

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	5
1.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	6
1.3 ΣΧΕΔΙΟ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ	10
1.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ	11
1.4.1 Ιδιότητες των υλικών	12
1.4.2 Κόστος και διαθεσιμότητα	13
1.4.3 Εμφάνιση και διάρκεια ζωής	14
1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
1.5.1 Διαστάσεις και επιφάνεια	15
1.5.2 Κόστος λειτουργίας και κατεργασίας	16
1.5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	16
1.6 ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	17
1.6.1 Συστήματα ελέγχου μηχανών	18
1.6.2 Τεχνολογία υπολογιστών	19
1.7 ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.....	21
1.8 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	24
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	24
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	24
2.3 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΟΠΗΣ	27
2.3.1. Λοξή κοπή	27
2.3.2 Ορθογωνική κοπή.....	28
2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ	31
2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	33
2.6 ΥΓΡΑ ΚΟΠΗΣ.....	34
2.6.1 Λειτουργίες των υγρών κοπής.....	34
2.6.2 Υγρά κοπής	35
2.6.3 Αποτελέσματα των υγρών κοπής.....	36
2.7 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	37
2.7.1 Φθορά κοπτικών εργαλείων	38
2.7.2 Πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων	40
2.8 ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	43
2.9 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	44

2.9.1 Δομή και ιδιότητες επιφάνειας.....	45
2.9.2 Μορφολογία επιφάνειας	46
2.9.3 Τραχύτητα επιφάνειας.....	48
2.9.4 Σύμβολα για την τραχύτητα επιφάνειας	49
2.9.5 Μέτρηση της τραχύτητας επιφάνειας	49
2.10 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	51
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	51
3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑ	54
3.3 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	58
3.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	61
3.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΣΩ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	75
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ	75
4.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	76
4.2.1 Σφάλμα εκπαίδευσης	76
4.2.2 Αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο.....	78
4.2.3 Ρυθμός εκμάθησης.....	79
4.2.4 Παράγοντας ορμής	81
4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΔΙΚΤΥΟ LEVENBERG - MARQUARDT (L-M).....	82
4.3.1 Πειραματικά δεδομένα.....	83
4.3.2 Αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων.....	85
4.3.3 Αρχιτεκτονική τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	87
4.3.4 Δομή του προγράμματος	88
4.3.5 Σφάλμα εκπαίδευσης	90
4.3.6 Συμπεράσματα	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Όπως γνωρίζουμε η διαδικασία με την οποία μετατρέπουμε τα ακατέργαστα υλικά σε τελικά προϊόντα ονομάζεται κατεργασία. Μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούμε διάφορες μεθόδους κατεργασίας με σκοπό να παράγουμε τα προϊόντα που χρειαζόμαστε και με τις προδιαγραφές που θέλουμε αυτά να έχουν. Μια από τις βασικότερες και ευρύτετα χρησιμοποιούμενες κατεργασίες είναι και αυτή της κοπής. Η κοπή των μετάλλων είναι άλλωστε και το βασικό αντικείμενο στο οποίο αναφέρεται η εργασία αυτή. Πρόκειται για μια τεχνική που στοχεύει στην επιτυχή παραγωγή της επιθυμητής μορφής του τεμαχίου που πρόκειται να υποστεί κατεργασία. Η βελτίωση των ανοχών και της ποιότητας της επιφάνειας ενός προηγουμένως ήδη κατεργασμένου κομματιού μπορεί να είναι ένας ακόμη στόχος της κοπής, ο οποίος επιτυγχάνεται με την αφαίρεση του υπερβολικού υλικού υπό μορφή αποβλήτου μέσω ενός μεταλλικού κοπτικού εργαλείου εργαλειομηχανής. Η κατεργασία της κοπής είναι ικανή να επιτύχει γεωμετρικές διαμορφώσεις, ανοχές και ποιότητα επιφάνειας που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική. Μεταβλητές όπως το υλικό και το σχήμα του κοπτικού εργαλείου, το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου, οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής κ.λ.π.) και τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής είναι αυτές που μπορούν να επηρεάσουν παραμέτρους της κοπής όπως την τελική ποιότητα επιφάνειας, τις ανοχές, τις δυνάμεις κοπής, την ενέργεια που καταναλώνεται, την φθορά του εργαλείου κ.λ.π.

