ik}^{(T)} + \Delta v_{ik}$$

όπου Τ ο αριθμός της επανάληψης της διαδικασίας.

Είναι φανερό, ότι με την πάροδο των επαναλήψεων το σφάλμα βαίνει μειούμενο. Όταν το σφάλμα ελαχιστοποιηθεί, η διαδικασία σταματάει και η φάση της εκπαίδευσης ολοκληρώνεται. Το δίκτυο λειτουργεί πλέον με τους νέους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή του. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί άλλες μέθοδοι που θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα.

2.5.2.2 Παράγοντας ορμής

Ο παράγοντας ορμής εκφράζει ουσιαστικά την αδράνεια της μεταβολής των συντελεστών βαρύτητας. Έτσι, λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας της προηγούμενης επανάληψης, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι δε θα μεταβάλλουμε υπερβολικά τις τιμές κατά την πληροφορία που μας δίνεται στην επόμενη επανάληψη.

Μαθηματικά, αυτό αποτυπώνεται ως εξής:

$$\Delta_p^{(T+1)} w_{kj} = -\alpha \frac{\partial E_p}{\partial w_{kj}} + \gamma \cdot \Delta_p^{(T)} w_{kj} \text{ και } \Delta_p^{(T+1)} v_{ik} = -\alpha \frac{\partial E_p}{\partial v_{ik}} + \gamma \cdot \Delta_p^{(T)} v_{ik}$$

στην περίπτωση όπου λαμβάνουμε υπόψη συντελεστή ορμής γ μετά από την επεξεργασία κάθε ζεύγους.

Εξάλλου, στην περίπτωση που η διόρθωση γίνεται μετά τις μεταβολές εξαιτίας όλων των ζευγών διανυσμάτων εισόδου – εξόδου:

$$\Delta w_{kj} = -\alpha \sum_{p=1}^{Q} \frac{\partial E_p}{\partial w_{kj}} + \gamma \cdot \Delta^{(T)} w_{kj} \text{ και } \Delta v_{ik} = -\alpha \sum_{p=1}^{Q} \frac{\partial E_p}{\partial v_{ik}} + \gamma \cdot \Delta_p^{(T)} v_{ik}$$

Συνήθως επιλέγεται τιμή του γ από 0,1 έως 0,8. Με τη χρήση του, ευελπιστούμε ότι εφόσον η κάθε προηγούμενη επανάληψη γίνεται προς την ίδια κατεύθυνση με την τρέχουσα επανάληψη, η ταχύτητα σύγκλισης θα μειωθεί. Το ίδιο επιθυμούμε να συμβεί και αν οι δύο μεταβολές είναι ετερόσημες.

2.5.2.3 Μεταβολή του ρυθμού εκπαίδευσης

Προηγουμένως, υπονοήσαμε ότι ο ρυθμός εκπαίδευσης α του δικτύου επιλέγεται αρχικά και διατηρείται σταθερός. Στην πράξη, μπορούμε να ορίσουμε να μεταβάλλεται ο ρυθμός εκπαίδευσης. Για παράδειγμα, όταν η μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας βαίνει προς την ίδια κατεύθυνση για συνεχόμενες επαναλήψεις, η αύξηση του ρυθμού εκπαίδευσης επιταχύνει τη διαδικασία σύγκλισης. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που με την πάροδο των επαναλήψεων, συντελεστές βαρύτητας βαίνουν εναλλάξ προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), ελάττωση του ρυθμού εκπαίδευσης θα επιτρέψει στο σφάλμα να μειωθεί πιο γρήγορα.

Έτσι, έχουμε μία ακόμη δυνατότητα να μειώσουμε το χρόνο που απαιτείται για τη σύγκλιση της διαδικασίας.

2.5.2.4 Ο αλγόριθμος Levenberg – Marqduart

Εκτός από τις μεθόδους της προηγούμενης παραγράφου, χρησιμοποιούνται και μέθοδοι αριθμητικής βελτιστοποίησης. Μία από αυτές είναι ο αλγόριθμος Quasi – Newton και ο αλγόριθμος Levenberg – Marqduart.

Η μέθοδος Newton χρησιμοποιεί τον εσσιανό πίνακα (Hessian), δηλαδή τον πίνακα των δεύτερων παραγώγων των τετραγωνικών σφαλμάτων ως προς τους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν από την προηγούμενη επανάληψη και γενικά συγκλίνει πιο γρήγορα από τις προηγούμενες μεθόδους. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι ο υπολογισμός του εσσιανού πίνακα είναι χρονοβόρος και πολλές φορές ασύμφορος. Μέθοδοι που δε χρησιμοποιούν τον εσσιανό πίνακα αλλά μία προσέγγιση του ονομάζονται Quasi – Newton.

Μία παραλλαγή είναι η μέθοδος Lavenberg – Marqduart. Σε αυτή υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας J που είναι ο πίνακας των πρώτων παραγώγων των σφαλμάτων του δικτύου. Η σχέση του με τον πίνακα Hessian H είναι:

$$\mathrm{H} = J^T \cdot J$$

Η δε μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας είναι:

$$\Delta w = -[H + \mu \cdot I]^{-1} \cdot g = [-J^T \cdot J + \mu \cdot I]^{-1} \cdot J^T \cdot e$$

όπου $g = J^T \cdot e$ με e το διάνυσμα που περιέχει τις τιμές των σφαλμάτων του νευρωνικού δικτύου.

Επίσης ο συντελεστής μ καλείται συντελεστής απόσβεσης (damping parameter). Για μ=0 και χρήση του πίνακα H προκύπτει η μέθοδος Newton. Όταν ο συντελεστής μ έχει πολύ μεγάλη τιμή, η μέθοδος μοιάζει με αυτή της οπισθόδρομης διάδοσης όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Έτσι, όσο η διαδικασία ομοιάζει στη μέθοδο Newton η σύγκλιση γίνεται ταχύτερα ενώ όσο ο συντελεστής μ μεγαλώνει η ταχύτητα σύγκλισης μειώνεται. Επομένως, τελικά η μέθοδος Lavenberg – Marqduart φροντίζει ώστε όταν μετά από ένα βήμα το σφάλμα αυξάνεται, ο συντελεστής μ να αυξάνεται ενώ όταν το σφάλμα μειώνεται ο συντελεστής μ να μειώνεται.

Τελικά, με την πάροδο του χρόνου έχει επικρατήσει η ευρεία χρήση του αλγορίθμου Lavenberg – Marqduart σε μικρού και μεσαίου μεγέθους τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, λόγω της μεγάλης ταχύτητας σύγκλισης του σε σχέση με άλλους αλγορίθμους και στα αξιόπιστα αποτελέσματα που προκύπτουν για αρκετά μελετόμενα προβλήματα. Αντιθέτως, στην περίπτωση πολύ μεγάλων νευρωνικών δικτύων η χρήση του δεν είναι ιδανική λόγω της μνήμης που απαιτείται για την επεξεργασία και τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα.

2.6 Οφέλη και προβληματισμοί

Ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ότι υπάρχουν προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική λύση ή αν υπάρχει δεν είναι βολικό να εκφραστεί και να χρησιμοποιηθεί. Με τη χρήση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, απλώς εισάγουμε ένα σύνολο εισόδων και παίρνουμε ένα ορθό σύνολο εξόδων. Αυτό καθίσταται δυνατό χωρίς να ξέρουμε εκ των προτέρων το αποτέλεσμα. Το δίκτυο, επομένως, λειτουργεί αντί μιας αναλυτικής περιγραφής ενός προβλήματος, αφού αυτή δεν είναι γνωστή.

Επίσης, ένα συνολικά καλά εκπαιδευμένο δίκτυο, μένει ανεπηρέαστο αν σε ορισμένες συνάψεις οι συντελεστές βαρύτητας έχουν υπολογιστεί λανθασμένα. Αυτό συμβαίνει διότι οι συνάψεις και οι νευρώνες είναι τόσοι πολλοί ώστε οι πληροφορίες και οι επιδράσεις που αυτές έχουν στο τελικό αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά διαμοιρασμένες στην πληθώρα συνάψεων που υπάρχουν στο δίκτυο.

Για τους ίδιους λόγους, ένα νευρωνικό δίκτυο δεν επηρεάζεται από μικρές αλλαγές στις συνθήκες του προβλήματος, καθότι είναι ήδη προσαρμοσμένο σε αυτό.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η παράλληλη λειτουργεία των νευρώνων επιτρέπει στους υπολογισμούς να γίνονται ταχύτερα. Αντιθέτως, στο συμβατικό προγραμματισμό, κάθε ενέργεια εξαρτάται από την προηγούμενη, κάτι που σημαίνει ότι κάθε επόμενη ενέργεια πρέπει να «περιμένει» τις προηγούμενες προτού εκτελεστεί.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα των νευρωνικών δικτύων, το κυριότερο είναι η υπερ-προσαρμογή των δεδομένων (overfitting). Αυτό συμβαίνει όταν ενώ το συνολικό σφάλμα εκπαίδευσης (training error) είναι μικρό, το δίκτυο δεν παρουσιάζει την επιθυμητή απόκριση σε νέα δεδομένα. Αυτό συμβαίνει διότι το δίκτυο απομνημόνευσε τα δεδομένα με τρόπο πολύ πιο λεπτομερή από ότι συμβαίνει στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι μοντελοποιούμε ένα πρόβλημα το οποίο περιγράφεται αναλυτικά με μία συνάρτηση η οποία παρουσιάζει τρία τοπικά ακρότατα. Στην περίπτωση της υπερ-προσαρμογής, το δίκτυο θα «βλέπει» πολλά περισσότερα τοπικά ακρότατα τα οποία είναι αρκετά αμελητέα στην πραγματικότητα ώστε να θεωρηθεί ότι δεν υφίστανται. Έτσι, πρέπει ο μελετητής να είναι πολύ προσεκτικός και να προσπαθεί να περιγράψει κάθε πρόβλημα με τη χρήση δικτύου με την απλούστερη δυνατή αρχιτεκτονική.

Για τη μείωση αυτού του κινδύνου, χρησιμοποιούνται είτε μέθοδοι συστηματοποίησης είτε πρόωρης διακοπής της διαδικασίας εκμάθησης. Εδώ, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο πρόωρης διακοπής, με τρόπο που θα αναλυθεί ευθύς αμέσως.

Τα ζεύγη διανυσμάτων εισόδου – εξόδου χωρίζονται σε τρία υποσύνολα. Το καλείται σύνολο εκπαίδευσης (training set), το σύνολο επικύρωσης (validation set) και το σύνολο ελέγχου (test set). Εκ προοιμίου, στο πρόγραμμα Matlab με το οποίο θα διεξάγουμε την προσομοίωση στην παρούσα διπλωματική εργασία, το σύνολο

εκπαίδευσης αποτελείται από το 70% των διαθέσιμων ζευγών διανυσμάτων εισόδου – εξόδου, ενώ τα άλλα δυο σύνολα ισομοιράζονται το 15% από τα εναπομείναντα ζεύγη.

Όπως εξηγήσαμε προηγουμένως, τα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των συντελεστών βαρύτητας των συνάψεων του δικτύου. Ταυτόχρονα με το σφάλμα εκπαίδευσης, παρακολουθείται και το σφάλμα επικύρωσης. Το τελευταίο μειώνεται παρομοίως με το πώς μειώνεται το σφάλμα εκπαίδευσης. Αυτό συμβαίνει μέχρι εκείνη την εποχή, όταν και ξεκινάει η υπερ-προσαρμογή των δεδομένων. Τότε, έχουμε ορίσει εξαρχής, ότι αν η αύξηση του σφάλματος επικύρωσης συνεχιστεί για ένα ορισμένο συνεχόμενο αριθμό εποχών (στην παρούσα εργασία θα είναι 6), η διαδικασία σταματά. Το δίκτυο κρατάει εκείνους τους συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν προτού το σφάλμα επικύρωσης αρχίσει να αυξάνεται.

Το σφάλμα ελέγχου δε χρησιμοποιείται στη διαδικασία της εκπαίδευσης, αλλά το ελέγχουμε εμείς εκ των υστέρων. Επιθυμούμε αυτό, να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το σφάλμα επικύρωσης. Ειδάλλως, είναι πιθανό να μην έχει εξασφαλιστεί η τυχαιότητα με την οποία δημιουργούνται τα τρία δείγματα και ίσως πρέπει να επαναδιεξαχθεί η εκπαίδευση. Η τεχνική αυτή δεν εξαρτάται από τον αλγόριθμο εκμάθησης που επιλέγουμε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά βούληση.

2.7 Ερευνητικό έργο σχετικό με την παρούσα εργασία

Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιαστούν ερευνητικές προσπάθειες προσομοίωσης πειραμάτων, παρόμοιας φύσεως με αυτό που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η σημασία των προσπαθειών αυτών, συνίσταται στο ότι όταν ένα μοντέλο προσομοίωσης κρίνεται πετυχημένο, εξοικονομούνται σημαντικοί πόροι οι οποίοι θα δαπανιούνταν για την πραγματική διεξαγωγή πειραμάτων. Έτσι, ο τομέας του σχεδιασμού πειραμάτων και της ανάλυσης δεδομένων, θεωρία του οποίου θα αποτυπωθεί στο επόμενο κεφάλαιο, αποκτά μεγάλη σημασία.

Προσομοίωση πλευρικής φθοράς και ρυθμού αποβολής υλικού σε κράμα Inconel 718 [20]

Στην έρευνα αυτή, εξετάζεται η επίδραση των συνθηκών κοπής στο ρυθμό αποβολής υλικού και της διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου που είναι φτιαγμένο από καρβίδιο του βολφραμίου (tungsten carbide – WC) με επικάλυψη που έχει δημιουργηθεί με μέθοδο εναπόθεσης ατμών (chemical vapor disposition – CVD). Η κατεργασία αφορά τόρνευση υπερκράματος νικελίου – χρωμίου Inconel 718.

Τα εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου παρουσιάζουν εξαιρετική σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ μια επιπλέον διεργασία με τη μέθοδο εναπόθεσης ατμών τούς προσδίδει επιπλέον ιδιότητες (π.χ. προστασία από

διάβρωση). Γενικά, σε μία πρώτη απλοϊκή προσέγγιση, η εναπόθεση ατμών γίνεται όταν αντιδρώντα από τα οποία θα προκύψουν οι επικαλύψεις, αντιδρούν στην αέρια φάση, κοντά ή πάνω στο υπόστρωμα, το οποίο θερμαίνεται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση επικαλυπτικών στρωμάτων (coating). Το εργαλείο αυτό εμφανίζει πλευρική φθορά (flank wear) και με βάση την εμφάνισή της καθορίζεται η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, το υπερκράμα Inconel 718 , εξαιτίας της μεγάλης του αντοχής σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε αντίστοιχα περιβάλλοντα (π.χ. εξαρτήματα στροβιλομηχανών).

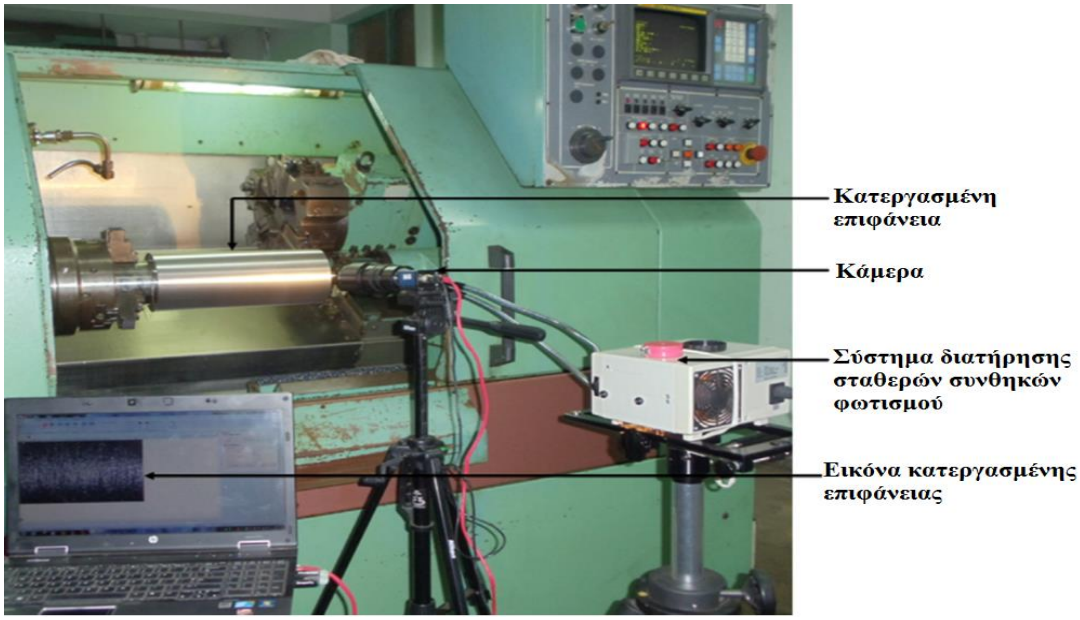
Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements) υπολόγισε τις παραμέτρους απόδοσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως (ρυθμός αποβολής υλικού και διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου), οι οποίες συγκρίθηκαν με πραγματικά πειράματα τα οποία σχεδιάσθηκαν με τις αρχές σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, επιβεβαίωσαν ότι το μοντέλο που δημιουργήθηκε έρχεται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν. Εξάλλου, προέκυψε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο το ρυθμό αποβολής υλικού είναι η ταχύτητα περιστροφής, το βάθος κοπής και η πρόωση, ενώ στην περίπτωση της ανάπτυξης πλευρικής φθοράς η πρόωση δεν προκαλεί σημαντική επίδραση.

Πρόβλεψη πεδίου φθοράς με τη χρήση τεχνικών τεχνητής όρασης και εκμάθησης μηχανής [21]

Η παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων έχει μεγάλη σημασία για την εξασφάλιση της ποιότητας ενός κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ολόκληρες γραμμές παραγωγής θα μπορούσαν να παύσουν τη δραστηριότητά τους αν δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουμε πότε πρέπει να αντικαταστήσουμε ένα κοπτικό εργαλείο ή πότε αυτό θα αστοχήσει. Για το λόγο αυτό, στο τμήμα μηχανολογίας του πολυτεχνείου της Kharagpur της Ινδίας, μελετήθηκε η πλευρική φθορά κοπτικών εργαλείων τόρνευσης, μελετώντας εικόνες της κατεργασμένης επιφάνειας.

Με τη βοήθεια μιας 2D κάμερας και μεθόδων τεχνητής όρασης, όπως τα διαγράμματα Voronoi, εξάγονται 8 χαρακτηριστικά (features) τα οποία σχετίζονται με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορούν να είναι η μορφή του μονοπατιού που δημιουργεί το εργαλείο στην επιφάνεια (pattern), η τραχύτητά της κ.α. Αυτά, υπόκεινται σε στατιστική επεξεργασία με τη βοήθεια μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machines). Η λειτουργία τους ομοιάζει με αυτή των νευρωνικών δικτύων.

Οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης είναι μία οικογένεια αλγορίθμων επιβλεπόμενης μάθησης που αναπτύχθηκαν από τον Vladimir Vapnik και χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε προβλήματα κατάταξης. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν το πλεονέκτημα να χειρίζονται πολύ καλά μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών και παρουσιάζουν υψηλή απόδοση κατά την κατηγοριοποίηση αντικειμένων (classification).



Σχήμα 2.11 Καταγραφή ποιότητας επιφανείας με τη χρήση τεχνητής όρασης

Ως αντικείμενο ορίζουμε ένα διάνυσμα με κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία εδώ είναι τα 8 features που μας ενδιαφέρουν. Από αυτά προκύπτει η φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Βελτιστοποίηση πεδίου φθοράς κοπτικού εργαλείου με τη χρήση μεθόδων Taguchi και ανάλυση παλινδρόμησης [22]

Σε αυτή την ερευνητική προσπάθεια μελετήθηκε η πλευρική φθορά (flank wear) διεξάγοντας 9 πειράματα κατά Taguchi. Τα πειράματα αφορούσαν τρεις διαφορετικούς παράγοντες, η επίδραση των οποίων στη φθορά του κοπτικού εργαλείου μελετήθηκε με βάση τρία επίπεδα τιμών που καθορίσθηκαν για αυτούς. Οι παράγοντες αυτοί, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, ήταν το βάθος κοπής, η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν φτιαγμένο από οξείδιο του ζιρκονίου (ZrO_2) και αλουμίνα (Al_2O_3) (zirconia toughened alumina) και παρουσιάζει βελτιωμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται όχι μόνο σε κοπτικά εργαλεία αλλά και στη βιοϊατρική σε τεχνητά μέλη συνδέσμων, ή σε εξαρτήματα μηχανών ή αντλιών, εξαιτίας της αυξημένης αντίστασης του σε διαβρωτικά φαινόμενα.

Ανάμεσα στα συμπεράσματα που εξήχθησαν, προέκυψε ότι τα πειράματα Taguchi είναι μία σωστή προσέγγιση του προβλήματος της πλευρικής φθοράς και ενδεχομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε για άλλες κατεργασίας, για το ίδιο όμως κοπτικό εργαλείο. Οι ερευνητές οδηγήθηκαν σε αυτό το συμπέρασμα, αφού οι πειραματικές τιμές ήταν πολύ κοντά σε αυτές που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.