Στην περίπτωση μας, από όλες τις παραπάνω ανεξάρτητες μεταβλητές, στόχος μας είναι να εξετάσουμε τον τρόπο που επιδρούν η πρόωση, η ταχύτητα κοπής και το βάθος κοπής στις δυνάμεις κοπής αλλά και να επιτύχουμε τον υπολογισμό των δυνάμεων αυτών. Ο συνήθης τρόπος υπολογισμού των δυνάμεων κοπής είναι είτε με την βοήθεια μετρήσεων είτε με την χρησιμοποίηση αναλυτικών εμπειρικών σχέσεων που δίνουν συνήθως προσεγγιστικά αποτελέσματα. Εμείς θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε αλλά και να εφαρμόσουμε στην πράξη την τεχνική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANNs)

για την εκτίμηση και πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται προηγούμενα πειραματικά δεδομένα για την εκπαίδευση του δημιουργούμενου νευρωνικού δικτύου. Το δίκτυο αυτό μπορεί με την εισαγωγή κάποιων μεταβλητών εισόδου να προβλέψει τις δυνάμεις κοπής, ενώ πρέπει να πούμε πως η δημιουργία του δικτύου γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB με τρόπο που θα αναλυθεί πιο κάτω.

Η εργασία είναι χωρισμένη σε τέσσερα διαφορετικά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για τις κατεργασίες, όπως τα στάδια από τα οποία συνήθως αποτελούνται, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τις μεθόδους κατεργασίας, την χρήση των υπολογιστών και της τεχνολογίας για την υποβοήθηση των κατεργασιών κ.λ.π. Στο κεφάλαιο 2 επιχειρούμε την ανάλυση της κατεργασίας που μας ενδιαφέρει, δηλαδή της κατεργασίας της κοπής. Αναφερόμαστε στις παραμέτρους της κοπής, στην λοξή και ορθογωνική κοπή, στον σχηματισμό του αποβλήτου, στις θερμοκρασίες και τα υγρά κοπής, την διάρκεια ζωής, την φθορά και τα υλικά των κοπτικών εργαλείων, αλλά και στην κατεργασιμότητα και την ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Το κεφάλαιο 3 εισάγει την έννοια των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Παρουσιάζονται παράμετροι των νευρωνικών δικτύων όπως τα μοντέλα των νευρώνων, οι τύποι των συναρτήσεων ενεργοποίησης, οι πιθανές αρχιτεκτονικές των δικτύων αλλά και ο τρόπος δημιουργίας των νευρωνικών δικτύων μέσω του προγράμματος MATLAB. Τέλος στο κεφάλαιο 4 αναλύεται ο τρόπος προσομοίωσης της κατεργασίας της κοπής με την βοήθεια των νευρωνικών δικτύων. Εξετάζονται έννοιες όπως το σφάλμα εκπαίδευσης, ο αριθμός των νευρώνων, ο ρυθμός εκμάθησης και ο παράγοντας ορμής, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί πλήρης ανάλυση και επεξήγηση του νευρωνικού δικτύου που κατασκευάζουμε χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Α.Γ.Μάμαλη, τον αναπληρωτή καθηγητή Δ.Μανωλάκο καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Α.Μαρκόπουλο για τις πολύτιμες υποδείξεις και οδηγίες που μου προσέφεραν κατά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κατεργασία, στην ευρύτερη της έννοια, είναι η διαδικασία με την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται τελικά σε προϊόντα. Η έννοια της κατεργασίας καλύπτει τόσο την καθεαυτού κατασκευή όσο και τα σχέδια των προς κατασκευή προϊόντων χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους και τεχνικές παραγωγής. Η ιδέα της κατεργασίας πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 5000 με 4000 π.Χ. με την παραγωγή των διάφορων ειδών ξύλου, κεραμικών, πέτρας, και μετάλλου. Η σύγχρονη δε μορφή της αναλαμβάνει να φτιάχνει τα προϊόντα από ακατέργαστα υλικά, με βάση διάφορες διαδικασίες και μηχανήματα, μετά από καλά οργανωμένο σχέδιο για κάθε βήμα που απαιτείται. Περιλαμβάνει περίπου 20 με 30 τοις εκατό της αξίας όλων των αγαθών και των υπηρεσιών που παρέχονται στα βιομηχανοποιημένα έθνη.

Τα κατεργασμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Επειδή ένα κατασκευασμένο αντικείμενο έχει υποβληθεί σε διάφορες αλλαγές μετά τις οποίες το ακατέργαστο υλικό έχει γίνει πλέον ένα χρήσιμο προϊόν, λαμβάνεται υπόψη η προστιθέμενη αξία, ως νομισματική αξία όσον αφορά την τιμή του προϊόντος. Με την βοήθεια της κατεργασίας μπορούμε να παράγουμε και ιδιαίτερα προϊόντα, δηλαδή είτε μεμονωμένα μέρη των κομματιών, είτε συνεχή προϊόντα. Η κατεργασία είναι γενικά μια σύνθετη δραστηριότητα στην οποία συμμετέχουν άνθρωποι που έχουν μια ευρεία σειρά πειθαρχιών και ικανοτήτων αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και μια ευρεία ποικιλία μηχανημάτων, εξοπλισμού, και εργαλείων διαφόρων επιπέδων αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών, των ρομποτικών μηχανισμών και του υλικού εξοπλισμού χειρισμού.