Επίδραση των παραμέτρων της κοπής και του υγρού κοπής στη φθορά του κοπτικού εργαλείου και στην τραχύτητα επιφανείας κατά την τόρνευση, με τη χρήση μεθόδων κατά Taguchi [23]

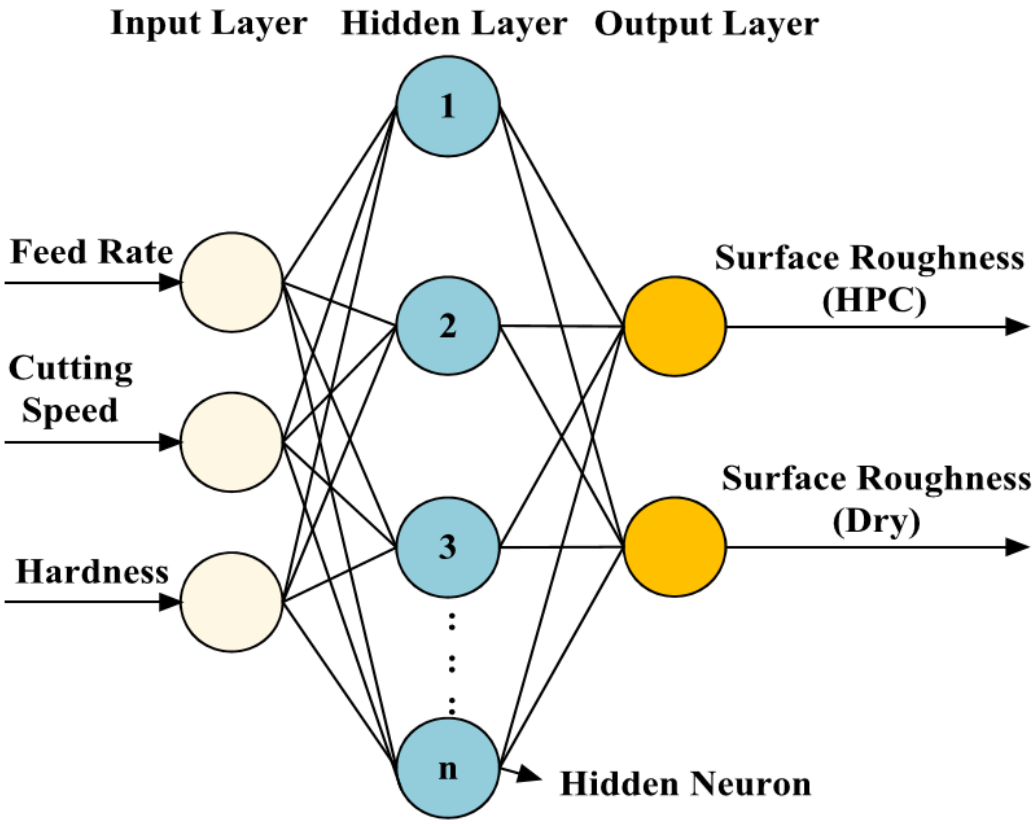
Σε αυτή την ερευνητική προσπάθεια, δε μελετάται μονάχα η επίδραση των συνθηκών κοπής αλλά και η επίδραση του επιπέδου του υγρού κοπής, σαν ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Για τον περιορισμό των απαραίτητων πειραμάτων που χρειάστηκε να διεξαχθούν, χρησιμοποιήθηκε, ασφαλώς, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν, η μέθοδος Taguchi. Με τη μέθοδο αυτή, τα 81 πειράματα που αρχικά απαιτούνταν και θα κόστιζαν πολύτιμος πόρους (χρόνο και χρήματα) μειώθηκαν σε 9.

Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι κυρίαρχοι παράγοντες που επιδρούν στην τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας είναι ο ρυθμός με τον οποίο ρέει το υγρό κοπής στην επιφάνεια, καθώς και η πρόωση. Αντιθέτως, η ταχύτητα κοπής και το βάθος κοπής δεν είχαν σημαντική επίδραση. Από την άλλη πλευρά, οι δύο τελευταίοι παράγοντες είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Μέτρια επίδραση έδειξε το επίπεδο ροής του υγρού κοπής, ενώ η πρόωση δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Τα δε πειραματικά αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις τιμές φθοράς και τραχύτητας που προβλέπονται από τα εμπειρικά μοντέλα που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές. Συμπερασματικά, οι ιδανικότερες συνθήκες κοπής, απαιτούν μια υψηλή τιμή ταχύτητας κοπής, ένα μέτριο βάθος κοπής, και ένα χαμηλό επίπεδο πρόωσης και ροής υγρού κοπής.

Πρόβλεψη τραχύτητας επιφανείας κατά την τόρνευση χάλυβα υπό την επίδραση δέσμης υψηλής πίεσης ψυκτικού υγρού, με τη χρήση νευρωνικών δικτύων [24]

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρεις αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων, οι οποίες επιχειρούν να προβλέψουν την τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας υπό την επίδραση τεσσάρων παραγόντων: ταχύτητα κοπής, πρόωση, επιφανειακή σκληρότητα και ύπαρξη ή μη δέσμης υψηλής πίεσης ψυκτικού υγρού. Η παρουσία του ψυκτικού υγρού παρήγαγε πιο λεία επιφάνεια λόγω αποδοτικής ψύξης και λίπανσης ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με μεγαλύτερη σκληρότητα, η μέση επιφανειακή τραχύτητα αυξήθηκε λόγω της δύναμης αντίστασης του κατεργαζόμενου τεμαχίου στο κοπτικό εργαλείο.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, μετά από πάρα πολλές δοκιμές διαφορετικών αρχιτεκτονικών και αλγορίθμων εκπαίδευσης των δικτύων, έδειξαν ποιες είναι οι ιδανικές συνθήκες κοπής για το χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε. Φυσικά, προέκυψε ότι η παρουσία αποτελεσματικής λίπανσης κατά όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι απαραίτητη ενώ



Σχήμα 2.12 Νευρωνικό δίκτυο με μεταβλητές εξόδου την τραχύτητα επιφανείας και μεταβλητές εισόδου τις συνθήκες τόρνευσης

προτιμάται υψηλή ταχύτητα κοπής, μικρή πρόωση και μικρή σκληρότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας.

Καταγραφή φθοράς κοπτικού εργαλείου με τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής και τη χρήση προσαρμοστικών νευρωνικών – ασαφών συστημάτων [25]

Στα πειράματα αυτά, μελετήθηκε το φρεζάρισμα πολυμερών που έχουν ενισχυθεί με ίνες γυαλιού (glass fiber – reinforced polymer composites – GFRP). Η ανάγκη της μελέτης προέκυψε από το γεγονός ότι πολλές φορές τα τεμάχια δεν είχαν την επιθυμητή ποιότητα, εξαιτίας ακατάλληλων συνθηκών κοπής που οδηγούσαν σε πρόωρη και απρόβλεπτη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Τα δε πειραματικά δεδομένα μέχρι τότε ήταν αρκετά περιορισμένα.

Η ανάλυση των δεδομένων που προέκυψε, έγινε με τη χρήση προσαρμοστικών νευρωνικών - ασαφών συστημάτων (adaptive neuro fuzzy inference systems). Η ασαφής λογική (fuzzy logic), είναι μια γενίκευση της λογικής κατά Boole, κατά την

οποία τα αποτελέσματα δεν είναι μονάχα αληθή (1) ή μη αληθή (0) αλλά μπορούν να είναι και ενδιάμεσες τιμές, αναπαριστώντας έτσι την έννοια της μερικής αλήθειας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση μη γραμμικών φαινομένων, ενώ η ικανότητα τους να μαθαίνουν, τα φέρνει κοντά στην έννοια των νευρωνικών δικτύων.

Το συμπέρασμα που προέκυψε, είναι ότι αποκτώντας δεδομένα για τις δυνάμεις κοπής της κατεργασίας, μπορούμε να προβλέψουμε ικανοποιητικά τη φθορά του κοπτικού εργαλείου εξοικονομώντας πολύτιμους πόρους. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες κατεργασίες καθότι, όπως αναφέραμε προηγουμένως, τα συγκεκριμένα πολυμερή παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά που δε συναντάται σε οποιοδήποτε κατεργαζόμενο υλικό.

Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου φρεζαρίσματος με τη χρήση νευρωνικού δικτύου σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής κατεργασίας [26]

Στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου της Τζόρτζια στην Ατλάντα των Η.Π.Α. (Georgia Institute of Technology), ερευνητές χρησιμοποίησαν νευρωνικά δίκτυα σε περιβάλλον Matlab για να μπορέσουν να προβλέψουν την ωφέλιμη διάρκεια ζωής που απομένει στο κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για το φρεζάρισμα συγκεκριμένου χάλυβα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής κατεργασίας.

Όπως ήδη μπορεί να προβλέψει κάποιος, η τιμή της ωφέλιμης ζωής του κοπτικού εργαλείου συνδέεται άμεσα με τη φθορά του. Τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν υπολόγισαν τιμές πολύ κοντά στις πειραματικές. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζεται περίπου 0.5sec για να υπολογίσει τη ζωή που απομένει στο κοπτικό εργαλείο, πράγμα χρήσιμο για υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, τα αποτελέσματα είναι πολύ αξιόπιστα καθότι, για τις παραμέτρους της κοπής, έχουν εισαχθεί κατανομές (π.χ. κανονική κατανομή) που εισάγουν ένα ποσοστό αβεβαιότητας σε σχέση με τις πραγματικές τους τιμές. Για παράδειγμα, η ταχύτητα περιστροφής που αναφέρουν οι σένσορες της μηχανής μπορεί να διαφέρει κατά τι από την πραγματική της τιμή. Οι ερευνητές, θα εργαστούν στη συνέχεια σε πειράματα όπου θα μελετήσουν το ίδιο φαινόμενο με διαφορετικές, όμως, συνθήκες κοπής.

Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου σε κέντρο κατεργασιών με δεδομένα κραδασμών (vibration analysis) [27]

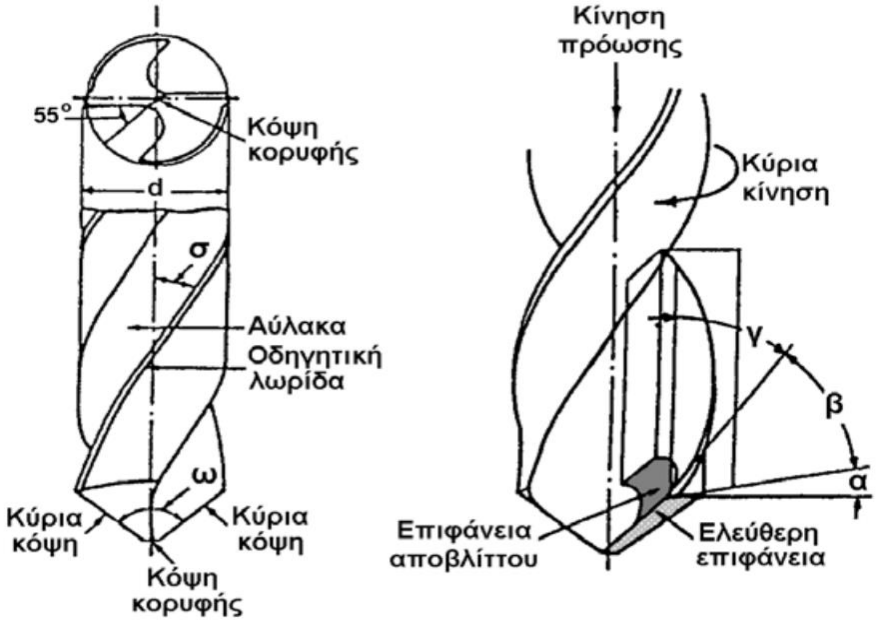
Στα πειράματα αυτά, μελετήθηκε η φθορά κοπτικού εργαλείου σε κέντρο τόρνευσης ενός κράματος τιτανίου με ποικίλες εφαρμογές στην αεροναυπηγική και τη βιοϊατρική επιστήμη. Όταν κατεργαζόμαστε αυτό το κράμα, η φθορά του κοπτικού

εργαλείου προχωράει τάχιστα από ένα σημείο και έπειτα. Επομένως, ένα μοντέλο πρόβλεψης της διάρκειας ζωής του κρίνεται ως απαραίτητο εργαλείο για την κατεργασία του συγκεκριμένου υλικού.

Τα απαραίτητα features που μελετήθηκαν με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων, εξάγονται από τις μετρήσεις που προκύπτουν από τα διάφορα επιταχυνσιόμετρα που υπάρχουν στο κέντρο κατεργασιών που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων και άλλων αλγορίθμων, τα στατιστικά features μειώνονται σε μικρότερο αριθμό ανάλογα με τη σημαντικότητά τους και μελετάται ο βαθμός επίδρασής τους στη φθορά του κοπτικού εργαλείου (classification). Τελικά, οι μέθοδοι αυτές κρίνονται ως αποτελεσματικές για την πρόβλεψη της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου με ικανοποιητική ακρίβεια

Πρόβλεψη φθοράς κοπτικού εργαλείου με τη χρήση νευρωνικών δικτύων, για το φρεζάρισμα ωστενιτικού χάλυβα [28]

Σε αυτά τα πειράματα, μελετήθηκε η φθορά του κοπτικού εργαλείου σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής, την πρόωση, το βάθος κοπής και τη γωνία ελίκωσης αυλάκων του κοπτικού εργαλείου (ελικοειδές τρυπάνι).



Οι τεχνικές σχεδιασμού πειραμάτων, μείωσαν τον αριθμό τον πειραμάτων που διεξήχθησαν. Το δε μοντέλο νευρωνικού δικτύου που επιλέχθηκε, είχε πολύ μικρή απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα. Έτσι, η έρευνα «έδειξε το δρόμο» προς μια αυτοματοποιημένη επιλογή συνθηκών κοπής που θα παρατείνει τη ζωή των κοπτικών

εργαλείων, διατηρώντας σε ικανοποιητικά επίπεδα το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας.

Κεφάλαιο 3
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύθηκε η κατεργασία της κοπής και οι αρχές που τη διέπουν. Ταυτόχρονα, παρουσιάστηκαν οι έννοιές της κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η εποπτεία του παρόντος κεφαλαίου. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν τα κοπτικά εργαλεία, ως βασικά συστατικά του καλού σχεδιασμού μίας κατεργασίας κοπής. Πιο αναλυτικά, αρχικά, παρουσιάστηκε η γεωμετρία τους και το πώς αυτή επηρεάζει την κατεργασία, τόσο ως προς την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας όσο και ως προς τη διάρκεια ζωής τους. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν τα συνηθέστερα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα κοπτικά εργαλεία σήμερα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα κοπτικά εργαλεία από κυβικό βοριονιτρίτη (PCBN). Η σημασία του θα φανεί σε αυτό το κεφάλαιο, καθότι τα πειράματα που θα μελετηθούν χρησιμοποιούν πλακίδια κοπτικού εργαλείου με ακμή από αυτό το υλικό. Η δε κατεργασία κοπής στην οποία θα εφαρμοστούν είναι η τόρνευση, γι' αυτό και μία πιο εξειδικευμένη ανάλυση παρουσιάστηκε προηγουμένως, ώστε να συνεπικουρήσει τη γενική ανάλυση των κατεργασιών κοπής.

Στο επόμενο κεφάλαιο, αναλύθηκαν οι αρχές, σύμφωνα με τις οποίες, η πρόοδος της εκμετάλλευσης της υπολογιστικής ισχύος, θα μας επιτρέψει να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου στο οποίο θα αναφερθούμε. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκε ένας πολύ συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος ανάλυσης δεδομένων, που ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων εκμάθησης μηχανής. Οι δομές που αναλύθηκαν, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζουν μαθηματικά το πώς εξελίσσεται το εκάστοτε αναλυόμενο φαινόμενο, ονομάζονται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks). Εμπνευσμένα από τον τρόπο με τον οποίο ο ανθρώπινος εγκέφαλος επεξεργάζεται τα ερεθίσματα που δέχεται από το περιβάλλον ώστε να οδηγηθεί σε αποφάσεις, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα απαντώνται συχνά σε τέτοιου είδους προβλήματα, στα οποία μία μαθηματική λύση είναι ασύμφορο να υπολογιστεί ή ακόμα και αδύνατο.

Έτσι, στο παρόν κεφάλαιο, με αφετηρία έναν αριθμό πειραμάτων τόρνευσης με κοπτικό εργαλείο από κυβικό βοριονιτρίτη (PCBN), θα προσπαθήσουμε να βρούμε μία αρχιτεκτονική τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο μετά από κατάλληλη εκπαίδευση, θα μπορεί να προσεγγίσει τις καμπύλες της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου που έχουν σχεδιαστεί βάσει των πειραμάτων. Στη συνέχεια, εφόσον βρεθεί ένα τέτοιο δίκτυο, θα επιχειρήσουμε να προσεγγίσουμε τις ίδιες καμπύλες χρησιμοποιώντας λιγότερα πειραματικά δεδομένα. Η επιλογή των σημείων αυτών, θα γίνει σύμφωνα με τις αρχές του σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments – DOE). Καλούμαστε, λοιπόν, να απαντήσουμε στο ερώτημα αν οι ερευνητές που διεξήγαγαν τα συγκεκριμένα πειράματα, θα μπορούσαν να είχαν λάβει τα ίδια αποτελέσματα διεξάγοντας λιγότερες επαναλήψεις του πειράματος, γλιτώνοντας χρόνο και χρήματα. Είναι ήδη κατανοητό, από τις έρευνες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων κατέχει εξέχοντα ρόλο στο κόστος των κατεργασιών κοπής. Έτσι, παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον η

ενσωμάτωση των μεθόδων εκμάθησης μηχανής στο ερευνητικό αυτό έργο, και αυτό θα επιχειρηθεί στο παρόν.

3.2 Πειράματα τόρνευσης

Στην έρευνά τους με τίτλο «Μία νέα σχέση για τη διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων ακριβείας», οι Α. Γ. Μάμαλης, J. Kundrak και M. Horvak επιχείρησαν να υπολογίσουν μία νέα σχέση για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου από κυβικό βοριονιτρίτη (PCBN).

Όταν χρησιμοποιούνται καινούργια και ακριβά υλικά (διαμάντι ή CBN) για την κατασκευή υπέρσκληρων κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κατεργασμένων τεμαχίων πολύ υψηλής ποιότητας και μικρών γεωμετρικών ανοχών, είναι απαραίτητη η γνώση της εξέλιξης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Αυτό σημαίνει ότι, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη και την τυχαιότητα αυτών των φαινομένων, χρειαζόμαστε καινούργιες σχέσεις σε σχέση με τις υπάρχουσες, για να υπολογίσουμε τη διάρκεια ζωής τους.

Παλαιότερα, ο Taylor ανέπτυξε την πολύ γνωστή σχέση του που υπολογίζει τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Επρόκειτο για μία απλή σχέση, που λάμβανε υπόψη αναρίθμητα πειράματα και αποτύπωνε μόνο την επίδραση της ταχύτητας κοπής στην τελική τιμή της. Από τότε, έχει γίνει μεγάλη πρόοδος. Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου έχει γίνει ακόμα πιο σημαντική παράμετρος, καθότι απαιτούνται πιο ακριβείς κοπές, μεγαλύτερης ποιότητας και σε ευρύτερη, μαζική παραγωγή. Οι οικονομικοί όροι της παραγωγής, εκφράζονται πλέον με μαθηματικό και ακριβή τρόπο, ενώ πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης μάς βοηθούν να επιλέξουμε τη βέλτιστη (πιο οικονομική) λύση. Έτσι, η έρευνα αυτή, διαμέσου θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων, προτείνει μία νέα, αξιόπιστη σχέση, για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου, σε σχέση με ποικίλες συνθήκες της κοπής.

3.2.1 Πειράματα με ΚΕ κυβικού βοριονιτρίτη

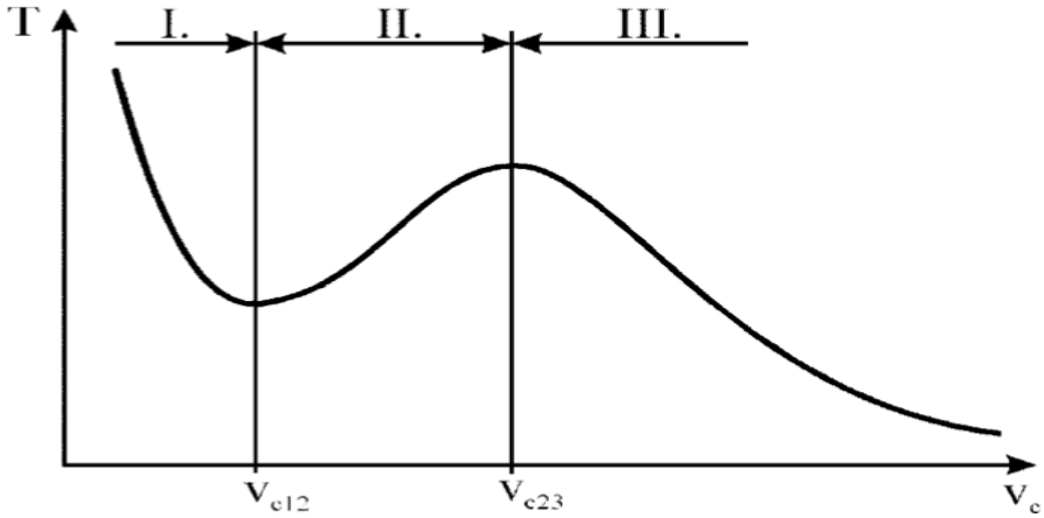
Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν να προσδιοριστεί ένα νέο μαθηματικό μοντέλο των κατεργασιών κοπής. Έτσι, τα πειράματα που έγιναν αφορούσαν εσωτερική τόρνευση (boring), καθότι η φθορά του κοπτικού εργαλείου εκεί είναι μεγαλύτερη και τα αντίστοιχα πειράματα της βιβλιογραφίας αφορούσαν κυρίως εξωτερική τόρνευση.

Στην πράξη, η κόψη του κοπτικού εργαλείου από CBN αναγεννιέται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κοπής. Εξαιτίας της πίεσης στην κοπτική ακμή του εργαλείου και της υψηλής θερμοκρασίας, αναπτύσσονται μικρορωγμές και άφθαρτοι κόκκοι υλικού αναδύονται στο επιφανειακό στρώμα του εργαλείου, εξασφαλίζοντας έτσι τη διατήρηση της κοπτικής του ικανότητας. Η αντίσταση του κοπτικού εργαλείου έναντι της φθοράς είναι μεγάλη, καθότι οι μικρορωγμές έχουν μικρό βάθος.