Οι μέθοδοι κατεργασίας θα πρέπει να ανταποκρίνονται σε διάφορες ζητήσεις και τάσεις:

- Το προϊόν πρέπει να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του σχεδίου αλλά και τις απαραίτητες προδιαγραφές.
- Το προϊόν πρέπει να κατασκευαστεί με βάση τις πιο οικονομικές μεθόδους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής.
- Η ποιότητα θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε στάδιο παραγωγής του προϊόντος, από το σχέδιο έως και το τελικό προϊόν, και όχι απλά να ελέγχεται αφότου κατασκευαστεί αυτό.
- Σε ένα ιδιαίτερα ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι μέθοδοι παραγωγής πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτες για να αποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ζητήσεις της αγοράς, στους τύπους των προϊόντων, τα ποσοστά παραγωγής, τις ποσότητες παραγωγής, και στην εντός χρόνου παράδοση στον πελάτη.
- Οι νέες εξελίξεις στα υλικά, τις μεθόδους παραγωγής, τους υπολογιστές, τόσο στις τεχνολογικές όσο και στις διευθυντικές δραστηριότητες σε ένα κατασκευαστικό οργανισμό πρέπει να αξιολογηθούν άμεσα για να επιτευχθεί η έγκαιρη και οικονομική εφαρμογή τους.
- Ο κατασκευαστής πρέπει να εργαστεί με τον πελάτη για να πάρει την έγκαιρη ανατροφοδότηση που απαιτείται για τη συνεχή βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων.
- Ο κατασκευαστικός οργανισμός πρέπει συνεχώς να προσπαθεί για την υψηλότερη παραγωγικότητα, που καθορίζεται ως η βέλτιστη χρήση όλων των πόρων της : υλικά, μηχανές, ενέργεια, κεφάλαιο, εργασία, και τεχνολογία. Η απόδοση ανά υπάλληλο και ανά ώρα σε όλες τις φάσεις πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

1.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός προϊόντος απαιτεί αρχικά μια σαφή κατανόηση της λειτουργίας και της αναμενόμενης απόδοσης του προϊόντος αυτού. Το προϊόν μπορεί να είναι νέο, ή μπορεί να είναι ένα νεώτερο μοντέλο ενός ήδη υπάρχοντος προϊόντος. Η επιδιωκόμενη αγορά του προϊόντος καθώς και οι προσδοκώμενες χρήσεις του πρέπει να καθοριστούν αναλυτικά, με τη βοήθεια του προσωπικού πωλήσεων, των αναλυτών

αγοράς, και άλλων μελών του οργανισμού. Η διαδικασία σχεδιασμού του προϊόντος είναι μια κρίσιμη δραστηριότητα επειδή έχει υπολογιστεί ότι 70 έως 80 τοις εκατό του κόστους της ανάπτυξης και της κατασκευής προϊόντων καθορίζονται στα αρχικά στάδια σχεδίου. Η διαδικασία δημιουργίας του σχεδίου αρχίζει με την ανάπτυξη μιας αρχικής ιδέας όσον αφορά το προϊόν. Μια καινοτόμος προσέγγιση του σχεδίου είναι ιδιαίτερα επιθυμητή ώστε το προϊόν να είναι επιτυχές στην αγορά. Ο σχεδιαστής προϊόντων (σχεδιαστής μηχανικός) πρέπει να είναι πεπειραμένος σε τομείς που αφορούν τα υλικά, το σχέδιο, την κατασκευή, καθώς επίσης και τα γενικά οικονομικά της λειτουργίας.