Η φθορά που δημιουργείται είναι κυρίως πεδίου (flank wear) και ορίζει ουσιαστικά τη διάρκεια ζωής του. Για αυτό το λόγο, επιλέγεται αυτού του τύπου η φθορά σαν κριτήριο για την αντικατάσταση του κοπτικού εργαλείου, με κριτήριο να είναι η ανάπτυξη πεδίου φθοράς 0,4mm. Μέχρι εκείνο το σημείο, τα κοπτικά εργαλεία

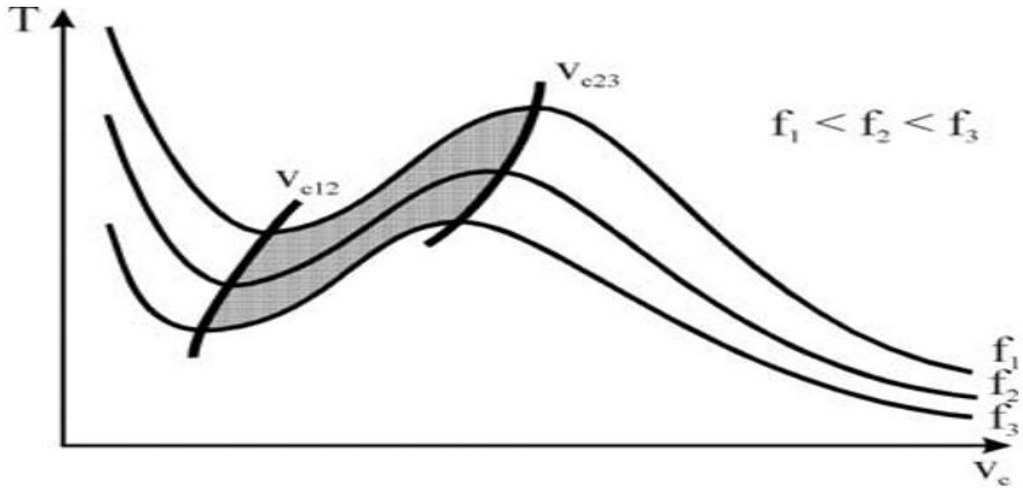
από CBN διατηρούν τις ιδιότητές τους, οι δυνάμεις κοπής που παρατηρούνται παραμένουν σταθερές και η τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας δεν αυξάνεται σημαντικά.

Τα πειράματα δείχνουν ότι, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της κοπής, η οποία επηρεάζει περισσότερο από τις άλλες συνθήκες κοπής τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, αναπτύσσεται ένα προστατευτικό στρώμα το οποίο προστατεύει το εργαλείο από τη φθορά. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτού του στρώματος δεν είναι σταθερή αρχικά ($V_c < V_{c12}$) [I]. Στη συνέχεια, το στρώμα αυτό δημιουργείται σταθερά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου αυξάνεται ($V_{c12} < V_c < V_{c23}$) [II]. Τέλος, μετά από ένα τοπικό μέγιστο, η αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε εξαφάνιση του προστατευτικού στρώματος ($V_c > V_{c23}$) [III]. Έτσι, η φθορά του κοπτικού εργαλείου αυξάνεται.



Σχήμα 3.1 Τυπική μορφή καμπύλης φθοράς εργαλείου CBN

Επίσης, οι πειραματικές δοκιμές για διαφορετικά βάθη κοπής (a_p) και προώσεις (f) έδειξαν ότι, παρότι η καμπύλη μετατοπίζεται, η γενική της μορφή δεν αλλάζει.



Σχήμα 3.2 Καμπύλη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου για διαφορετικές προώσεις

Είναι φανερό ότι, οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν ένα τοπικό μέγιστο και ένα τοπικό ελάχιστο. Σε σχέση με το μοντέλο του Taylor, το οποίο μπορεί να προβλέψει αυτή την καμπύλη μονάχα σε μία περιοχή της, οι ερευνητές προσπάθησαν να προσεγγίσουν τα πειραματικά δεδομένα με μία σχέση της μορφής:

$$\mathrm{T} = \frac{C_{T_1}}{V_c^3 + C_{T_2} V_c^2 + C_{T_3} V_c}$$

όπου V_c είναι η ταχύτητα της κοπής και C_{T1}, C_{T2}, C_{T3} είναι συντελεστές που εξαρτώνται από τις παραμέτρους της κοπής.

Ακόμη, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου μπορεί να εκφραστεί ως μήκος κοπής, ως το μήκος, δηλαδή στο οποίο μπορεί να κόψει το εργαλείο προτού χρειαστεί να το αντικαταστήσουμε. Ισχύει δε:

$$L = \mathrm{T} V_c$$

Επομένως:

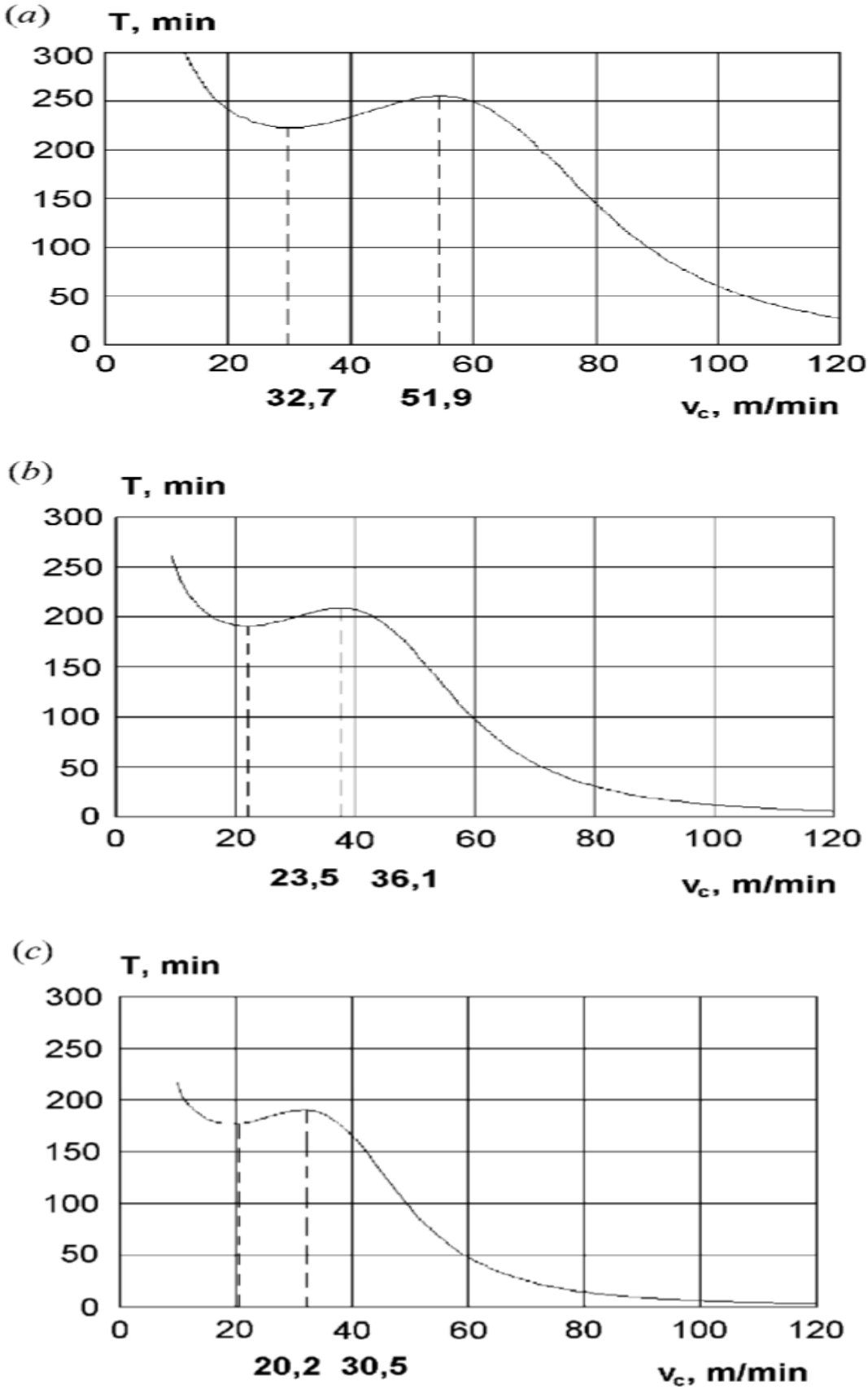
$$L = \frac{C_{T_1}}{V_c^2 + C_{T_2} V_c + C_{T_3}}$$

Οι σχέσεις αυτές περιγράφουν μία σχέση διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με πολλά ακρότατα, η θέση των οποίων εξαρτάται από τις παραμέτρους της κοπής.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες $T = f(V_c)$ μπορούν να χωριστούν πρακτικά σε τρία μέρη για τα οποία έχουμε να κάνουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις:

- Στο πρώτο μέρος, αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής μέχρι την ταχύτητα Vc12, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου μειώνεται έως ένα ελάχιστο
- Στο δεύτερο μέρος, αυξάνοντας περαιτέρω την ταχύτητα κοπής, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου αυξάνεται, μέχρι ένα τοπικό μέγιστο, στη βέλτιστη ταχύτητα κοπής
- Στο τελευταίο μέρος, με επιπλέον αύξηση της ταχύτητας κοπής, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου μειώνεται

Η συμπεριφορά αυτή παραμένει ακόμα κι αν αλλάξουμε την πρόωση ή/και το βάθος κοπής της κατεργασίας, όπως επίσης και τη διάμετρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ωστόσο, οι θέσεις των τοπικών ακροτάτων της καμπύλης (ελάχιστο και μέγιστο) μεταβάλλονται.



Σχήμα 3.3 Διάρκεια ζωής ΚΕ CBN με (a) f=0,025 mm rev^{-1} , (b) f 0,075 mm rev^{-1}, (c) f=0,125 mm rev^{-1} [a_p=0,1mm , διάμετρος 45mm]

Η πρώτη περιοχή μιας τέτοιας καμπύλης ($V_c<V_{c12}$) δεν καλύπτει τις πρακτικές μας ανάγκες, καθότι οι συνήθεις κοπές γίνονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Στη δεύτερη περιοχή της γραφικής παράστασης ($V_{c12}<V_c<V_{c23}$), είναι εξαιρετικά ασύμφορο να διεξάγουμε κατεργασίες κοπής, καθότι αυξάνοντας έστω και λίγο την ταχύτητα κοπής, καταφέρνουμε την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής ενός ούτως ή άλλως ακριβού κοπτικού εργαλείου. Έτσι, είναι πολύ εύλογο να θέλουμε να αυξήσουμε την ταχύτητα κοπής, τουλάχιστον μέχρι την τιμή του τοπικού μεγίστου (V_{c23}). Στην πράξη, ωστόσο, διεξάγουμε κοπές με ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι θα βρισκόμαστε πάντα στην τρίτη περιοχή του διαγράμματος, με την τιμή V_{c23} σαν ένα κάτω όριο της πρακτικά εφαρμοζόμενης ταχύτητας κοπής.

Διεξάγοντας περαιτέρω πειράματα, βρέθηκε ότι οι συντελεστές που εμφανίζονται στην αναλυτική σχέση υπολογισμού της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου CBN, εξαρτώνται από τις συνθήκες κοπής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, οδήγησαν στις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{c12} = C_{v_{c12}} f_{v_{c12}}^{x} a_{p v_{c12}}^{y} d_{w_{v_{c12}}}^{q}$$

$$V_{c23} = C_{v_{c23}} f_{v_{c23}}^{x} a_{p v_{c23}}^{y} d_{w_{v_{c23}}}^{q}$$

$$T_{23} = C_{T_{23}} f_{T_{23}}^{x} a_{p T_{23}}^{y} d_{w_{T_{23}}}^{q}$$

Οι εκθέτες x, y, q και της σταθεράς C δίνονται από τον παρακάτω πίνακα:

	C	x	y	q
V_{c12}	3.50	−0.30	−0.11	0.23
V_{c23}	3.50	−0.32	−0.08	0.34
T_{23}	52.65	−0.66	−0.18	0.16

Με τη βοήθεια αυτών των σχέσεων, υπολογίζονται οι συντελεστές της εξίσωσης της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου από CBN ως εξής:

$$C_{T3} = 3V_{c12}V_{c23}$$

$$C_{T2} = -\frac{3}{2}(V_{c12} + V_{c23})$$

$$C_{T1} = T_{23}(V_{c23}^{3} + C_{T2}V_{c23}^{2} + C_{T3}V_{c23})$$

Καθίσταται πλέον δυνατό, στην περίπτωση που δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα, να υπολογίσουμε από αυτή τη νέα εξίσωση, τη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου από CBN συναρτήσει των συνθηκών κοπής. Αυτό θα μας φανεί πολύ χρήσιμο στη συνέχεια, όταν θα θελήσουμε να χρησιμοποιήσουμε δεδομένα για τα οποία δεν έχουν διεξαχθεί πραγματικά πειράματα, αλλά θα προσεγγισθούν από τη σχέση της διάρκειας ζωής του ΚΕ, η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους καλής εποπτείας:

$$\mathrm{T} = \frac{C_{T_1}}{V_c^3 + C_{T_2} V_c^2 + C_{T_3} V_c}$$

Τα πειράματα που διεξήχθησαν για να προκύψουν αυτές οι σχέσεις αριθμούν τις 64 επαναλήψεις και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η χρησιμότητά τους θα γίνει φανερή παρακάτω:

f (mm rev^{-1})	a_p (mm)	T (min)								
		v_c (m min^{-1})								
		11	20	29	50	60	68	92	105	120
0.025	0.1	357	241	230	276	256	220	81	50	28
0.075	0.1	249	198	209	157	101	66	18	10	6
0.125	0.1	203	183	184	103	51	30	8	5	3
0.05	0.05	328	238	246	258	190	142	43	25	15
0.05	0.15	258	194	203	216	136	93	25	14	8
0.05	0.25	229	179	184	183	108	70	18	10	6

Σχήμα 3.4 Πειραματικά δεδομένα κοπής bore 45mm με ΚΕ από CBN

Με την ολοένα αυξανόμενη χρήση των υπέρσκληρων υλικών στις κατεργασίες κοπής, και τις αυξανόμενες απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας των κατεργασμένων τεμαχίων, η διερεύνηση της πιθανότητας οικονομικής χρήσης των κοπτικών εργαλείων από CBN κρίθηκε αναγκαία. Έτσι, η έρευνα αυτή πρότεινε μία νέα εξίσωση για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής τέτοιων εργαλείων συναρτήσει των βασικών συνθηκών της κοπής. Τα πλεονεκτήματά της, έναντι προγενέστερων προσπαθειών, είναι ότι αφορά όλο το φάσμα ταχυτήτων κοπής, λαμβάνει υπόψη την πρόωση και το βάθος κοπής και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στην πράξη.

3.3 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής ΚΕ με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Πλέον, έχουμε παρουσιάσει όλη τη σχετική θεωρία που είναι απαραίτητη για την κατανόηση των διαδικασιών που θα παρουσιαστούν σε αυτή την ενότητα. Αρχικά, παρουσιάσαμε την κατεργασία της κοπής, και ιδιαίτερα αυτή της τόρνευσης. Αυτό έγινε, διότι τα πειράματα στα οποία θα βασιστεί η ανάλυση έγιναν όσον αφορά εσωτερική τόρνευση. Στη συνέχεια, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα εργαλεία που κατασκευάζονται από CBN, τα οποία επίσης χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά τα πειράματα. Έπειτα, παρουσιάστηκε η βασική θεωρία ανάλυσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Πιο αναλυτικά, η παρούσα ενότητα θα προσπαθήσει να απαντήσει στο ερώτημα του αν μπορούμε να βρούμε μία αρχιτεκτονική τεχνητού νευρωνικού δικτύου, η οποία μπορεί, μετά από εκπαίδευση με τα παρεχόμενα πειράματα, να προσεγγίσει τις καμπύλες που προέκυψαν από αυτά.

Για το σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε το περιβάλλον MATLAB, στο οποίο μπορούμε να δημιουργήσουμε νευρωνικά δίκτυα είτε με τη συγγραφή κώδικα, είτε μέσω έτοιμων εργαλείων που μας παρέχει (nntool). Τα δε πειραματικά σημεία με τα οποία θα εκπαιδεύσουμε τα πιθανά δίκτυα είναι αυτά του πίνακα 3.4, ο οποίος επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους σαφήνειας:

α/α	f(mm)	ap(mm)	Vc(m/min)	T(min)
1	0,025	0,1	11	357
2	0,025	0,1	20	241
3	0,025	0,1	29	230
4	0,025	0,1	50	276
5	0,025	0,1	60	256
6	0,025	0,1	68	220
7	0,025	0,1	92	81
8	0,025	0,1	105	50
9	0,025	0,1	120	28
10	0,75	0,1	11	249
11	0,75	0,1	20	198
12	0,75	0,1	29	209
13	0,75	0,1	50	157
14	0,75	0,1	60	101
15	0,75	0,1	68	66
16	0,75	0,1	92	18
17	0,75	0,1	105	10
18	0,75	0,1	120	6
19	0,125	0,1	11	203
20	0,125	0,1	20	183
21	0,125	0,1	29	184

22	0,125	0,1	50	103
23	0,125	0,1	60	51
24	0,125	0,1	68	30
25	0,125	0,1	92	8
26	0,125	0,1	105	5
27	0,125	0,1	120	3
28	0,05	0,05	11	328
29	0,05	0,05	20	238
30	0,05	0,05	29	246
31	0,05	0,05	50	258
32	0,05	0,05	60	190
33	0,05	0,05	68	142
34	0,05	0,05	92	43
35	0,05	0,05	105	25
36	0,05	0,05	120	15
37	0,05	0,15	11	258
38	0,05	0,15	20	194
39	0,05	0,15	29	203
40	0,05	0,15	50	216
41	0,05	0,15	60	136
42	0,05	0,15	68	93
43	0,05	0,15	92	25
44	0,05	0,15	105	14
45	0,05	0,15	120	8
46	0,05	0,25	11	229
47	0,05	0,25	20	179
48	0,05	0,25	29	184
49	0,05	0,25	50	183
50	0,05	0,25	60	108
51	0,05	0,25	68	70
52	0,05	0,25	92	18
53	0,05	0,25	105	10
54	0,05	0,25	120	6

Σχήμα 3.5 Δεδομένα εκπαίδευσης ANN

Τα δεδομένα για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου εισάγονται στο MATLAB με τη μορφή διανύσματος που περιέχει όλες τις μεταβλητές εισόδου. Ένα τέτοιο διάνυσμα έχει τη μορφή $[f, a_p, Vc]^T$. Έτσι, έχουμε 54 τέτοια διανύσματα, ένα για κάθε πειραματικό σημείο που θα χρησιμοποιηθεί. Δημιουργούμε λοιπόν ένα πίνακα που περιέχει και τα 54 πειραματικά σημεία, με 54 στήλες και 3 γραμμές, καθότι αυτό είναι ο τρόπος που τα «διαβάζει» το MATLAB.

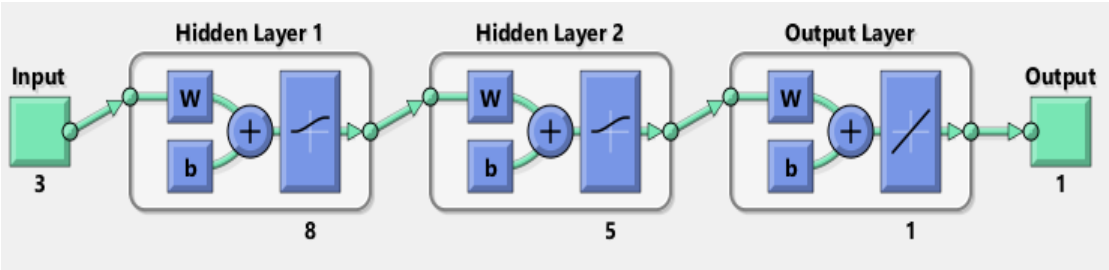
Σημειώνεται ότι, το MATLAB θα χρησιμοποιήσει το 70% των 54 σημείων για την εκπαίδευση, 15% για την επικύρωση (validation) και το εναπομείναν 15% για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Τα δε δεδομένα, διαιρούνται με τη μέγιστη τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής ώστε να έχουν εύρος από 0 έως 1.

Το δείγμα εκπαίδευσης του δικτύου, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει το εξεταζόμενο πρόβλημα. Το δείγμα επικύρωσης, χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την ικανότητα γενίκευσης του δικτύου, αφού θα επιλεχθεί η διακοπή της διαδικασίας όταν το σφάλμα επικύρωσης αυξηθεί για 6 συνεχόμενες εποχές. Τέλος, το δείγμα ελέγχου (test) χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των διάφορων αρχιτεκτονικών του δικτύου, μέσω των τιμών του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης και των σφαλμάτων.

Οι δοκιμές που έγιναν, αφορούσαν δίκτυα με ένα ή δύο κρυμμένα επίπεδα, αφού τελικά προέκυψαν, όπως θα φανεί, ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία καθιστούν τη διερεύνηση πιο πολύπλοκων αρχιτεκτονικών άσκοπη. Δοκιμάστηκαν δίκτυα με 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 νευρώνες σε κάθε κρυμμένο επίπεδο, ενώ είναι φανερό ότι το επίπεδο εισόδου έχει 3 νευρώνες (πρόωση, βάθος κοπής, ταχύτητα κοπής) και το επίπεδο εξόδου έχει 1 νευρώνα, τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, δοκιμάζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς αριθμού νευρώνων και επιπέδων, εκπαιδεύσαμε τα δίκτυα. Επειδή, τα δείγματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου επιλέγονται τυχαία, η εκπαίδευση επαναλήφθηκε πολλές φορές (με τυχαίους αρχικούς συντελεστές βαρύτητας) ώστε να φανεί ποιο δίκτυο δίνει τις καλύτερες τιμές γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) σταθερά και ανεξάρτητα από τις αρχικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας.