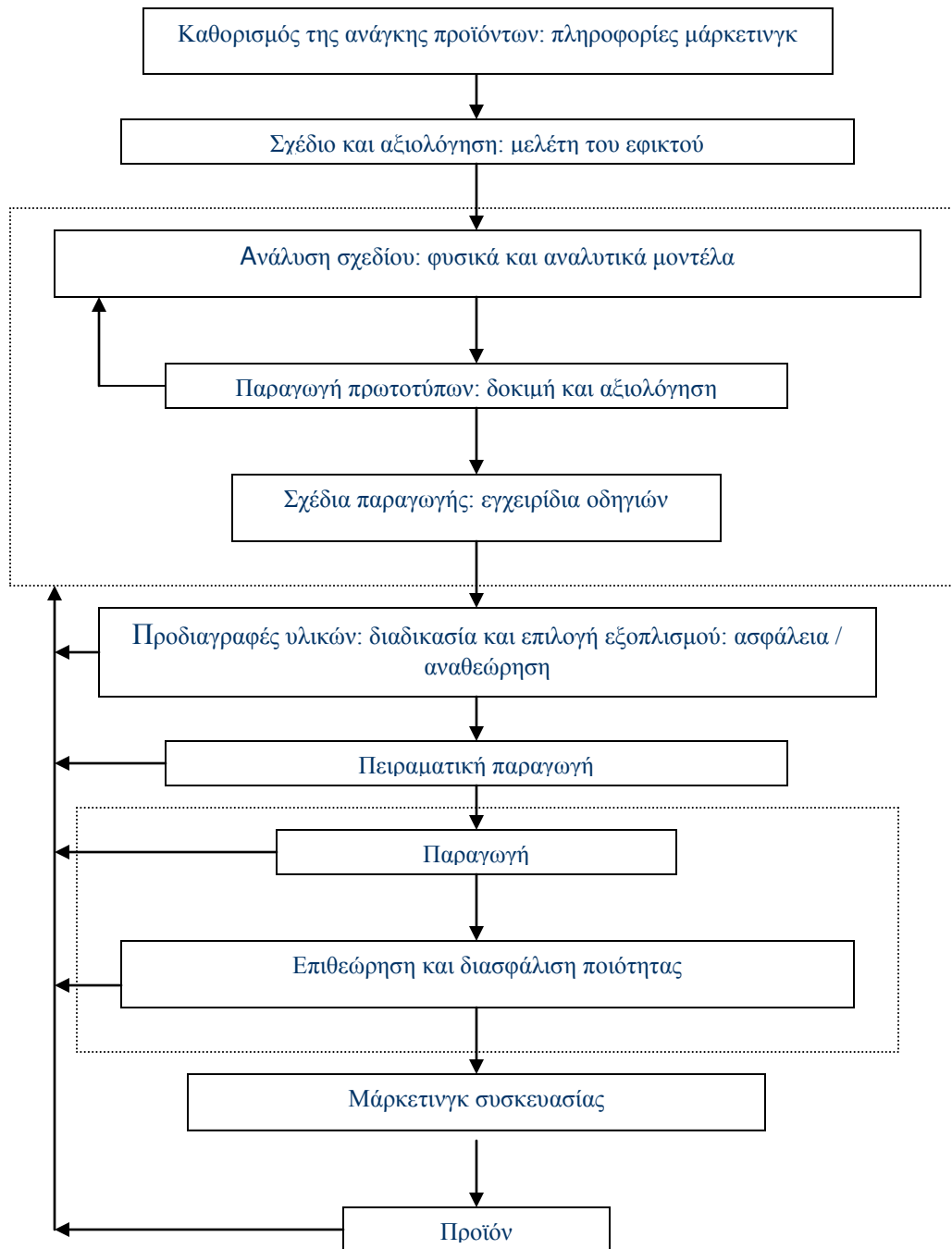
Παραδοσιακά, οι δραστηριότητες του σχεδιασμού και της κατασκευής έχουν καθιερωθεί ως διαδοχικές και όχι ως ταυτόχρονες ή παράλληλες. Στους κατασκευαστές μηχανικούς δινόταν τα λεπτομερή σχέδια και οι προδιαγραφές του προϊόντος και τους ζητούνταν να το παράγουν. Αντιμετώπιζαν όμως συχνά δυσκολίες επειδή οι σχεδιαστές μηχανικοί δεν μπορούσαν να προβλέψουν από πριν τα προβλήματα παραγωγής που ήταν πιθανό να εμφανιστούν. Αυτή η κατάσταση έχει βελτιωθεί πολύ με την χρήση της *ταυτόχρονης εφαρμοσμένης μηχανικής* (Concurrent Engineering - CE). Η ταυτόχρονη εφαρμοσμένη μηχανική είναι μια συστηματική προσέγγιση που ενσωματώνει το σχέδιο και την κατασκευή των προϊόντων με την όψη της βελτιστοποίησης όλων των στοιχείων που περιλαμβάνονται στον κύκλο ζωής του προϊόντος. Ο κύκλος ζωής σημαίνει ότι όλες οι πτυχές ενός προϊόντος, όπως το σχέδιο, η ανάπτυξη, η παραγωγή, η διανομή, η χρήση, και η τελευταία διάθεσή του και η ανακύκλωση, θεωρούνται ταυτόχρονα. Ο βασικός στόχος του CE είναι να ελαχιστοποιηθούν οι σχεδιαστικές αλλά και μηχανολογικές αλλαγές του προϊόντος καθώς και ο χρόνος και το κόστος που περιλαμβάνονται στη λήψη του προϊόντος από την έννοια σχεδίου έως την παραγωγή και την εισαγωγή του προϊόντος στην αγορά. Μια επέκταση της CE που καλείται *άμεση εφαρμοσμένη μηχανική* (Direct Engineering - DE) έχει προταθεί πρόσφατα. Η DE χρησιμοποιεί μια βάση δεδομένων που αντιπροσωπεύει την λογική εφαρμοσμένης μηχανικής που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό κάθε κομματιού ενός προϊόντος. Εάν μια τροποποίηση σχεδίου γίνεται σε ένα μέρος, το DE θα καθορίσει τις συνέπειες κατασκευής εκείνης της αλλαγής.