Επίσης, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Lavenberg – Marqduart, με τη διαδικασία να σταματάει αν μετά από 6 εποχές, το σφάλμα του δείγματος επικύρωσης έχει αυξηθεί συνεχώς. Η δε συνάρτηση ενεργοποίησης κάθε νευρώνα είναι η σιγμοειδής συνάρτηση

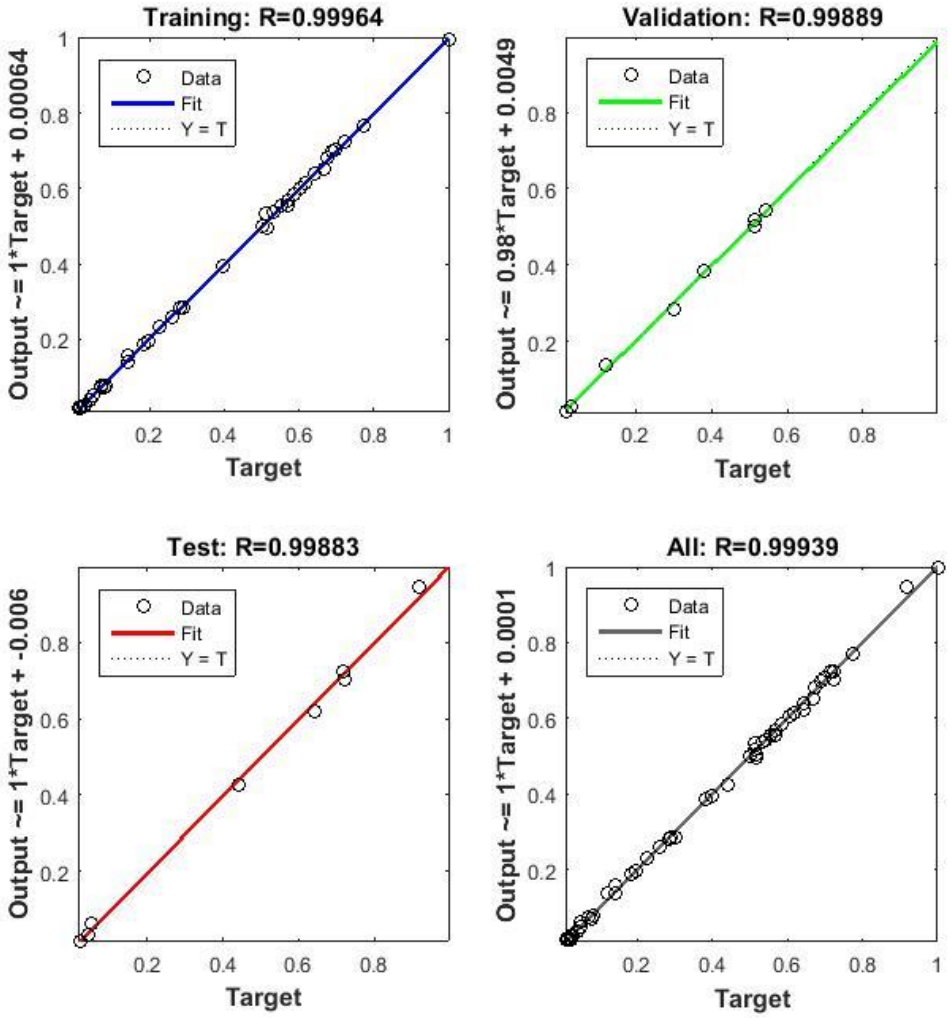
Πλήθος δοκιμών εκπαίδευσης που έγιναν, έδειξαν ότι υπάρχει δίκτυο που προσεγγίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο, το οποίο έχει δύο κρυμμένα επίπεδα, με 8 νευρώνες στο πρώτο και 5 νευρώνες στο δεύτερο. Είναι δηλαδή αρχιτεκτονικής 3-8-5-1.



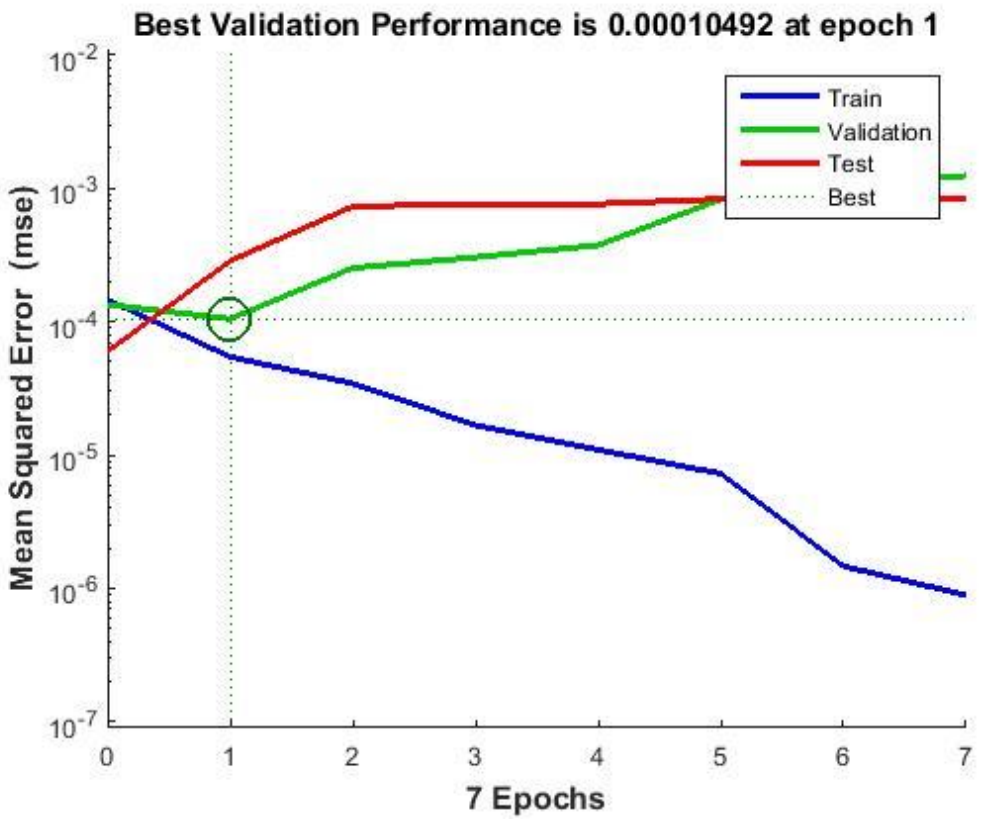
Σχήμα 3.6 Βέλτιστη αρχιτεκτονική τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Το MATLAB, μάς επιτρέπει να εξάγουμε διαγράμματα τα οποία δείχνουν την εξέλιξη του μέσου τετραγωνικού σφάλματος κατά την εκπαίδευση του δικτύου, καθώς και το συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης τόσο του δείγματος εκπαίδευσης όσο και αυτών της επικύρωσης και του ελέγχου. Ο συντελεστής παλινδρόμησης, εκφράζει το κατά πόσο το δίκτυο στο οποίο αναφέρεται, προσεγγίζει τα διανύσματα εξόδου σε

σχέση με τα αντίστοιχα διανύσματα εισόδου του δείγματος. Έτσι, παρουσιάζουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα ευθύς αμέσως:



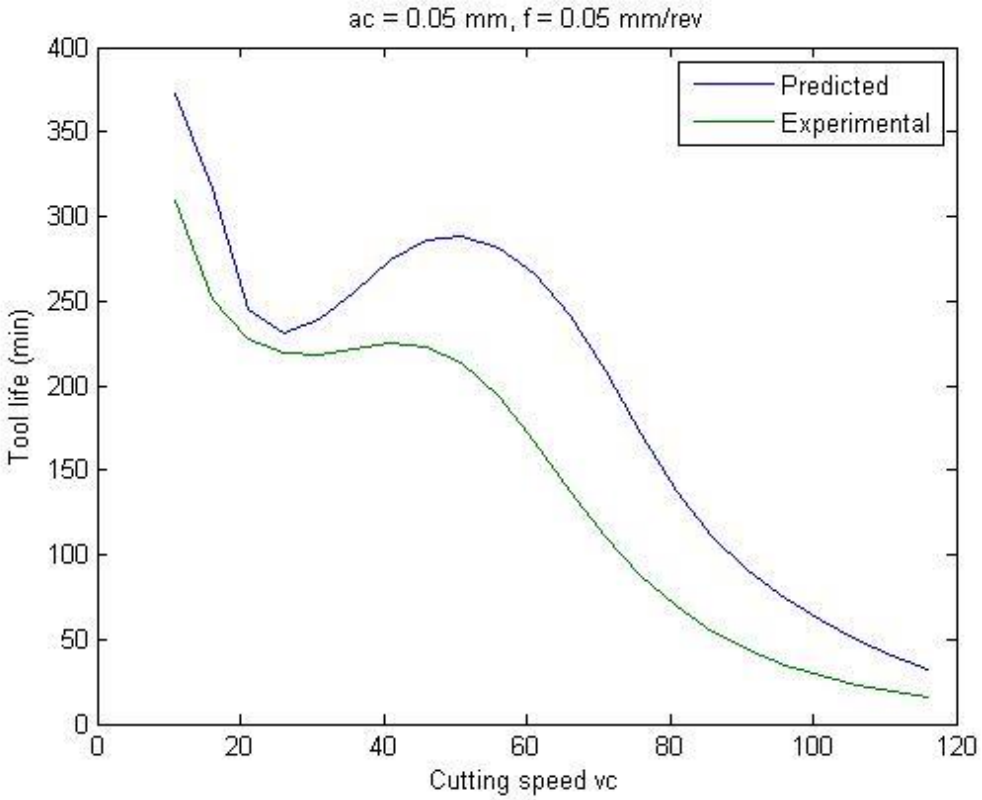
Σχήμα 3.7 Συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης δικτύου 3-8-5-1

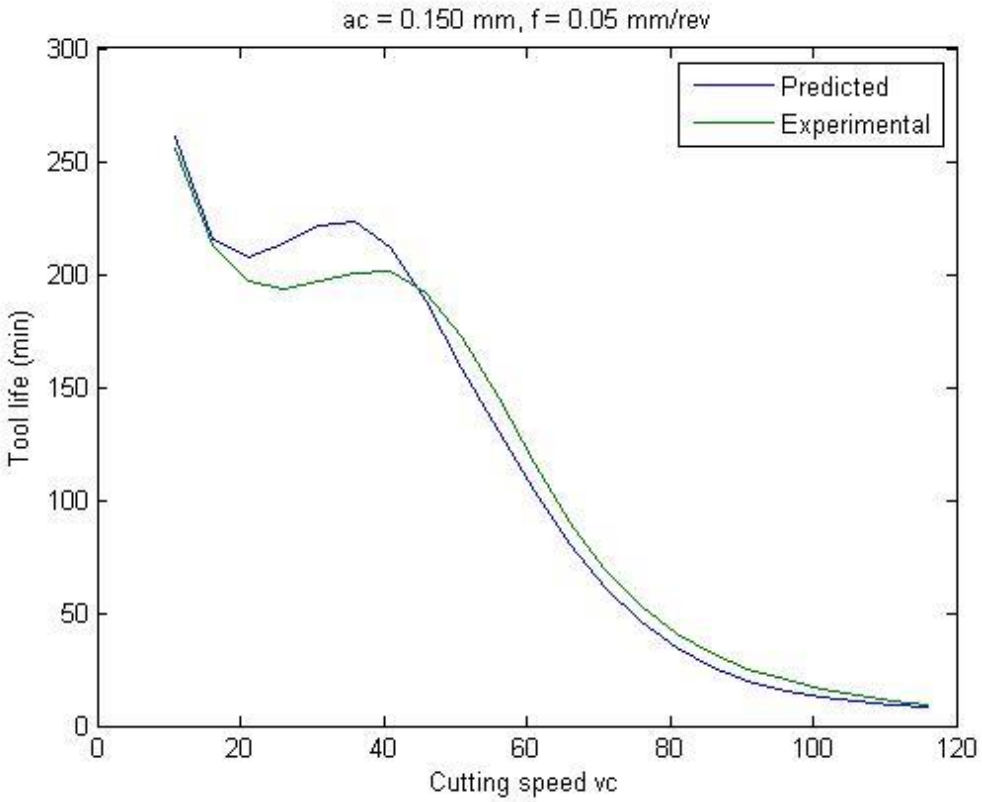


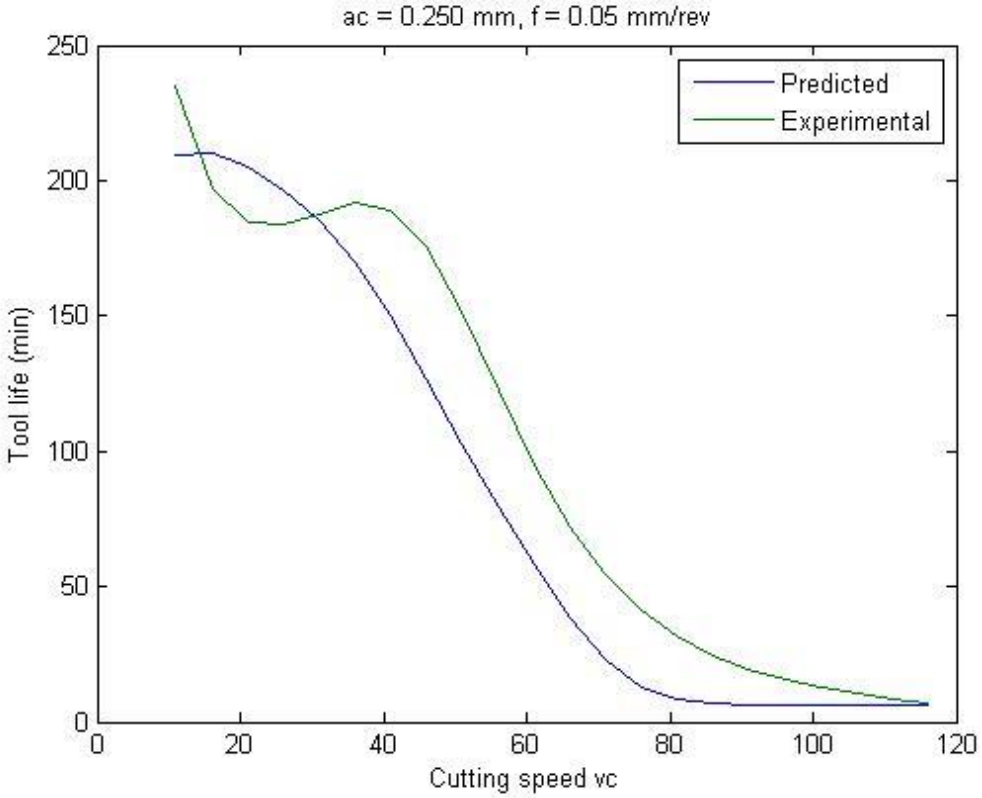
Σχήμα 3.8 Μέσα τετραγωνικά σφάλματα δικτύου 3-8-5-1

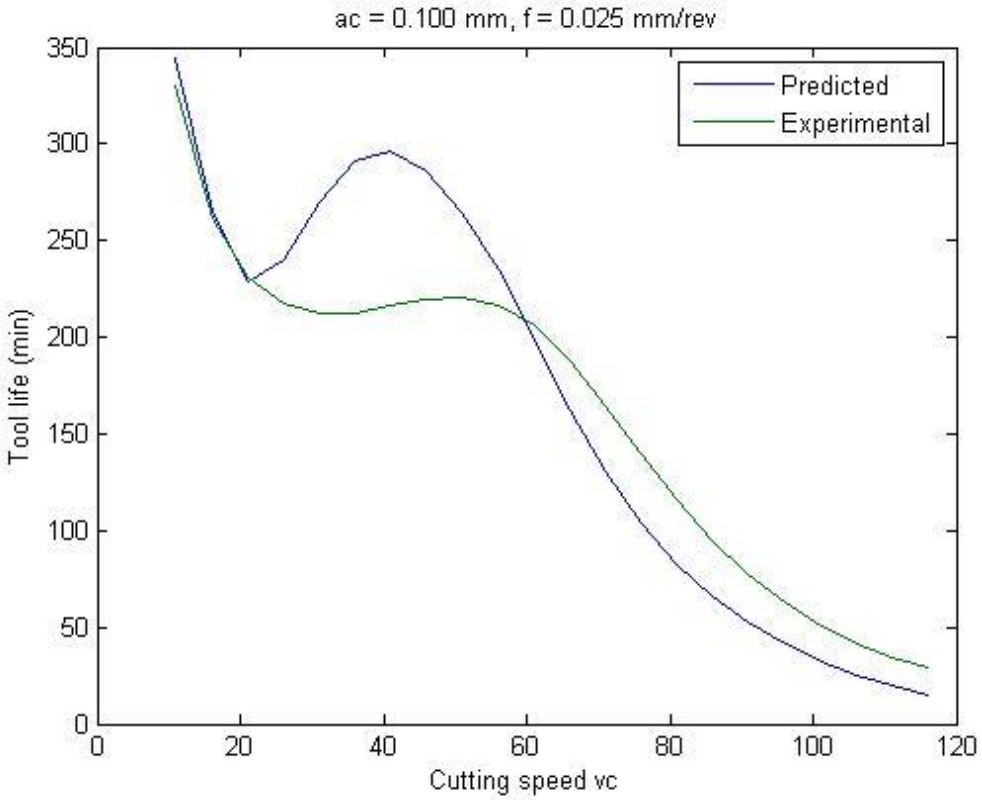
Παρατηρούμε ότι πρακτικά, οι συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης των δειγμάτων είναι κοντά στο 1. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο προσεγγίζει σχεδόν ακριβώς τις πειραματικές τιμές εξόδου, δεδομένων των αντίστοιχων πειραματικών τιμών εισόδου.

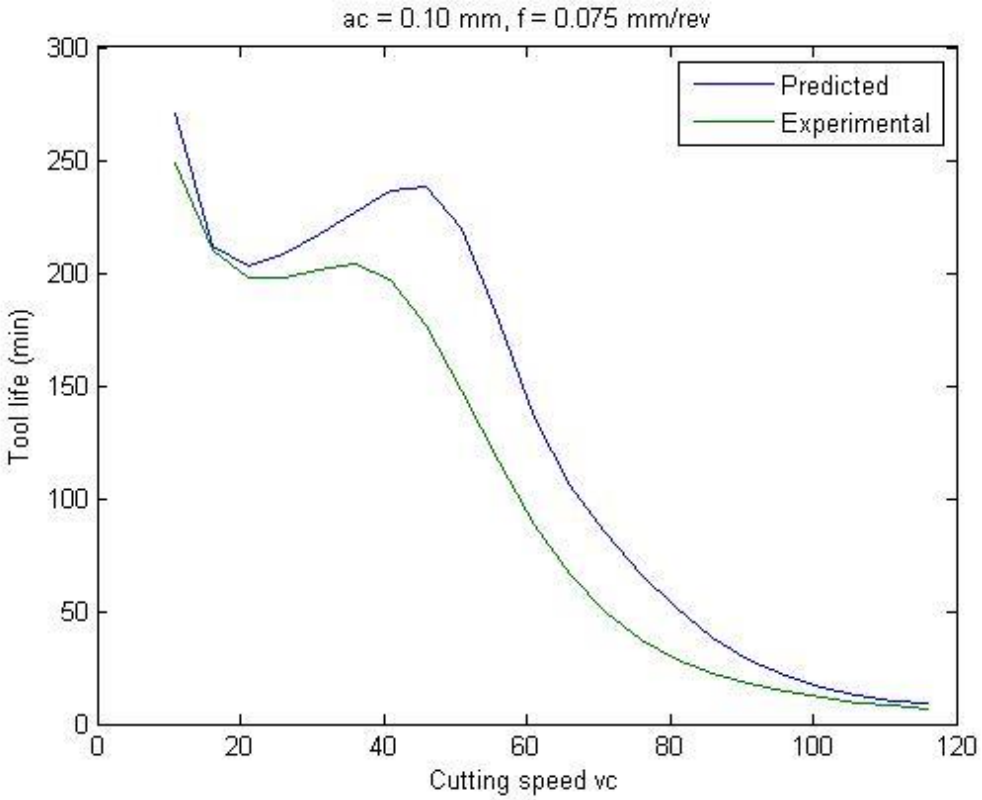
Επίσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφόρων δειγμάτων είναι σε πολύ χαμηλό επίπεδο, δεδομένου ότι οι τιμές εξόδου κυμαίνονται από 0 έως 1. Υποψιαζόμαστε, λόγω των πολύ καλών αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου δικτύου, ότι το δίκτυο αυτό έχει πολύ καλή ικανότητα γενίκευσης. Για να το εξετάσουμε όμως αυτό, θα πρέπει να σχεδιάσουμε καμπύλες, αντίστοιχες με αυτές των πειραμάτων που διεξήχθησαν και αναφέρονται στην προηγούμενη ενότητα. Στο ίδιο διάγραμμα, θα σχεδιάσουμε και τις πειραματικές καμπύλες, ώστε να μπορέσουμε άμεσα να τις συγκρίνουμε. Έτσι, τελικά, θα έχουμε 6 καμπύλες, για την καθεμία από τις οποίες το βάθος κοπής και η πρόωση θα είναι σταθερές, ενώ θα σχεδιάζεται η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου συναρτήσει της ταχύτητας κοπής. Το MATLAB, μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε εύκολα αυτά τα διαγράμματα, και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:

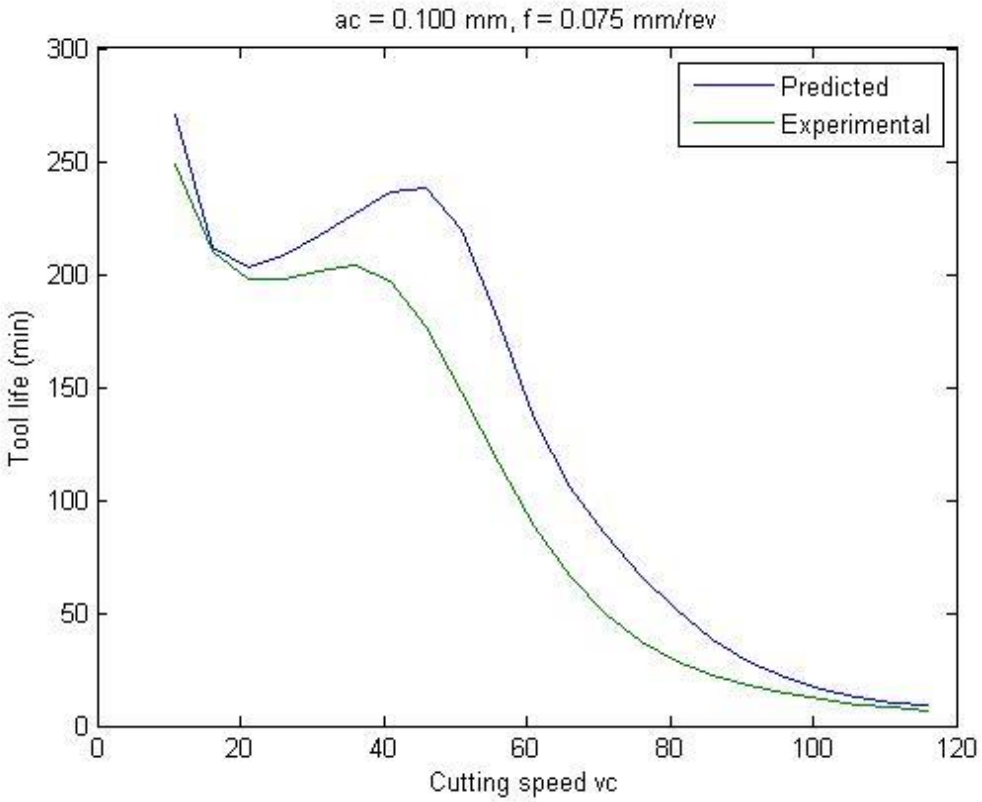

ac = 0.05 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
350
400
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.150 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.250 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.100 mm, f = 0.025 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
350
0
20
40
60
80
100
120





Σχήμα 3.9 Πραγματικές και προβλεπόμενες καμπύλες διάρκειας ζωής ΚΕ από CBN

Με μία πρώτη παρατήρηση, βλέπουμε ότι το δίκτυο έχει καταφέρει να προσεγγίσει τη μορφή των καμπυλών που προκύπτουν από τα πειράματα. Ωστόσο, σε

ορισμένες περιοχές, το σφάλμα που προκύπτει ανάμεσα στην πειραματική πρόβλεψη της διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και στην πρόβλεψη με τη χρήση νευρωνικών δικτύων είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό, όμως που μας ενδιαφέρει στην πράξη, είναι η κοπή στην περιοχή των διαγραμμάτων μετά το τοπικό μέγιστο των πειραματικών καμπυλών. Εκεί, οι καμπύλες που προέκυψαν από το δίκτυο 3-8-5-1 έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τις πειραματικές. Μάλιστα, σε 4 από τις 6 περιπτώσεις, προβλέπουν μικρότερη διάρκεια ζωής από την πειραματικά προσδιοριζόμενη, ενώ στις υπόλοιπες δύο το σφάλμα ανάμεσα στην πειραματική και την προβλεπόμενη καμπύλη είναι ελάχιστες. Τα συμπεράσματα αυτά, τα οποία φαίνονται εποπτικά, μπορούμε να επαληθεύσουμε μέσω του MATLAB, χρησιμοποιώντας την εντολή sim. Με την εντολή sim, εισάγουμε ένα διάνυσμα με τις συνθήκες εισόδου (inputs), και με βάση το υπάρχον νευρωνικό δίκτυο, το MATLAB μας πληροφορεί για την αντίστοιχη μεταβλητή εξόδου (διάρκεια ζωής ΚΕ) που αντιστοιχεί σε αυτό. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό το δίκτυο για να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου από CBN σε μεγάλες ταχύτητες κοπής.