Αν και η έννοια της ταυτόχρονης εφαρμοσμένης μηχανικής φαίνεται αρκετά λογική και αποδοτική, η εφαρμογή της μπορεί να απαιτεί ιδιαίτερο χρόνο και προσπάθεια όταν

δεν λειτουργούν ομαδικά εκείνοι που την χρησιμοποιούν είτε όταν αποτυγχάνουν να εκτιμήσουν τα πραγματικά οφέλη της. Είναι προφανές ότι για να πετύχει η CE πρέπει να έχει την πλήρη υποστήριξη της ανώτερης διαχείρισης, να υπάρχει μια πολυσύνθετη και αλληλεπιδραστική ομάδα εργασίας, συμπεριλαμβανομένων των ομάδων υποστήριξης, και τέλος να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες.

Τόσο για τις μεγάλες όσο και για τις μικρές επιχειρήσεις, το σχέδιο των προϊόντων περιλαμβάνει συχνά την προετοιμασία αναλυτικών και φυσικών μοντέλων του προϊόντος ως ενίσχυση στην ανάλυση παραγόντων όπως οι δυνάμεις, οι πιέσεις, η βέλτιστη μορφή μερών του προϊόντος κ.λ.π. Η ανάγκη για τέτοια μοντέλα εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προϊόντος. Σήμερα, η κατασκευή και η μελέτη των αναλυτικών μοντέλων απλοποιείται με τη βοήθεια των υπολογιστών, της εφαρμοσμένης μηχανικής, και των τεχνικών κατεργασίας. Κατά την χρήση αυτών των μοντέλων, ο σχεδιαστής προϊόντων επιλέγει και προσδιορίζει την τελική μορφή και τις διαστάσεις του προϊόντος, την ακρίβεια στις διαστάσεις και την τελική επιφάνεια, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Η εκλογή των υλικών γίνεται συχνά και με τις συμβουλές και τη συνεργασία ειδικών της επιστήμης των υλικών, εκτός αν ο σχεδιαστής μηχανικός είναι αρκετά πεπειραμένος και εξειδικευμένος σε αυτήν την περιοχή. Ένα ισχυρό και αποτελεσματικό εργαλείο, ιδιαίτερα για τα σύνθετα σύστημα παραγωγής, είναι η προσομοίωση υπολογιστών στην αξιολόγηση της απόδοσης του προϊόντος και τον προγραμματισμό του συστήματος κατασκευής ώστε να παραχθεί το προϊόν. Τελευταία μάλιστα έχουν αναπτυχθεί διάφορες γλώσσες προσομοίωσης υπολογιστών με πολλές δυνατότητες.

Το επόμενο βήμα στη διαδικασία παραγωγής είναι να γίνει και να εξεταστεί ένα πρωτότυπο, δηλαδή ένα αυθεντικό μοντέλο του προϊόντος. Μια σημαντική νέα τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η *γρήγορη διαμόρφωση πρωτοτύπου* (Rapid Prototyping), η οποία στηρίζεται στα CAD / CAM και τις διάφορες τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή πρωτοτύπων υπό μορφή στερεού φυσικού μοντέλου ενός κομματιού, γρήγορα και σε χαμηλό κόστος. Οι δοκιμές στα πρωτότυπα πρέπει να σχεδιαστούν για να μιμηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το προϊόν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Πρέπει να περιλαμβάνουν και περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, καθώς επίσης και τα



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα που εμφανίζει τα διάφορα βήματα που περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός προϊόντος. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προϊόντος και τον τύπο υλικών που χρησιμοποιούνται, η χρονική έκταση μεταξύ της αρχικής ιδέας και του μάρκετινγκ ενός προϊόντος μπορεί να κυμανθεί από λίγους μήνες έως και πολλά χρόνια. Η ταυτόχρονη εφαρμοσμένη μηχανική (CE) συνδυάζει αυτά τα στάδια για να μειώσει τη χρονική έκταση και να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα.

αποτελέσματα της δόνησης και της επαναλαμβανόμενης χρήσης αλλά και της κακής χρήσης του προϊόντος. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, τροποποιήσεις στο αρχικό σχέδιο, στα υλικά που επιλέγονται, ή τις μεθόδους παραγωγής μπορεί να είναι αναγκαίες

Αφού ολοκληρωθεί και αυτή η φάση, η κατάλληλη διαδικασία, οι μέθοδοι κατεργασίας, ο εξοπλισμός, και τα απαραίτητα εργαλεία, επιλέγονται με τη συνεργασία των κατασκευαστών μηχανικών, των αρμόδιων για το σχεδιασμό διαδικασίας, και όλων όσων περιλαμβάνει η παραγωγή.

1.3 ΣΧΕΔΙΟ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ

Όπως έχουμε δει, το σχέδιο και η κατεργασία πρέπει να είναι άμεσα συσχετιζόμενα. Δεν πρέπει ποτέ να θεωρηθούν ως χωριστές δραστηριότητες. Κάθε μέρος ή συστατικό ενός προϊόντος πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε όχι μόνο να καλύπτει τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του σχεδίου, αλλά και να μπορεί να κατεργασθεί οικονομικά και με σχετική ευκολία. Αυτή η προσέγγιση βελτιώνει την παραγωγικότητα και επιτρέπει σε έναν κατασκευαστή να παραμείνει ανταγωνιστικός.