Στη συνέχεια, θα επιχειρήσουμε να ενσωματώσουμε στη διαδικασία που προηγήθηκε, μεθόδους σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments – DOE). Τουτέστιν, θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε στο αν οι ερευνητές, θα μπορούσαν να προσεγγίσουν τις συγκεκριμένες καμπύλες διεξάγοντας λιγότερα από τα 54 πειράματα που διεξήγαγαν στην πραγματικότητα, παίρνοντας το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

3.4 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής ΚΕ με τη χρήση μεθόδων σχεδιασμού πειραμάτων

Στην προηγούμενη ενότητα, παρουσιάστηκε μία σειρά από 54 πειράματα τόρνευσης με κοπτικό εργαλείο από CBN. Τα πειράματα αυτά πρότειναν ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης της διάρκειας ζωής του συγκεκριμένου κοπτικού εργαλείου και χαράχθηκαν οι γραφικές παραστάσεις της διάρκειας ζωής του συναρτήσει των συνθηκών κοπής. Στη συνέχεια, βρέθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, το οποίο, αφού εκπαιδεύτηκε με δεδομένα τα 54 διεξαχθέντα πειράματα, ελέγχθηκε ως προς το αν προσεγγίζει τις πειραματικές γραφικές παραστάσεις που μας πληροφορούν για τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου συναρτήσει των συνθηκών κοπής.

Στις επόμενες ενότητες, αφού παρουσιάσουμε τη βασική θεωρία που υποστηρίζει τις μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν, θα επιχειρήσουμε, διατηρώντας σταθερή την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου, να προσεγγίσουμε το ίδιο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας λιγότερα πειραματικά σημεία. Η επιλογή αυτή, δε θα γίνει τυχαία. Θα χρησιμοποιηθούν για αυτό, οι μέθοδοι που αφορούν στο βέλτιστο σχεδιασμό πειραμάτων (design of experiments – DOE).

Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων, μεταβάλλουμε μία σειρά παραγόντων και παρατηρούμε τις αλλαγές που επιφέρουν αυτές οι μεταβολές στις μεταβλητές εξόδου που μας ενδιαφέρουν. Οι μέθοδοι DOE, είναι μία αποδοτική διαδικασία για την επιλογή των πειραμάτων που θα διεξαχθούν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ορθών γενικών συμπερασμάτων. Ο σχεδιασμός πειραμάτων, ξεκινάει με την επιλογή των μεταβλητών που θα μελετηθούν. Στην παρούσα εργασία, μεταβλητές εισόδου

θεωρούνται οι συνθήκες κοπής (βάθος κοπής, πρόωση, ταχύτητα κοπής) και μεταβλητή εξόδου η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου από CBN. Ένας καλός σχεδιασμός πειραμάτων, μεγιστοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνουμε από ένα όσο το δυνατόν μικρότερο πλήθος πειραμάτων.

Γενικά, οι μέθοδοι DOE χρησιμοποιούνται για τους εξής σκοπούς:

- Σύγκριση μεταξύ δύο επιλογών (comparative experiment)
- Διερεύνηση του βαθμού επίδρασης των μεταβλητών (screening experiment)
- Μελέτη των ιδανικών παραμέτρων λειτουργίας μίας μηχανής
- Μείωση της διασποράς των αποτελεσμάτων
- Πρόβλεψη αναλυτικού μοντέλου (regression modeling)

Εδώ, θα προσπαθήσουμε με τις μεθόδους που προτάθηκαν από τον Taguchi, χρησιμοποιώντας διάφορα επίπεδα για κάθε μεταβλητή εισόδου, να διεξάγουμε την ίδια ανάλυση που έγινε στην προηγούμενη ενότητα. Για το λόγο αυτό, και υποψιασμένοι από το γεγονός ότι οι καμπύλες που μελετάμε παρουσιάζουν δύο τοπικά ακρότατα, θα επιλέξουμε τρία επίπεδα για τις 3 μεταβλητές εισόδου. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά ένα πείραμα με 3^3 σημεία, στο οποίο θα δοκιμαστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για τα τρία επίπεδα των μεταβλητών. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν οι πίνακες L_{16} και L_9 κατά Taguchi με 16 και 9 σημεία αντίστοιχα.

3.4.1 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με πειράματα Full Factorial

Κατά το σχεδιασμό αυτού του πειράματος, θα επιλέξουμε να μελετήσουμε τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε τρία επίπεδα των τριών μεταβλητών εισόδου. Θα υπολογιστούν, μάλιστα, όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των μεταβλητών αυτών και η διάρκεια ζωής που προκύπτει από τον καθένα. Έτσι, θα προκύψουν συνολικά 3^3=27 πειραματικά σημεία (διανύσματα εισόδου – εξόδου). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, θα εκπαιδεύσουμε το δίκτυο της προηγούμενης ενότητας και θα σχεδιάσουμε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, συγκρίνοντάς τες και πάλι με τις πραγματικές που προέκυψαν από τα πειράματα. Επειδή, εδώ, χρησιμοποιούμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των παραμέτρων εισόδου, το πείραμα ονομάζεται Full Factorial. Είναι, εύλογο, ότι οι τιμές της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου που δεν έχουν υπολογιστεί πειραματικά, θα υπολογιστούν απ' ευθείας από τις αναλυτικές σχέσεις της ενότητας 3.1 που εδώ επαναλαμβάνονται:

$$C_{T3} = 3V_{c12}V_{c23}$$

$$C_{T2} = -\frac{3}{2}(V_{c12} + V_{c23})$$

$$C_{T1} = T_{23}(V_{c23}^3 + C_{T2}V_{c23}^2 + C_{T3}V_{c23})$$

	C	x	y	q
V_{c12}	3.50	−0.30	−0.11	0.23
V_{c23}	3.50	−0.32	−0.08	0.34
T_{23}	52.65	−0.66	−0.18	0.16

$$T = \frac{C_{T_1}}{V_c^3 + C_{T_2} V_c^2 + C_{T_3} V_c}$$

Το Full Factorial πείραμα μας, προβλέπει τους εξής συνδυασμούς επιπέδων για τις μεταβλητές εισόδου (πρόωση, βάθος κοπής, ταχύτητα κοπής).

α/α	**f(mm)**	**ap(mm)**	**Vc(m/min)**
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	1	2	1
5	2	2	1
6	3	2	1
7	1	3	1
8	2	3	1
9	3	3	1
10	1	1	2
11	2	1	2
12	3	1	2
13	1	2	2
14	2	2	2
15	3	2	2
16	1	3	2
17	2	3	2
18	3	3	2
19	1	1	3
20	2	1	3
21	3	1	3
22	1	2	3
23	2	2	3
24	3	2	3
25	1	3	3
26	2	3	3
27	3	3	3

Σχήμα 3.10 Πειράματα 3^3 πειράματος Full Factorial

Το εύρος μεταβολής των τιμών των μεταβλητών εισόδου είναι το εξής:

- f από 0,025 έως 0,125 mm
- a_p από 0,05 έως 0,25 mm
- Vc από 11 έως 120 m/min

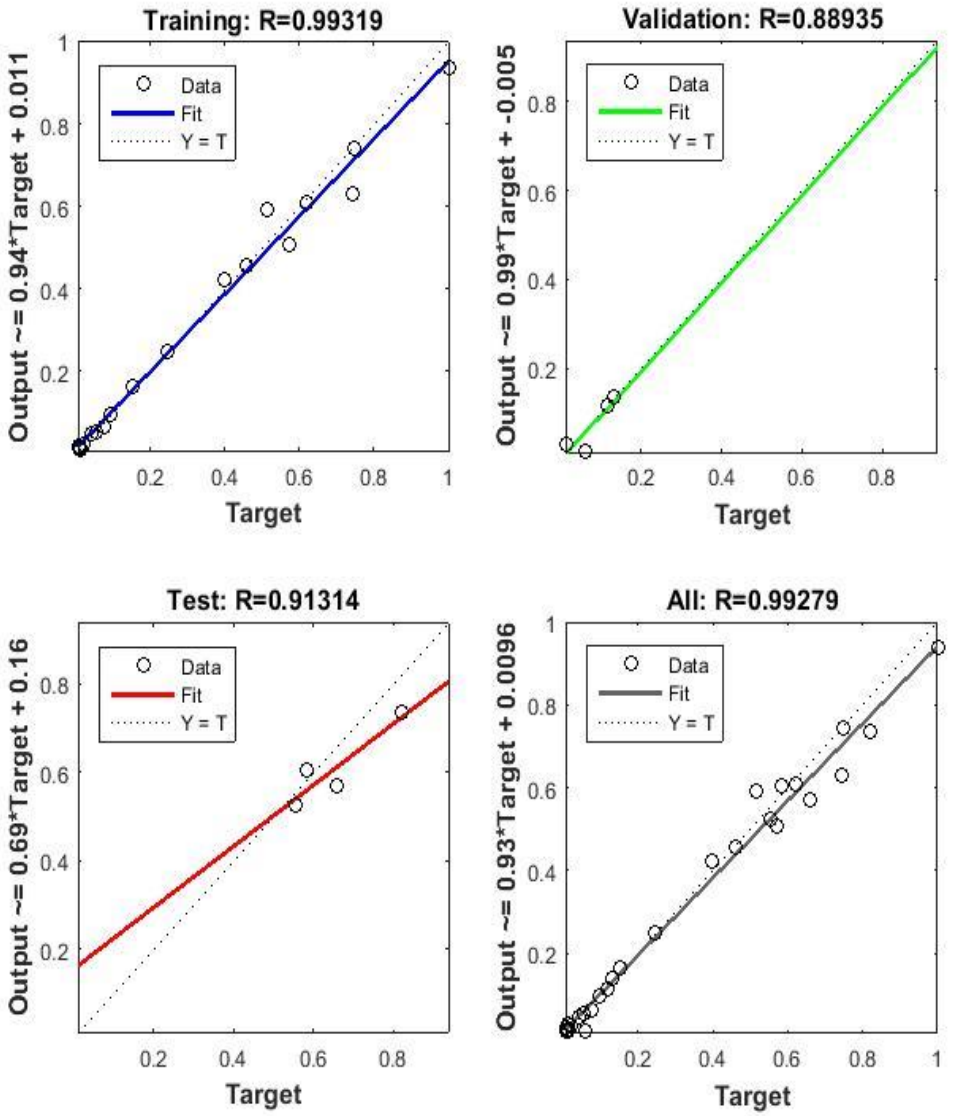
Έτσι, θα επιλέξουμε σαν πρώτο επίπεδο τις ελάχιστες τιμές και σαν τρίτο επίπεδο τις μέγιστες τιμές των μεταβλητών. Το 2ο επίπεδο θα επιλεγεί ακριβώς στη μέση του εύρους των τιμών. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας, ο οποίος περιέχει τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών εισόδου, καθώς και την αντίστοιχη διάρκεια ζωής που προκύπτει από την αναλυτική σχέση υπολογισμού της:

α/α	**f(mm)**	**ap(mm)**	**Vc(m/min)**	Tmin)
1	0,025	0,05	11	374,259
2	0,025	0,15	11	306,9624
3	0,025	0,25	11	280,1129
4	0,075	0,05	11	278,684
5	0,075	0,15	11	232,3164
6	0,075	0,25	11	213,7671
7	0,125	0,05	11	246,959
8	0,125	0,15	11	207,8904
9	0,125	0,25	11	192,2516
10	0,025	0,05	65,5	218,3779
11	0,025	0,15	65,5	171,9004
12	0,025	0,25	65,5	149,1911
13	0,075	0,05	65,5	92,2258
14	0,075	0,15	65,5	56,1769
15	0,075	0,25	65,5	43,9921
16	0,125	0,05	65,5	48,6775
17	0,125	0,15	65,5	28,4585
18	0,125	0,25	65,5	22,0782
19	0,025	0,05	120	35,4215
20	0,025	0,15	120	20,4917
21	0,025	0,25	120	15,8737
22	0,075	0,05	120	8,2232
23	0,075	0,15	120	4,8579
24	0,075	0,25	120	3,8108
25	0,125	0,05	120	4,3055
26	0,125	0,15	120	2,5781
27	0,125	0,25	120	2,035

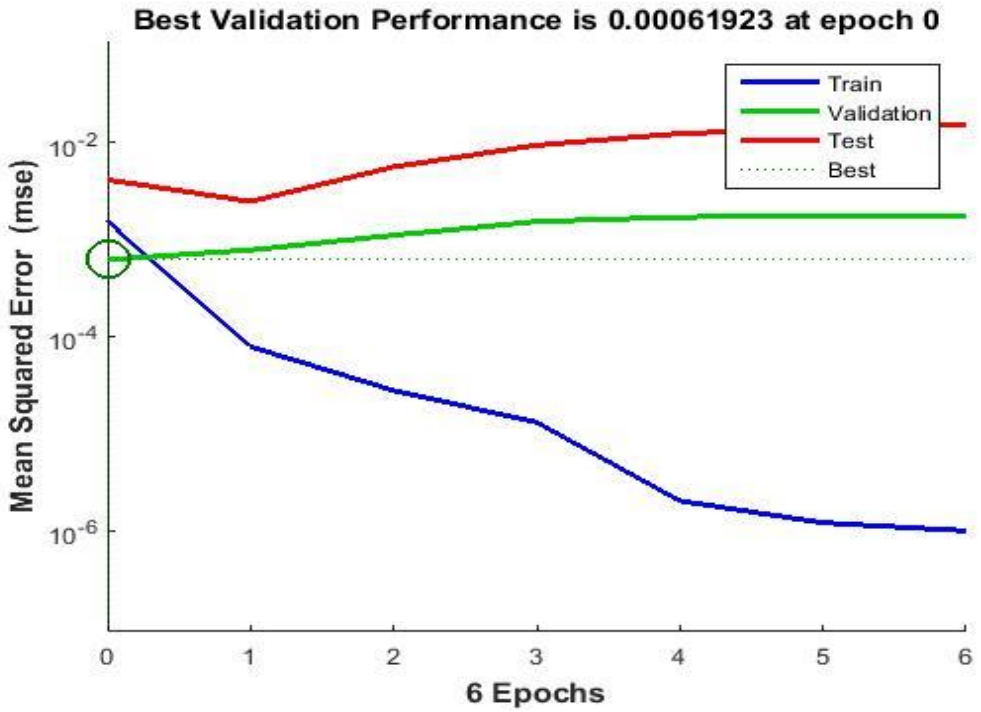
Σχήμα 3.11 Τιμές εισόδου – εξόδου πειράματος Full Factorial

Πάλι με τη βοήθεια του MATLAB, εκπαιδεύουμε το 3-8-5-1 δίκτυο που επιλέξαμε στην ενότητα 3.1 ως αυτό που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την προσέγγιση της αναλυτικής σχέσης διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου από CBN.

Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης φαίνονται παρακάτω:

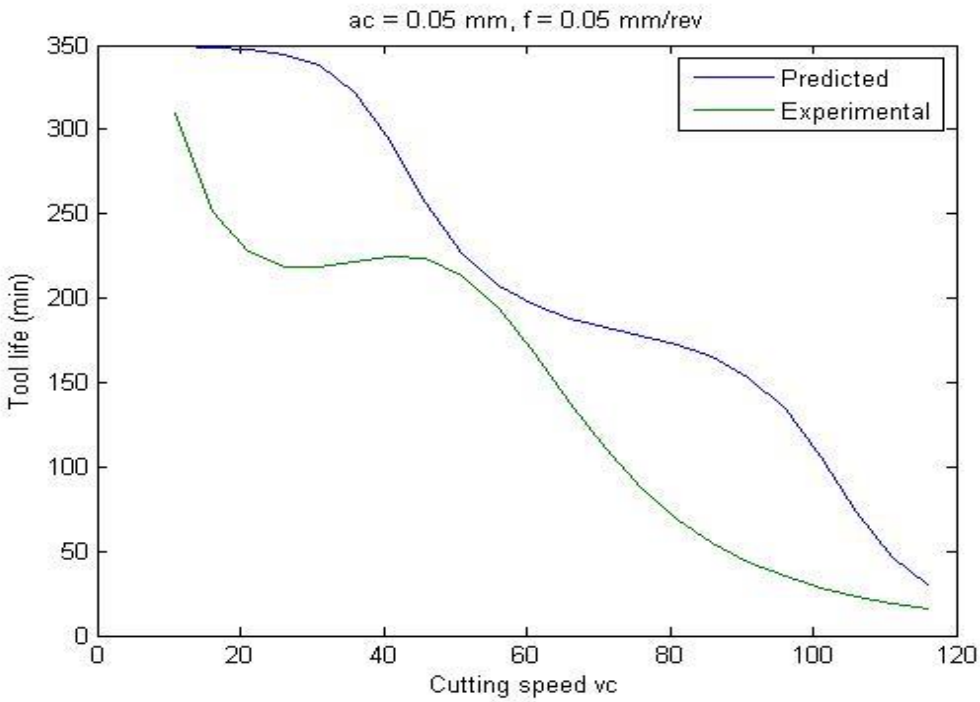


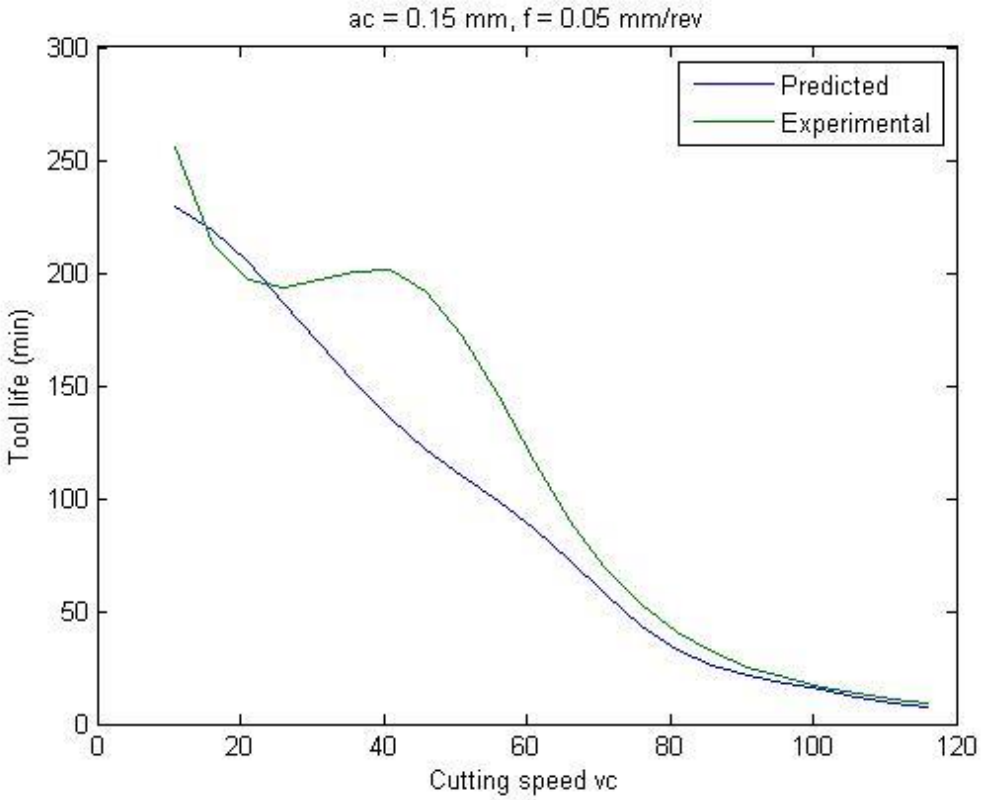
Σχήμα 3.12 Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης Full Factorial νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ΚΕ από CBN