Αυτή η ευρεία όψη αναγνωρίζεται σήμερα ως η περιοχή του σχεδίου για την κατασκευή (design for manufacture - DFM). Είναι μια περιεκτική προσέγγιση στην παραγωγή των αγαθών και ενσωματώνει τη διαδικασία σχεδιασμού με τα υλικά, τις μεθόδους κατεργασίας, τους προγραμματισμούς διαδικασίας, την συναρμολόγηση, την δοκιμή, και την ποιοτική διασφάλιση. Το σχέδιο που απαιτείται για την κατασκευή προϋποθέτει οι σχεδιαστές να έχουν μια θεμελιώδη γνώση των χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων, των μεθόδων κατεργασίας, και των σχετικών διαδικασιών των μηχανημάτων και του αναγκαίου εξοπλισμού. Οι σχεδιαστές μηχανικοί αλλά και οι μηχανικοί παραγωγής πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσουν τον αντίκτυπο των τροποποιήσεων του σχεδίου στην επιλογή μεθόδου κατασκευής, στα εργαλεία, στην συναρμολόγηση, στην επιθεώρηση, και στο κόστος προϊόντων. Τα σχέδια, η εφαρμοσμένη μηχανική, οι κατασκευές, και οι τεχνικές προγραμματισμού διαδικασιών, που υποβοηθούνται από υπολογιστές, χρησιμοποιώντας ισχυρά προγράμματα υπολογιστών, έχουν γίνει απαραίτητα σε εκείνους που διευθύνουν μια τέτοια ανάλυση.

Οι νέες εξελίξεις περιλαμβάνουν και τα έμπειρα σύστημα, τα οποία έχουν δυνατότητες βελτιστοποίησης, επισπεύδοντας κατά συνέπεια την παραδοσιακή επαναληπτική διαδικασία κατά την βελτιστοποίηση σχεδίου.

Αφότου έχουν κατασκευαστεί τα μεμονωμένα μέρη, συναρμολογούνται σε ένα προϊόν. Η συναρμολόγηση είναι μια σημαντική φάση της γενικής λειτουργίας κατασκευής και απαιτεί την εκτίμηση της ευκολίας, της ταχύτητας, και του κόστους της τοποθέτησης των διαφόρων κομματιών μαζί. Επίσης, πολλά προϊόντα πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε η αποσυναρμολόγηση να είναι δυνατή με σχετική ευκολία και τη λιγότερη δυνατή χρονική κατανάλωση, γεγονός που θα επιτρέπει στα προϊόντα να λαμβάνονται χώρια για τη συντήρηση, την επισκευή, ή την ανακύκλωση των συστατικών τους. Επειδή οι διαδικασίες συναρμολόγησης μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στο κόστος των προϊόντων, το σχέδιο για την συναρμολόγηση (design for assembly - DFA) καθώς επίσης και το σχέδιο για την αποσυναρμολόγηση (design for disassembly – DFD) αναγνωρίζονται τώρα ως σημαντικές πτυχές της κατασκευής. Διάφορες μεθοδολογίες και λογισμικό υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί τελευταία για DFA χρησιμοποιώντας 3-D τεχνικές.

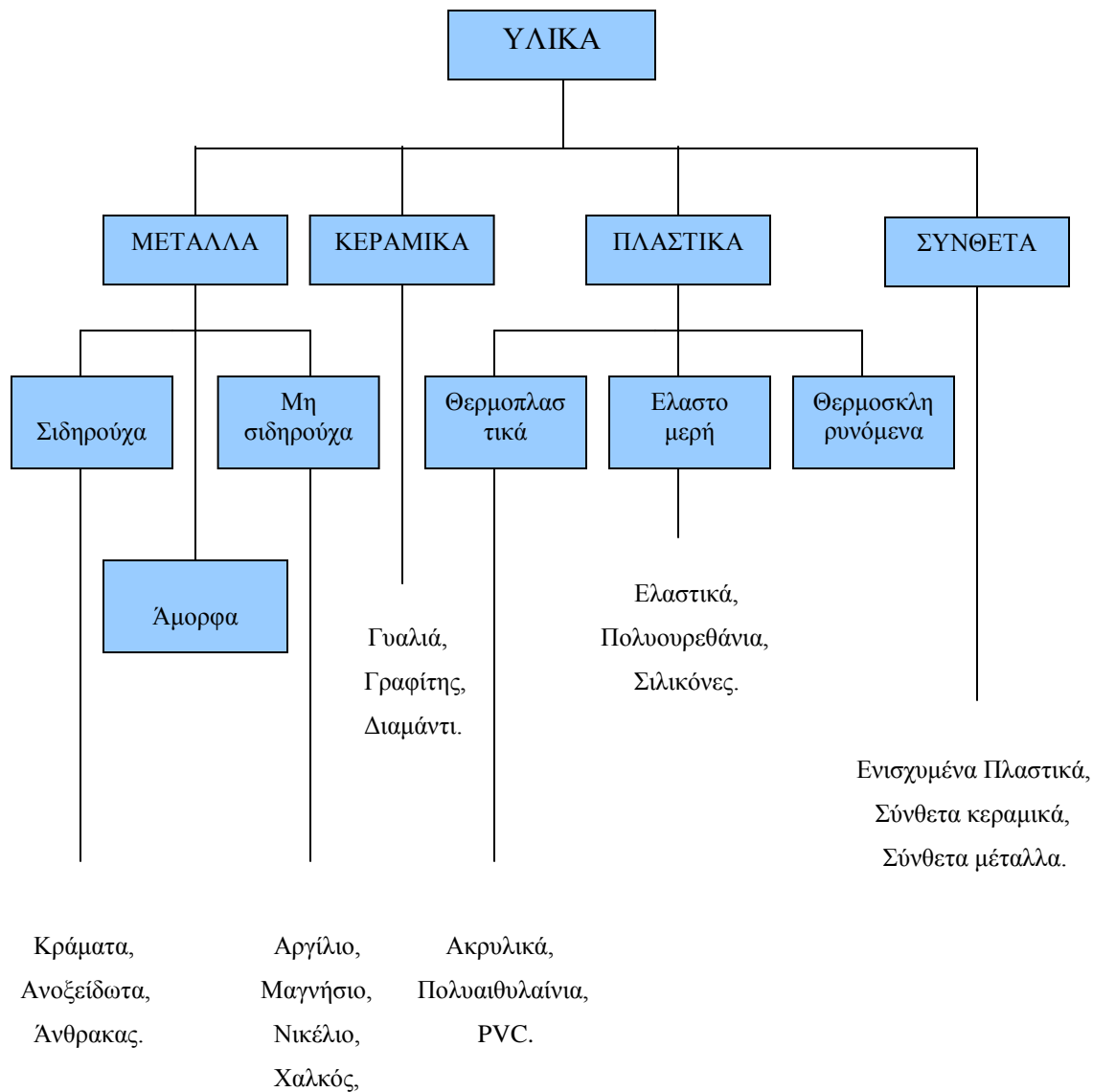
1.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Σήμερα μια συνεχώς αυξανόμενη ποικιλία υλικών είναι διαθέσιμη, κάθε ένα από τα οποία έχει τα χαρακτηριστικά του, τις εφαρμογές του, τα πλεονεκτήματα του, καθώς και κάποιους περιορισμούς για την χρησιμοποίησή του. Παρακάτω αναφέρονται οι γενικοί τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται για τις κατεργασίες σήμερα, είτε χωριστά είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους :

- *Σιδηρούχα μέταλλα* : κράματα, ανοξείδωτα, άνθρακας.
- *Μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα*: αργίλιο, μαγνήσιο, χαλκός, νικέλιο, τιτάνιο, πυρίμαχα μέταλλα, βηρύλλιο, ζirkόνιο, και άλλα πολύτιμα μέταλλα.
- *Πλαστικά* : θερμοπλαστικά, ελαστομερή.
- *Κεραμικά* : γυαλιά, γραφίτης, διαμάντια.
- *Σύνθετα υλικά* : ενισχυμένα πλαστικά, σύνθετα κεραμικά και μέταλλα.

1.4.1 Ιδιότητες των υλικών

Κατά επιλογή των υλικών για τα προϊόντα, αρχικά εξετάζουμε τις μηχανικές τους ιδιότητες, δηλαδή την δύναμη, την ανθεκτικότητα, την ολκιμότητα, την σκληρότητα, την ελαστικότητα, την κόπωση, και τον ερπυσμό. Οι αναλογίες της δύναμης προς το βάρος καθώς και της ακαμψίας προς το βάρος είναι επίσης αρκετά σημαντικές. Για παράδειγμα,



Σχήμα 1.2 : Περίγραμμα των υλικών κατεργασίας.