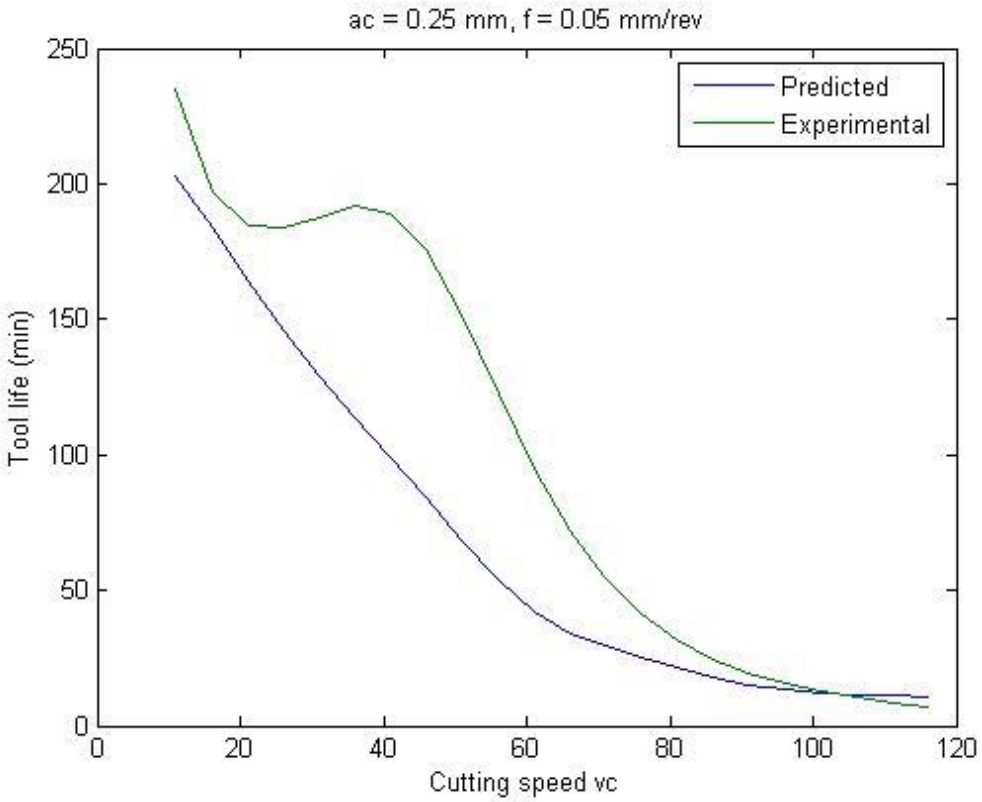


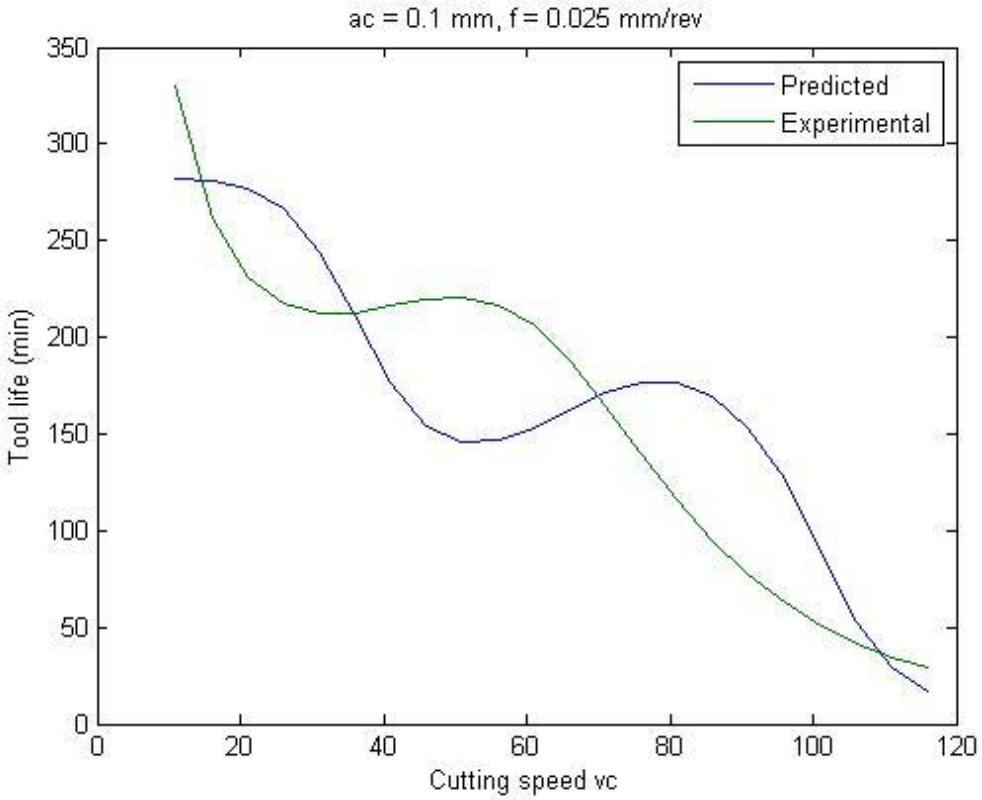
Σχήμα 3.13 Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης Full Factorial νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ΚΕ από CBN

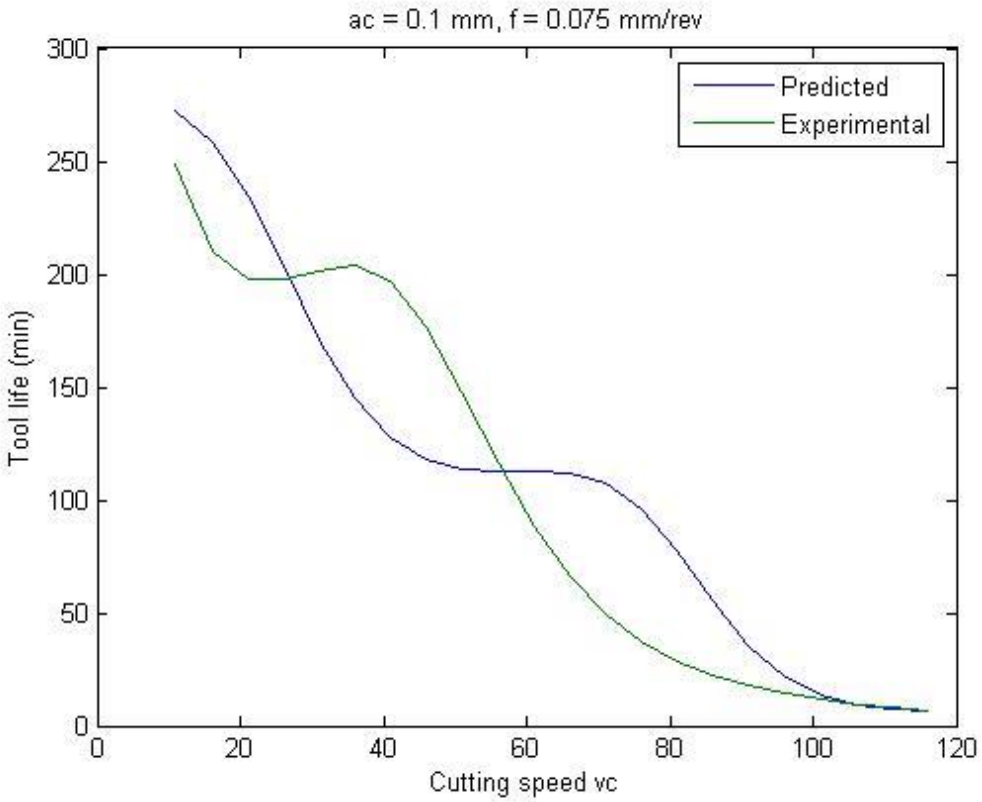
Παρατηρούμε ότι σε σχέση με το αρχικό νευρωνικό δίκτυο, τα σφάλματα αυξήθηκαν ενώ η γραμμική παλινδρόμηση, τουλάχιστον στο δείγμα ελέγχου μειώθηκε. Παρόλα αυτά, οι τιμές τους είναι και πάλι πολύ ικανοποιητικές. Το γεγονός αυτό, από μόνο του δεν μπορεί να μας οδηγήσει σε ασφαλές συμπέρασμα, ειδικά εφόσον αφορά μονάχα 4 σημεία, γι' αυτό σχεδιάζουμε και πάλι τις αντίστοιχες καμπύλες και τις συγκρίνουμε με τις πειραματικές:

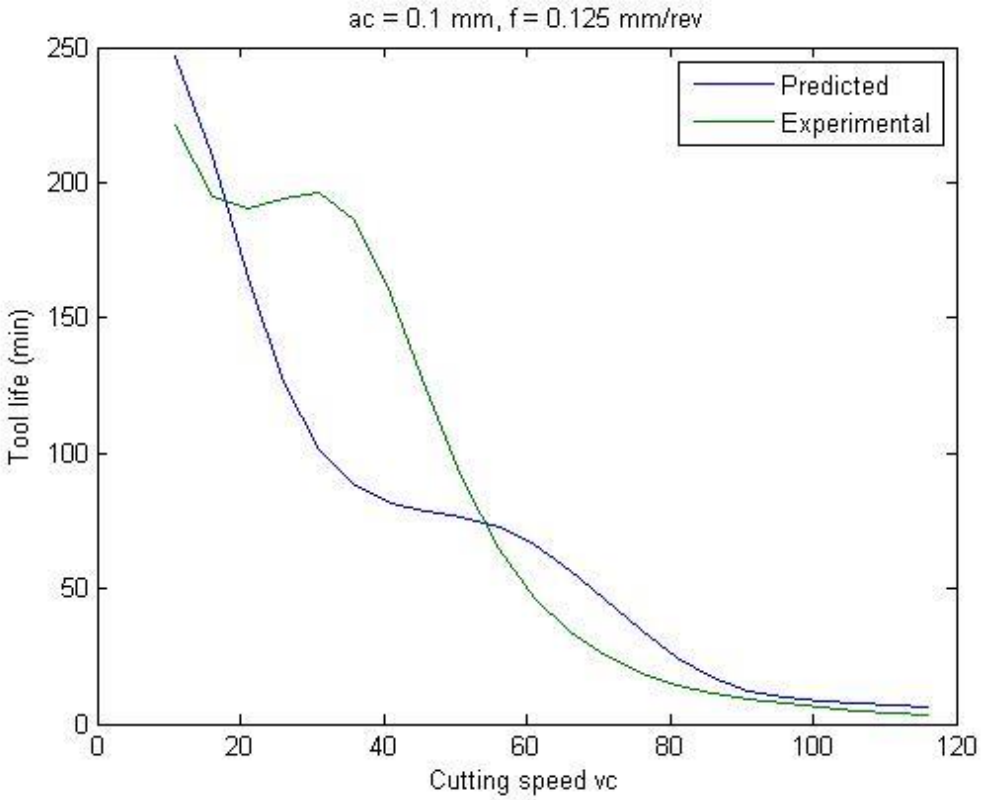



ac = 0.15 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.25 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.1 mm, f = 0.025 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
350
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.1 mm, f = 0.075 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
0
50
100
150
200
250
300
0
20
40
60
80
100
120



Παρατηρούμε ότι, αυτό το σύνολο πειραματικών σημείων, απέτυχε να προσεγγίσει την πραγματική γραφική συνάρτηση του ΚΕ. Παρότι τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα και η παλινδρόμηση έχουν εξαιρετικές τιμές, περιγράφουν μία μέση κατάσταση και όχι την πραγματική. Έτσι, το παρόν δίκτυο, με αυτά τα διανύσματα εισόδου – εξόδου, δεν μπορεί να εστιάσει στη λεπτομέρεια της εξέλιξης του φαινομένου, παρότι τα σημεία με τα οποία εκπαιδεύτηκε, τα προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά. Μοναδικό θετικό είναι ότι, σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες κοπής, η πρόβλεψη δεν απέχει πολύ από τις πραγματικές τιμές της ούτως ή άλλως σύντομης ζωής του κοπτικού εργαλείου.

3.4.2 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με τη μέθοδο Taguchi L_{16}

Κατά το σχεδιασμό αυτού του πειράματος, θα επιλέξουμε να μελετήσουμε τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε 4 επίπεδα των τριών μεταβλητών εισόδου. Εδώ, όμως, δε θα υπολογιστούν όλα τα πιθανά πειραματικά σημεία (διανύσματα εισόδου – εξόδου) αλλά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας L_{16} κατά Taguchi. Κατά το πείραμα αυτό, όπως και στο Full Factorial σχεδιασμό, η επίδραση κάθε μεταβλητής εισόδου θεωρείται ίση. Γι' αυτό, κάθε επίπεδο κάθε μεταβλητής εισόδου επαναλαμβάνεται ίσες φόρες. Επομένως, για 4 επίπεδα κάθε συνθήκης κοπής, κάθε επίπεδο επαναλαμβάνεται 4 φορές, ώστε να προκύψουν 16 σημεία.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, θα εκπαιδεύσουμε το δίκτυο των προηγούμενων ενοτήτων και θα σχεδιάσουμε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, συγκρίνοντάς τες και πάλι με τις πραγματικές που προέκυψαν από τα

πειράματα. Και πάλι, οι τιμές της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου που δεν έχουν υπολογιστεί πειραματικά, θα υπολογιστούν απ' ευθείας από τις αναλυτικές σχέσεις της ενότητας 3.1.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

α/α	f(mm)	ap(mm)	Vc(m/min)
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	4	1	4
5	1	2	2
6	2	2	1
7	3	2	4
8	4	2	3
9	1	3	3
10	2	3	4
11	3	3	1
12	4	3	2
13	1	4	4
14	2	4	3
15	3	4	2
16	4	4	1

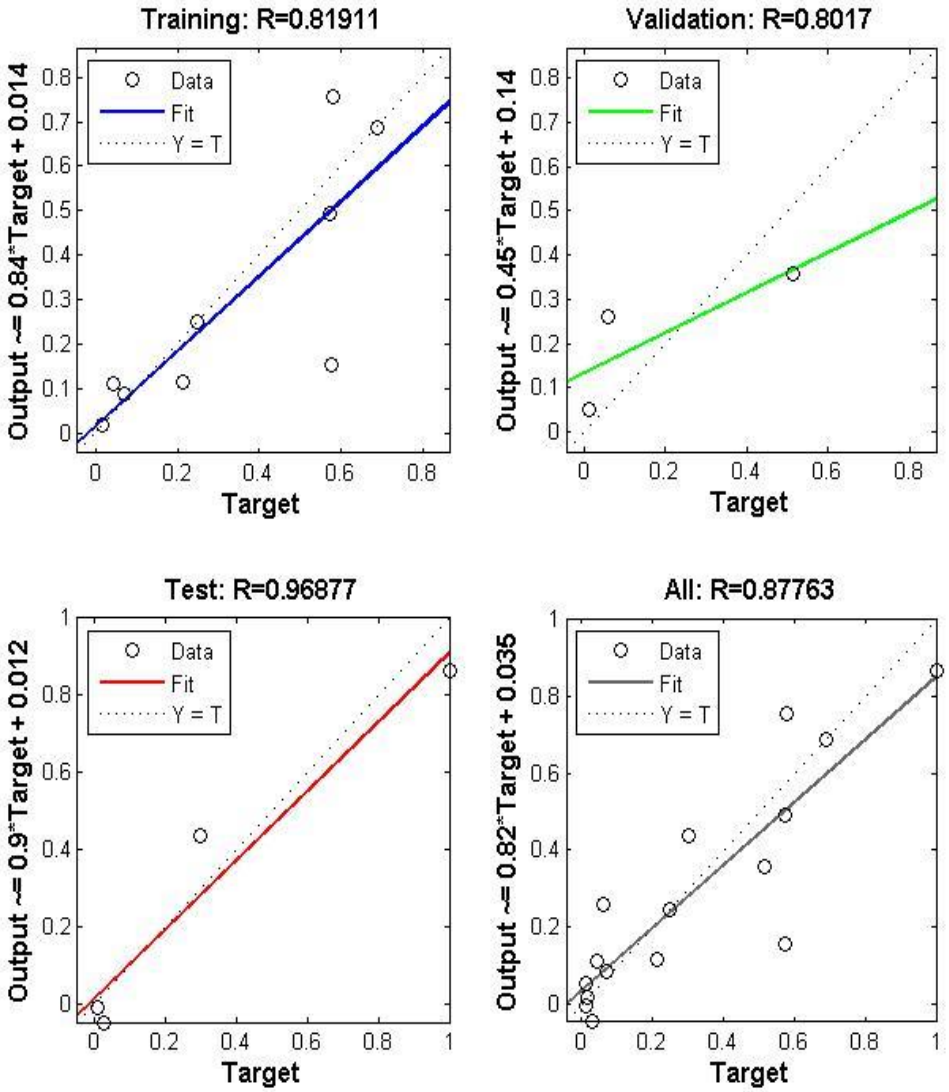
Επίπεδα παραμέτρων και συνδυασμοί τους για πείραμα L_{16}

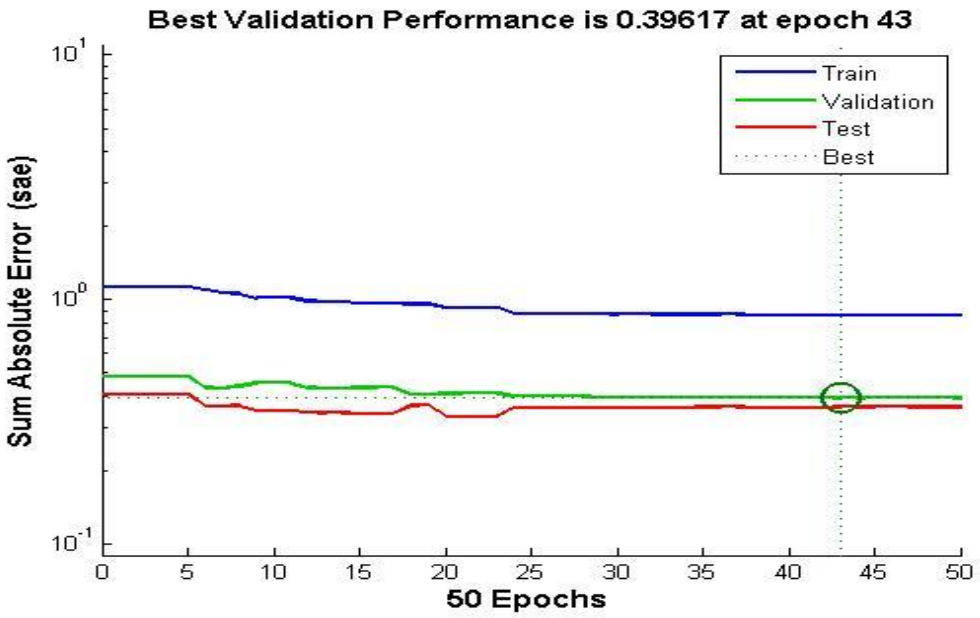
Οι τιμές που αντιστοιχούν σε αυτά τα επίπεδα, και έχοντας το ίδιο εύρος τιμών για τα f, a_p και Vc όπως και πριν είναι:

α/α	f(mm)	ap(mm)	Vc(m/min)	T(min)
1	0,025	0,050	11,000	374,259
2	0,058	0,050	47,333	215,326
3	0,092	0,050	83,667	26,568
4	0,125	0,050	120,000	4,306
5	0,025	0,117	47,333	217,097
6	0,058	0,117	11,000	257,422
7	0,092	0,117	120,000	4,229
8	0,125	0,117	83,667	11,588
9	0,025	0,183	83,667	79,082
10	0,058	0,183	120,000	6,123
11	0,092	0,183	11,000	214,919
12	0,125	0,183	47,333	92,926
13	0,025	0,250	120,000	15,874
14	0,058	0,250	83,667	22,283
15	0,092	0,250	47,333	112,579
16	0,125	0,250	11,000	192,252

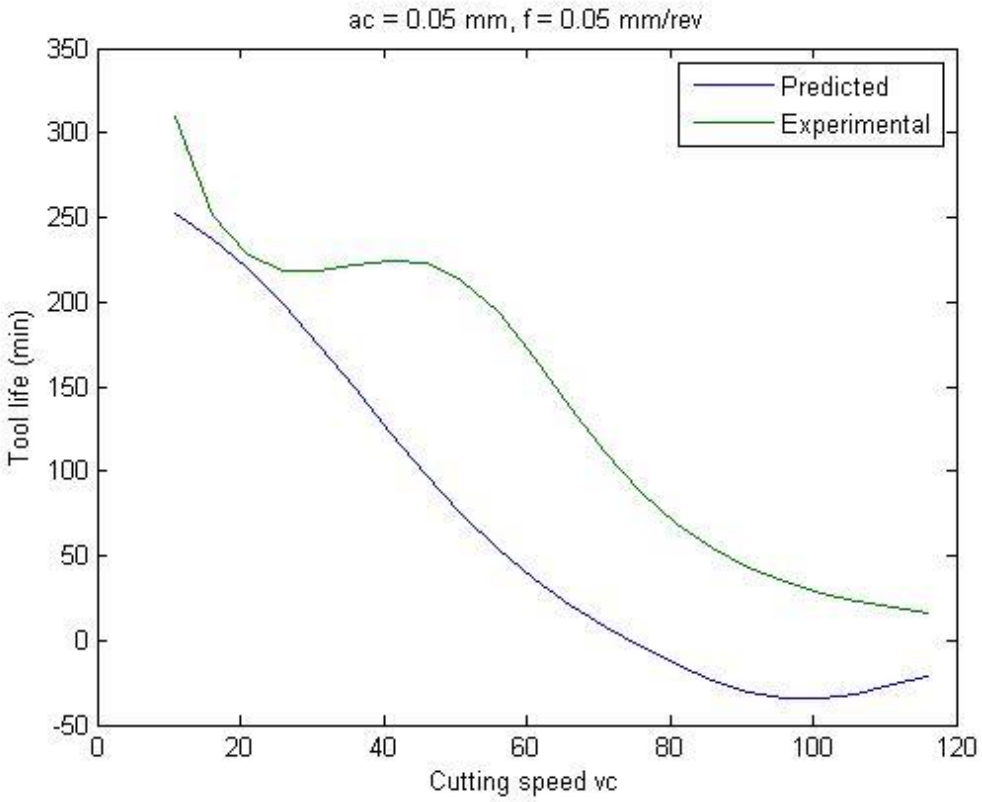
Υπενθυμίζεται ότι οι αποστάσεις των διαφόρων επιπέδων των τιμών κάθε μεταβλητής είναι σταθερή, προκειμένου να μη λαμβάνεται περισσότερο υπόψη η επίδραση μίας περιοχής της παραμέτρου έναντι μίας άλλης.

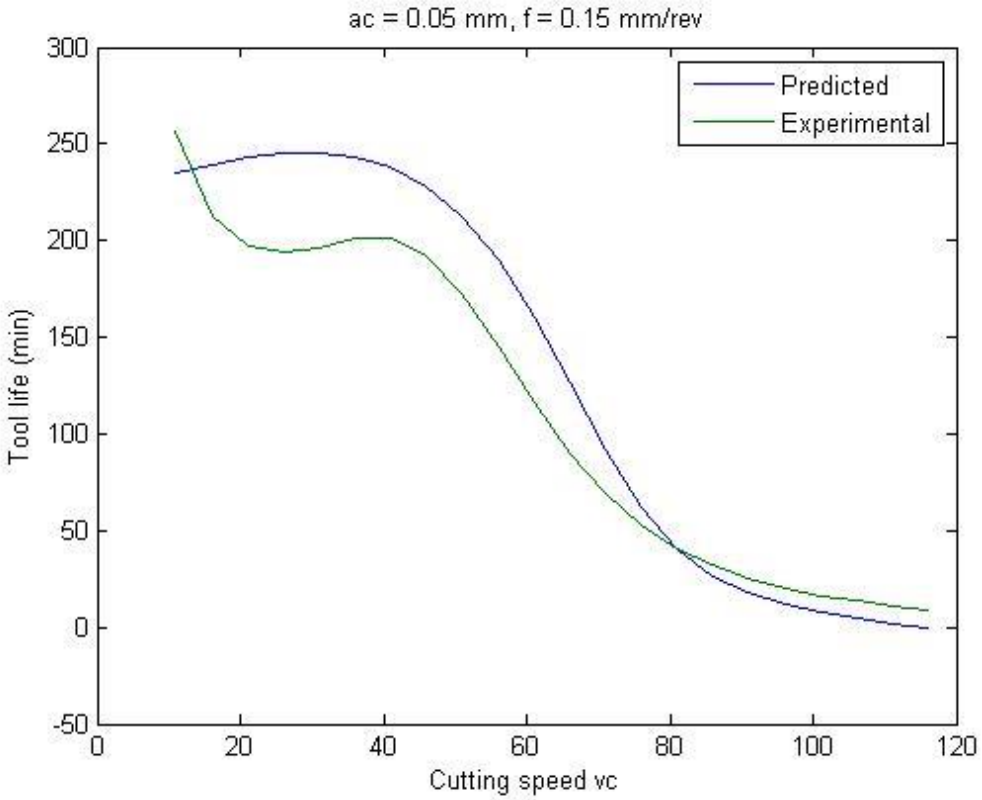
Το γνωστό μας, πλέον, τεχνητό νευρωνικό δίκτυο 3-8-5-1 εκπαιδεύεται και προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων (SSE) παρουσιάζονται παρακάτω. Σημειώνεται ότι εδώ δε χρησιμοποιήσαμε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) καθότι τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το δίκτυο δεν μπορεί να προσεγγίσει τις πειραματικές καμπύλες ούτε σε μικρό βαθμό.

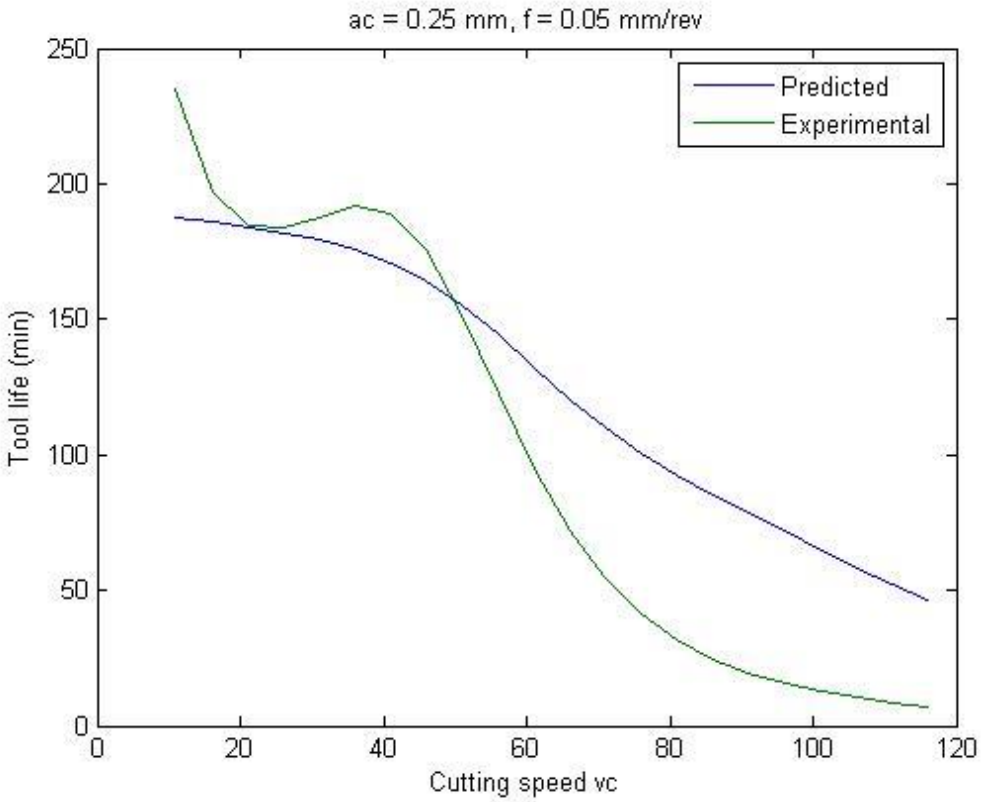


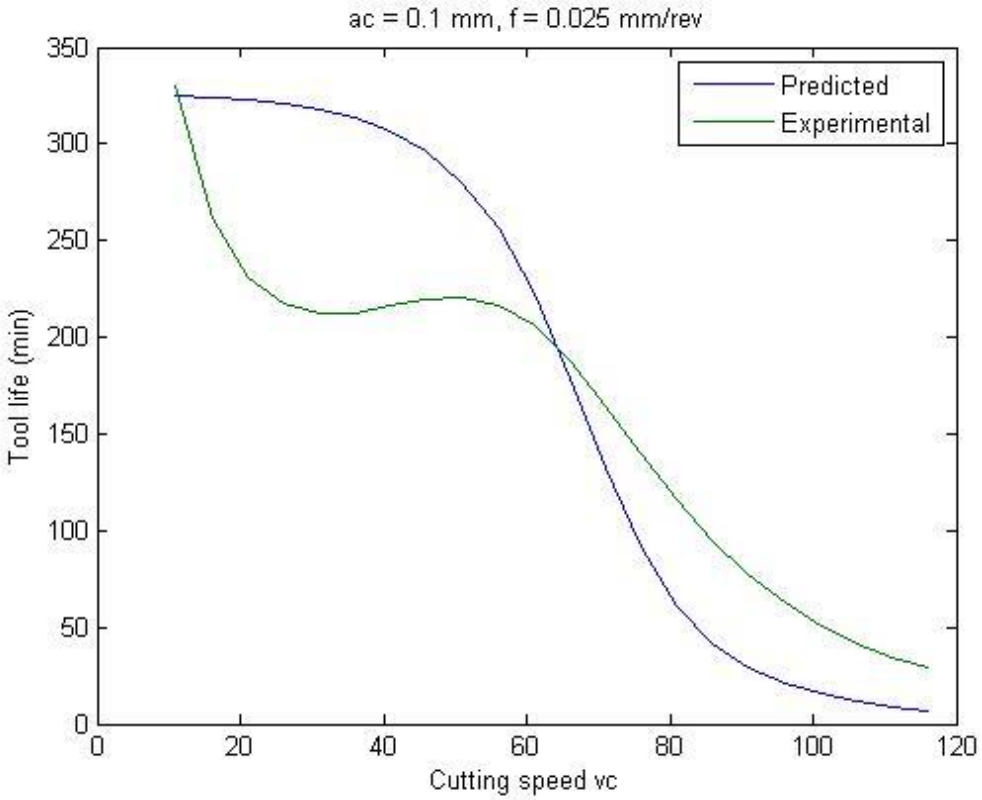


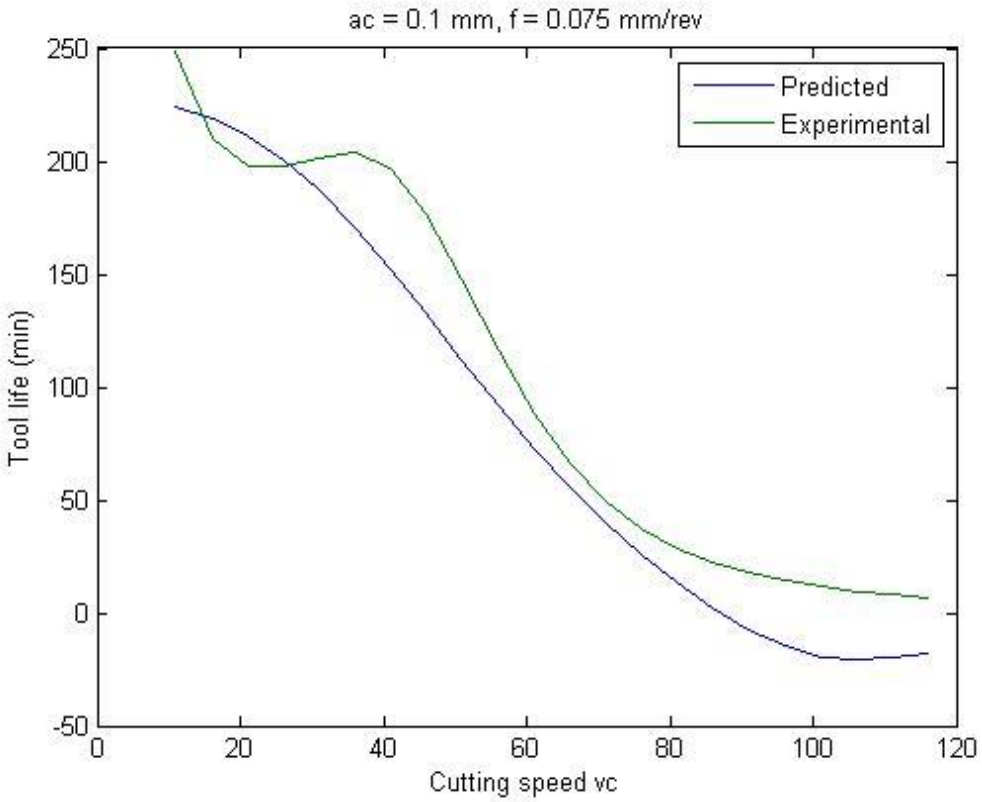
Παρατηρούμε ότι σε σχέση με τις προηγούμενες «εκπαιδεύσεις» η γραμμική παλινδρόμηση του δείγματος εκπαίδευσης είναι χαμηλή. Ωστόσο, τα σφάλματα παρουσιάζουν εξαιρετικά σταθερή συμπεριφορά. Ενδέχεται, το νευρωνικό δίκτυο να έχει καλή ικανότητα γενίκευσης. Για να ελέγξουμε τον παραπάνω ισχυρισμό, σχεδιάζουμε τις καμπύλες που προβλέπει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο 3-8-5-1 και τις συγκρίνουμε με τις πειραματικές:




ac = 0.05 mm, f = 0.15 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.25 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
100
120





Παρατηρούμε ότι σε κάποιες περιπτώσεις το δίκτυο κατάφερε να προσεγγίσει τις πειραματικές καμπύλες, ενώ σε άλλες τα κατάφερε μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές τους. Σε άλλες πάλι, όπως στην καμπύλη για a_p=0,1mm και f=0,025mm/rev, οι καμπύλη που προβλέπει το νευρωνικό δίκτυο δεν έχει σχεδόν ουδεμία σχέση με την

πειραματική. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι συνολικά, ο πίνακας L_{16} δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα της φθοράς ΚΕ από CBN με αυτό το νευρωνικό δίκτυο.

3.4.3 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου με τη μέθοδο Taguchi L_9

Σε αυτή τη φάση της εργασίας, θα επιλέξουμε να μελετήσουμε τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε 3 επίπεδα των τριών μεταβλητών εισόδου. Ο υπολογισμός θα γίνει και πάλι με τη χρήση ενός πίνακα Taguchi. Και πάλι ο πίνακας αυτός είναι ορθογωνικός, κάτι που σημαίνει ότι κάθε επίπεδο των τριών παραμέτρων (βάθος κοπής, πρόωση, ταχύτητα κοπής) επαναλαμβάνεται από 3 φορές, αποδίδοντας συνολικά 9 επαναλήψεις του θεωρητικού πειράματος. Το πείραμα, είναι φυσικά θεωρητικό, αφού οι αντίστοιχες τιμές της διάρκειας ζωής του ΚΕ από CBN θα υπολογιστούν από τις αναλυτικές σχέσεις των προηγούμενων βημάτων.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, θα εκπαιδεύσουμε το δίκτυο των προηγούμενων ενοτήτων (3-8-5-1) και θα σχεδιάσουμε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, συγκρίνοντάς τες και πάλι με τις πραγματικές που προέκυψαν από τα πειράματα.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

α/α	f(mm)	ap(mm)	Vc(m/min)
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	1	2	2
5	2	2	3
6	3	2	1
7	1	3	3
8	2	3	1
9	3	3	2

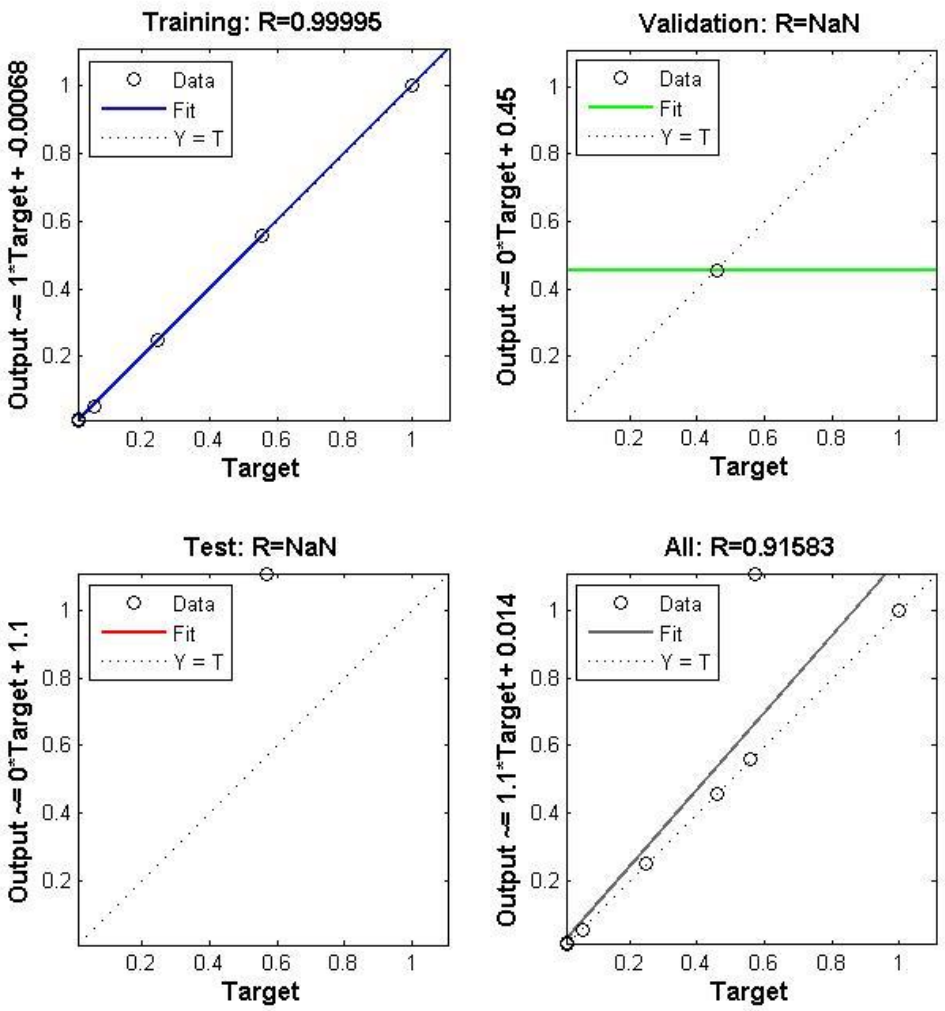
Επίπεδα παραμέτρων και συνδυασμοί τους για πείραμα L_9

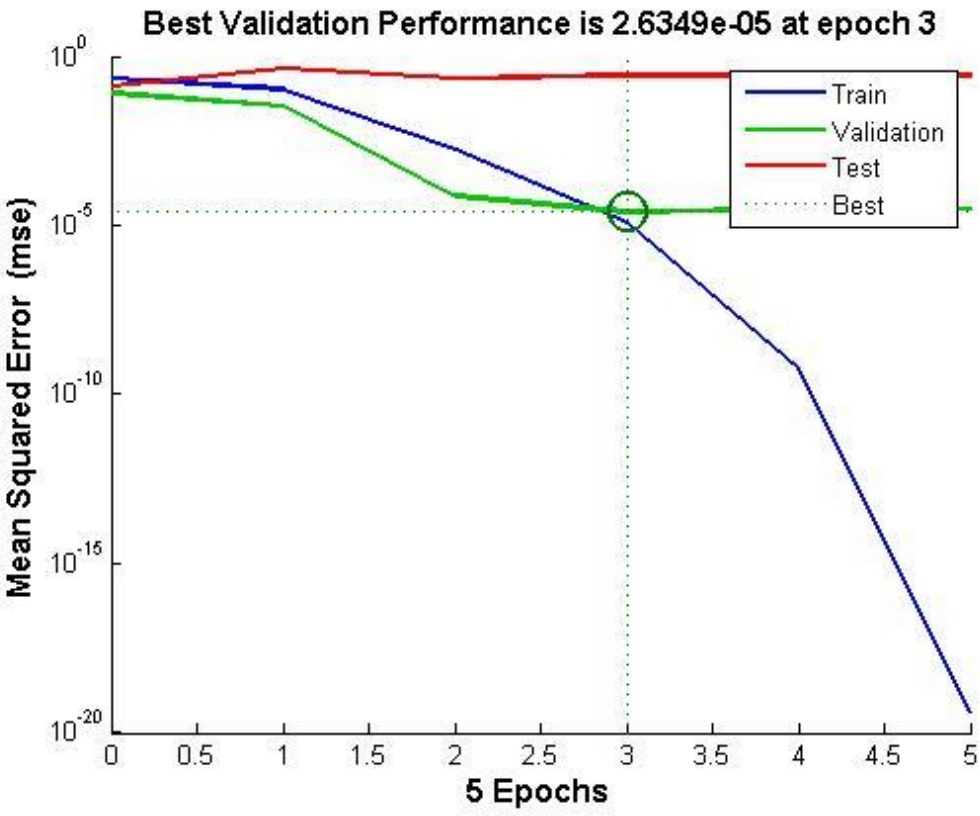
Οι τιμές που αντιστοιχούν σε αυτά τα επίπεδα, και έχοντας το ίδιο εύρος τιμών για τα f, ap και Vc όπως και σε όλες τις περιπτώσεις:

α/α	f(mm)	ap(mm)	Vc(m/min)	T(min)
1	0,025	0,05	11	374,259
2	0,075	0,05	65,5	92,2258
3	0,125	0,05	120	4,3055
4	0,025	0,15	65,5	171,9
5	0,075	0,15	120	4,8579

6	0,125	0,15	11	207,8904
7	0,025	0,25	120	3,8108
8	0,075	0,25	11	213,7671
9	0,125	0,25	65,5	22,0782

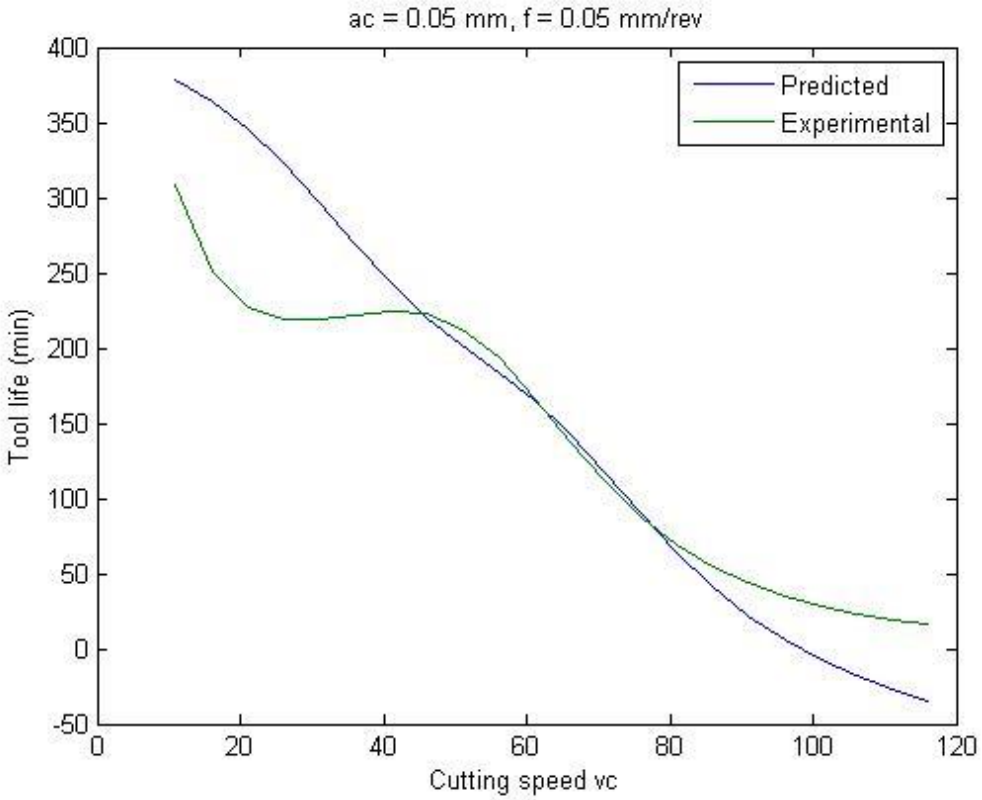
Εκπαιδεύουμε το νευρωνικό δίκτυο 3-8-5-3 και προκύπτουν οι τιμές του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τα δείγματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου:

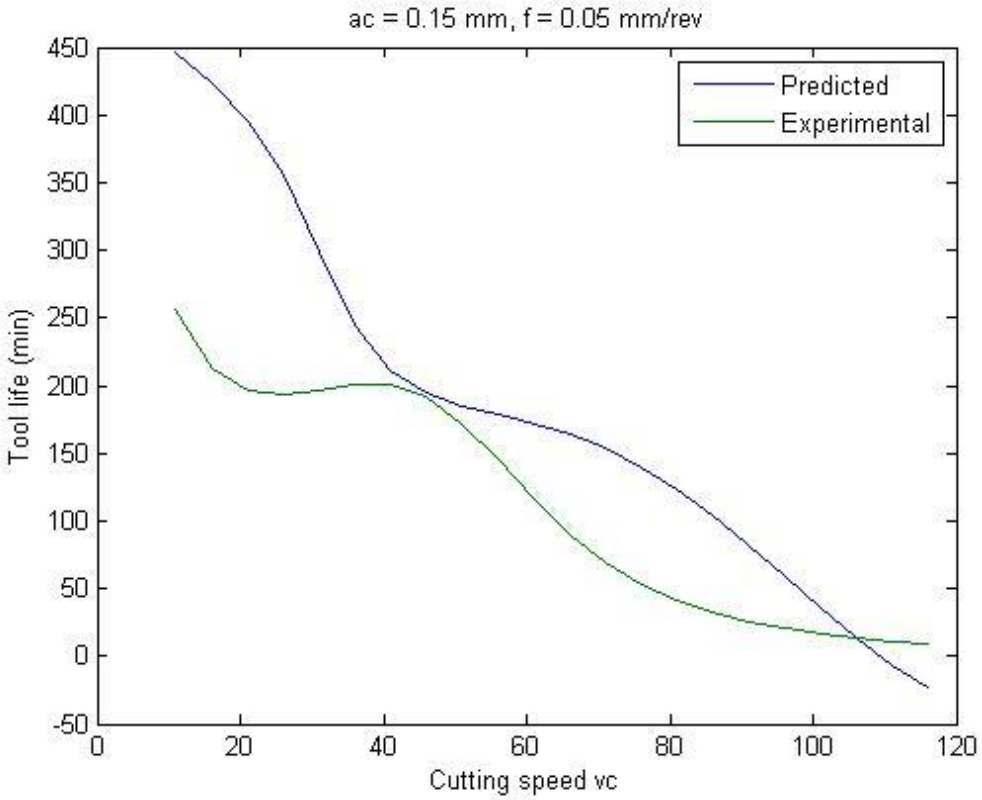


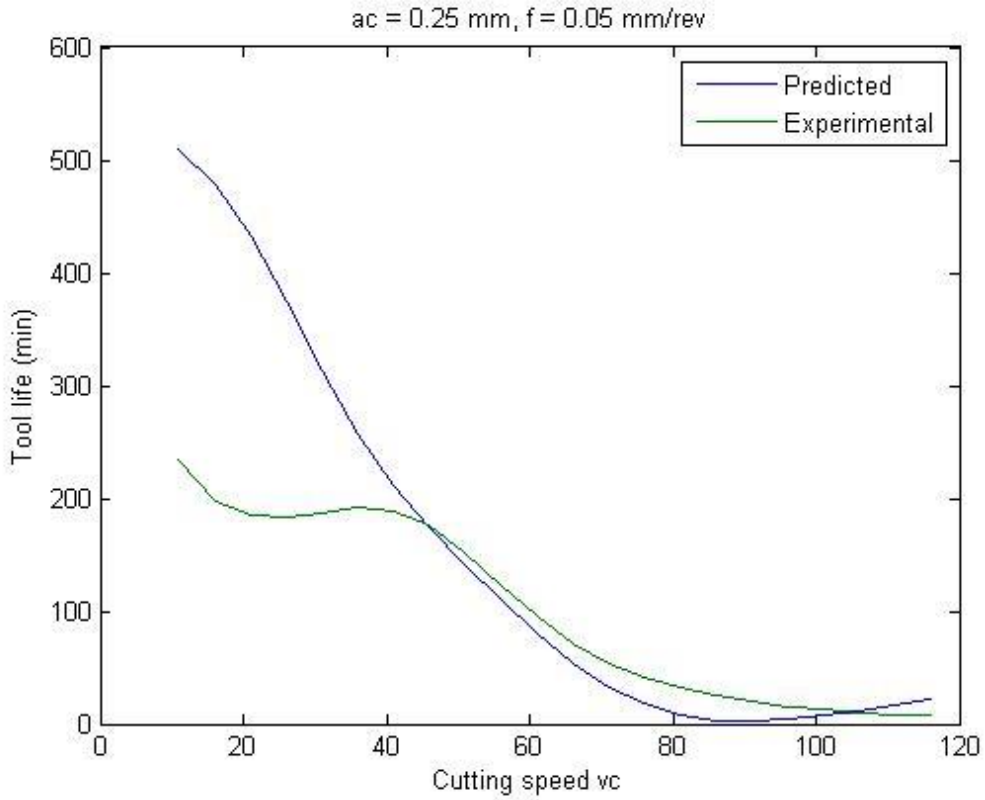


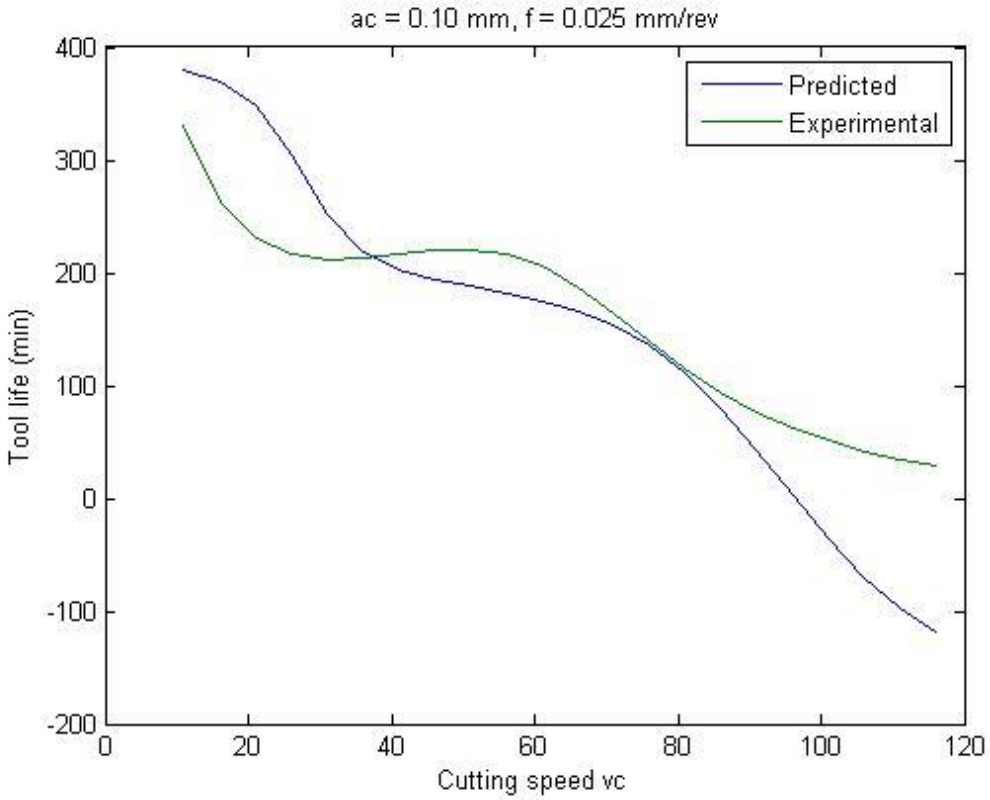
Παρατηρούμε ότι το νευρωνικό δίκτυο προσεγγίζει τα σημεία που του δίνουμε με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια (μεγάλος συντελεστής γραμμικής παλινδρόμησης του δείγματος εκπαίδευσης). Φυσικά, συντελεστής γραμμικής παλινδρόμησης για τα δείγματα επικύρωσης και ελέγχου δεν υφίσταται, αφού αυτά αποτελούνται από ένα μόνο σημείο.

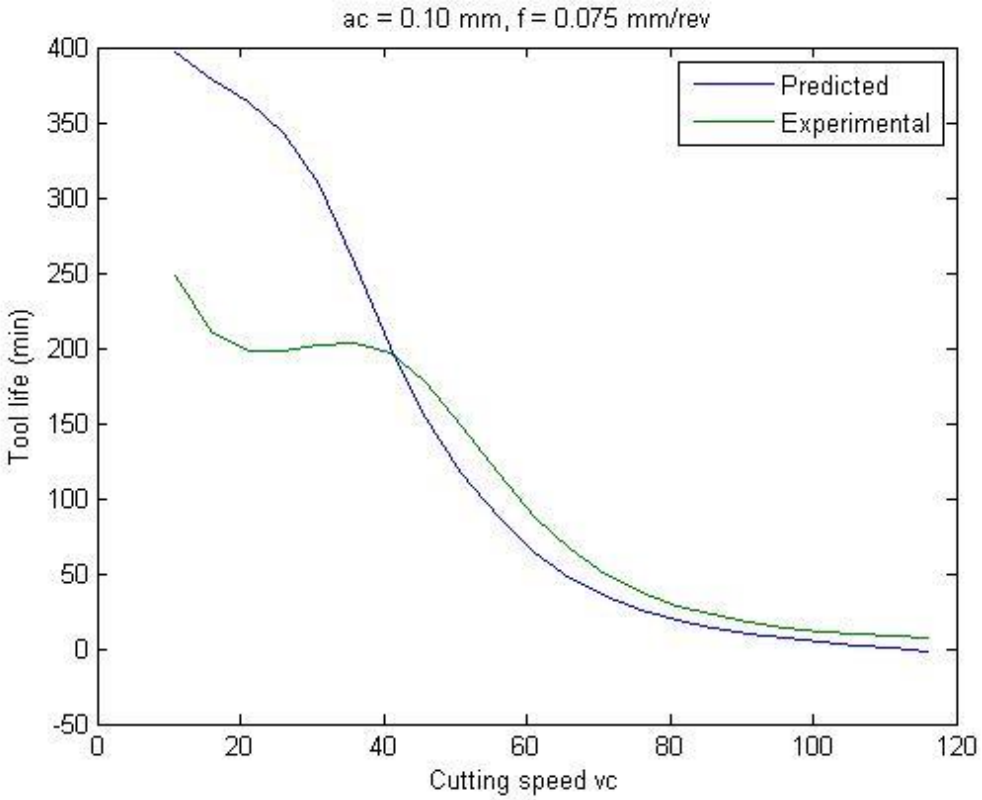
Τέλος, χαράσσουμε τις καμπύλες που προβλέπει το δίκτυο και τις συγκρίνουμε με τις πραγματικές:

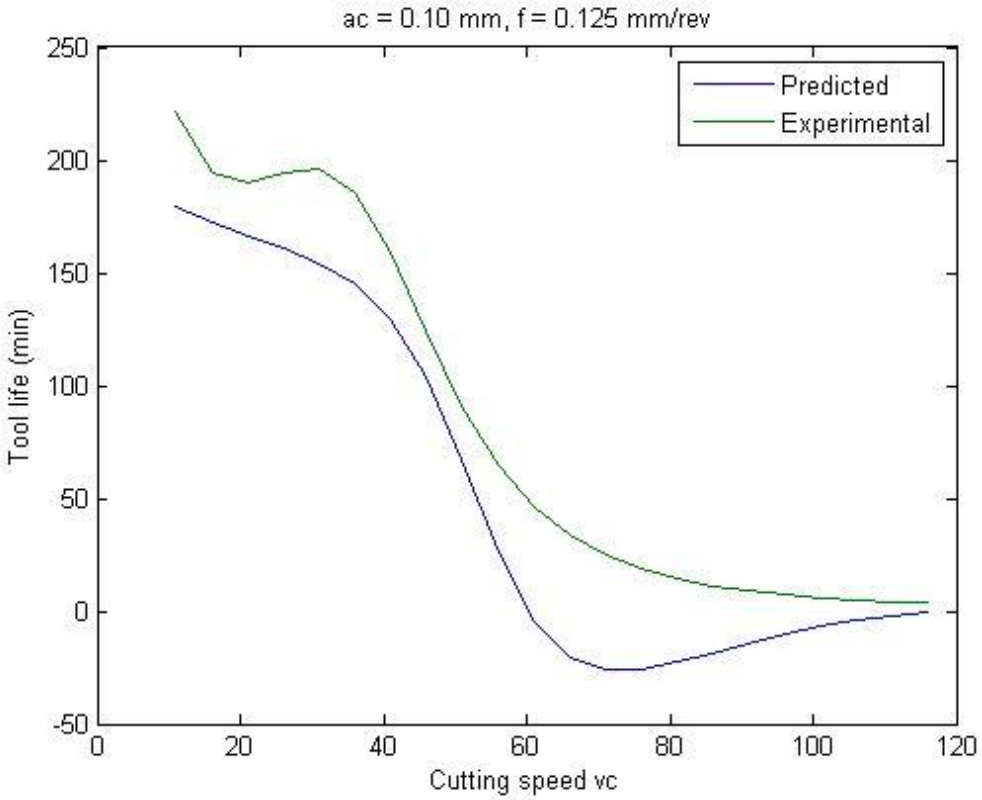

ac = 0.05 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.15 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.25 mm, f = 0.05 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
600
500
400
300
200
100
0
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.10 mm, f = 0.025 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
400
300
200
100
0
-100
-200
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.10 mm, f = 0.075 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
20
40
60
80
100
120


ac = 0.10 mm, f = 0.125 mm/rev
Predicted
Experimental
Tool life (min)
Cutting speed vc
250
200
150
100
50
0
-50
0
20
40
60
80
100
120

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα, βλέπουμε ότι, σε ορισμένες περιοχές των πειραματικών καμπυλών, η προσέγγιση είναι αρκετά καλή και τα σφάλματα μικρά. Ωστόσο, αξιόπιστα αποτελέσματα για περισσότερους συνδυασμούς πρόωσης και βάθους κοπής δεν μπορούν να εξαχθούν. Έτσι, μπορούμε ως γενική κρίση να πούμε πώς όπως και στην περίπτωση του πίνακα L_{16}, ο πίνακας L_9 κάθε άλλο παρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της αναλυτικής σχέσης διάρκειας ζωής ΚΕ από CBN με αυτό το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.

3.4.4 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, με αφετηρία πειράματα που έγιναν για να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου από CBN και παρείχαν αναλυτική σχέση για το σκοπό αυτό, εκπαιδεύτηκε κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο το οποίο μπορεί με επιτυχία να υποκαταστήσει το αναλυτικό μοντέλο. Στη συνέχεια, το ίδιας αρχιτεκτονικής νευρωνικό δίκτυο, εκπαιδεύτηκε με λιγότερα δεδομένα από τα πειραματικά, για να δειχθεί εάν θα μπορούσε να βρεθεί η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων από λιγότερα πειραματικά δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση, σχεδιάσθηκαν οι καμπύλες για διάφορες συνθήκες κοπής που προέβλεψε το εκάστοτε δίκτυο, και συγκρίθηκαν με τις πειραματικές.

Η επιλογή του νευρωνικού δικτύου έγινε μετά από πλήθος δοκιμών οι οποίες έδειξαν ότι αν αυξάναμε περαιτέρω τα κρυμμένα επίπεδα, άρα και την πολυπλοκότητά του, δεν είχαμε κανένα ουσιαστικό όφελος. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα που προέκυπταν δεν ήταν αξιόπιστα, ενώ ο χρόνος εκπαίδευσης του δικτύου αυξανόταν άσκοπα. Βλέπουμε λοιπόν, ότι ένα πιο πολύπλοκο δίκτυο δε σημαίνει ότι μπορεί να προσομοιώσει και πιο πολύπλοκα προβλήματα πιο εύκολα, αλλά μπορεί να δυσχεράνει την κατάσταση. Κατά την εκπαίδευση των δικτύων, είδαμε επίσης ότι η χρήση του αλγορίθμου εκπαίδευσης L – M μάς έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Το σφάλμα ήταν το μικρότερο δυνατό, ενώ η εκπαίδευση του δικτύου είναι εξαιρετικά γρήγορη.

Στη συνέχεια, επιχειρώντας με το ίδιο δίκτυο αλλά λιγότερα δεδομένα να προσεγγίσουμε τη διάρκεια ζωής του ΚΕ, είχαμε μικτά αποτελέσματα. Σχεδιάζοντας τις καμπύλες που προέβλεψε το δίκτυο και χρησιμοποιώντας 27 πειραματικά σημεία (Full factorial) είδαμε μία καλή προσέγγιση τους στις μεγάλες ταχύτητες κοπής, που είναι και αυτές που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Από την άλλη μεριά, η προσέγγιση που επέτυχε το νευρωνικό δίκτυο με χρήση πειραματικών σημείων όπως υποδείχθηκαν από πίνακες Taguchi για 3 και για 4 επίπεδα των παραμέτρων κοπής (16 και 9 πειραματικά σημεία αντίστοιχα) ήταν από μέτρια έως ανύπαρκτη. Έτσι, κάποιες καμπύλες προσεγγίστηκαν ως προς τη μορφή και κάποιες άλλες όχι.

Όλα τα παραπάνω, μάς δείχνουν τη μεγάλη σημασία που έχουν τα νευρωνικά δίκτυα. Με την κατακόρυφη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος στις μέρες μας, τα νευρωνικά δίκτυα είναι ικανά να προσεγγίσουν είτε γνωστά είτε άγνωστα φαινόμενα, καθιστώντας την ανάγκη εξεύρεσης αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων και τη διεξαγωγή πολυδάπανων και χρονοβόρων πειραμάτων, συχνά περιττή. Είναι δε

εμφανές, από το πλήθος ερευνών που απαντώνται στη βιβλιογραφία ότι η εξέλιξή τους και η χρήση τους θα μας απασχολεί σε πολλούς τομείς για τα επόμενα χρόνια.

Βιβλιογραφία

1. Serope Kalpakjian, “Manufacturing engineering and technology, Second edition”, 1992

2. George Tlusty, “Manufacturing processes and equipment”, 2000

3. John A. Schey, “Introduction to manufacturing processes”, 2000

4. Krar Oswald, “Technology of Machine Tools”, 1994

5. Δ.Ε. Μανωλάκος, «Σημειώσεις για το μάθημα «Κατεργασίες ΙΙ»»

6. A.G Mamalis, J. Kundrak, M. Horvath, “On a novel tool life relation for precision cutting tools”

7. Βασίλειος Καναβάρης, “Μελέτη της κόπωσης και ανοχής στη βλάβη. Αστοχίες σε αεροπορικά μηχανολογικά στοιχεία», διπλωματική εργασία, 2014

8. J. Caldeirani Filho, A. E. Diniz, “Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process

9. Sandvik Koromant website, http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges

10. Valery Marinov, «Manufacturing Technology”, Kendall Hunt Publishing Company, 2010

11. Jorge A. Olortegui-Yume, Patrick Y. Kwon, “Tool wear mechanisms in machining”, Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 2, Nos. 3/4, 2007

12. Viktor P. Astakhov, J. Paulo Davim, “Tools (Geometry and Material) and Tool Wear”, 2008

13. Anderson C. A. de Melo, Júlio César G. Milan, Márcio B. da Silva, Álisson R. Machado, “Some observations on wear and damages in cemented carbide tools”, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.28 no.3 Rio de Janeiro July/Sept. 2006

14. Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης «Μηχανουργική τεχνολογία», Εκδόσεις Τζιόλα, 2011

15. Ηρωά Μαρία, «Ανάπτυξη μοντέλων νευρωνικών δικτύων για την προσομοίωση της διαμόρφωσης κυλινδρικών δοκιμίων υπό την επίδραση θλιπτικών αξονικών δυνάμεων», 2003

16. Τσίντζας Χρήστος, «Μοντελοποίηση των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία του τορναρίσματος με την χρήση μοντέλων νευρωνικών δικτύων», 2003

17. Kevin Swingler, “Applying Neural Networks”, Centrer for Cognitive and Computational Neuroscience, University of Stirling, 2001

18. S. Haykin, “Neural Networks: A comprehensive foundation”, Prentice – Hall, 1999

19. Michael A. Nielsen, “Neural Networks and Deep Learning”, Determination Press, 2015

20. Rajiv Kumar Yadav, Kumar Abhishek, Siba Sankar Mahapatra, “A simulation approach for estimating flank wear and material removal rate in turning of Inconel 718”, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India

21. Samik Dutta, Surjya K. Pal, Ranjan Sen, “On-machine tool prediction of flank wear from machined surface images using texture analysis and support vector regression”, CSIR, Durgapur, India

22. Nilrudra Mandal, B. Doloi, B. Mondal, Reeta Das, “Optimization of flank wear using Zirconia toughened alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis”, CSIR, Durgapur, India

23. Sujan Debnath, Moola Mohan Reddy, Qua Sok Yi, “Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in truning process using Taguchi method, School of Engineering and Science, Sarawak, Malaysia

24. Mozammel Mia, Nikhil Ranjan Dhar, “Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using ANN”, Ahsamullah University of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh

25. A.I. Azmi, “Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro – fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites”, UniMPA, Malaysia

26. Cyril Drouillet, Jaydeep Karandikar, Chandra Nath, Anne – Claire Journeaux, Mohamed El Mansori, Thomas Kurfess, “Tool life predictions in milling using spindle power with the neural network technique”, Georgia Instirute of Technology, Atlanta.

27. P. Krishnakumar, K. Rameshkumar, K. I. Ramachandran, “Tool wear condition prediction using vibration signals in high speed machining of titanium (Ti-6Al-4V) alloy”, Vishwa Coimbatore, India

28. S. Kalidass, P. Palanisamy, V. Muthukumaran, “Prediction of tool wear using regression and ann models in end milling of AISI 304 austenitic stainless steel”, IJEIT, Volume 1 , Issue 2, Feb. 2012