το τιτάνιο, το αλουμίνιο, και τα ενισχυμένα πλαστικά, έχουν υψηλότερη αναλογία δύναμης προς βάρος από τους χάλυβες. Οι μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται για ένα προϊόν και τα συστατικά του, πρέπει να είναι κατάλληλα για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το προϊόν αναμένεται για να λειτουργήσει. Στην συνέχεια εξετάζουμε τις φυσικές ιδιότητες, όπως την πυκνότητα, την ειδική θερμότητα, την θερμική αγωγιμότητα, το σημείο βρασμού, καθώς και τις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες. Οι χημικές ιδιότητες διαδραματίζουν επίσης έναν σημαντικό ρόλο τόσο στα εχθρικά όσο και στα κανονικά περιβάλλοντα. Η οξειδωση, η διάβρωση, η τοξικότητα και το εύφλεκτο των υλικών είναι μεταξύ των σημαντικών παραγόντων που θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Οι ιδιότητες κατασκευής των υλικών, τέλος, καθορίζουν το κατά πόσο αυτά μπορούν να διαμορφωθούν με σχετική ευκολία καθώς επίσης και με την μέθοδο με την οποία θα μπορούσε να συμβεί αυτό. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι και το γεγονός ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των υλικών και την μετατροπή τους στις επιθυμητές μορφές, μπορούν να έχουν επιπτώσεις στις τελικές ιδιότητες των προϊόντων, την διάρκεια ζωής, καθώς και το κόστος κατασκευής τους.

1.4.2 Κόστος και διαθεσιμότητα

Το κόστος και η διαθεσιμότητα των ακατέργαστων και κατεργασμένων υλικών καθώς και των συστατικών τους είναι παράγοντες που θα πρέπει να εξετασθούν αναλυτικά στην κατασκευή. Οι οικονομικές πτυχές της επιλογής υλικών είναι τόσο σημαντικές όσο οι τεχνολογικές εκτιμήσεις των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών των υλικών. Εάν τα ακατέργαστα ή κατεργασμένα υλικά ή ακόμη και τα συστατικά τους δεν είναι εμπορικά διαθέσιμα στις επιθυμητές μορφές, τις διαστάσεις, και τις ποσότητες που απαιτούνται, τότε υποκατάστατα υλικά και πιθανότατα πρόσθετη επεξεργασία θα απαιτηθεί, γεγονός που θα συμβάλει σημαντικά στην αύξηση του κόστους των προϊόντων. Παράλληλα η αξιοπιστία του ανεφοδιασμού, καθώς επίσης και η ζήτηση, έχουν επιπτώσεις στο κόστος. Οι περισσότερες χώρες εισάγουν πολυάριθμα ακατέργαστα υλικά που είναι αναγκαία για την παραγωγή. Οι Ηνωμένες Πολιτείες, παραδείγματος χάριν, εισάγουν την πλειοψηφία τέτοιων ακατέργαστων υλικών όπως το φυσικό λάστιχο, το διαμάντι, το

κοβάλτιο, το τιτάνιο, το χρώμιο, το αργίλιο, και το νικέλιο, από διάφορες άλλες χώρες. Διάφορα είδη κόστους περιλαμβάνονται στην διαδικασία επεξεργασίας των υλικών με την χρήση διαφορετικών μεθόδων. Μερικές μέθοδοι απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, άλλες έχουν υψηλό κόστος εργασίας, ενώ άλλες απαιτούν προσωπικό με ειδικές ικανότητες, υψηλό επίπεδο εκπαίδευσης, ή και ειδικευμένη κατάρτιση.

1.4.3 Εμφάνιση και διάρκεια ζωής

Η εμφάνιση των υλικών, αφότου έχουν μετατραπεί σε τελικά προϊόντα, επηρεάζει την έκκλησή τους στον καταναλωτή. Το χρώμα, η αίσθηση, και η σύσταση επιφάνειας είναι χαρακτηριστικά που όλοι λαμβάνουμε υπόψη κατά την απόφαση αγοράς ενός προϊόντος. Συνιστώσες όπως η κόπωση, ο ερπυσμός, αλλά και η σταθερότητα των διαστάσεων είναι επίσης πολύ σημαντικές. Τα παραπάνω φαινόμενα μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση ενός προϊόντος και, εάν δεν ελέγχονται, μπορούν ακόμη και να οδηγήσουν σε συνολική αποτυχία του προϊόντος. Παράλληλα και η συμβατότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται σε ένα προϊόν είναι σημαντική. Φαινόμενα όπως η τριβή, η διάβρωση, και άλλα παρόμοια μπορούν να μικρύνουν την συνολική διάρκεια ζωής ενός προϊόντος και να προκαλέσουν και την πρόωρη καταστροφή του.

1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πολλές διαδικασίες χρησιμοποιούνται για να παράγουν κομμάτια προϊόντων αλλά και διάφορες μορφές. Όπως είναι λογικό, συνήθως υπάρχουν περισσότερες από μια μέθοδοι για την κατασκευή ενός τμήματος από ένα συγκεκριμένο υλικό. Οι ευρείες κατηγορίες μεθόδων κατεργασίας των υλικών είναι :

- *Χύτευση* : αναλώσιμη και μόνιμη φόρμα.
- *Διαμόρφωση και μορφοποίηση* : έλαση, σφυρηλάτηση, εξέλαση κ.λ.π.
- *Κατεργασίες αποβολής υλικού* : φρεζάρισμα, διάνοιξη εσωτερικής διαμέτρου, διάτρηση, πλανάρισμα, τορνάρισμα, χημική, ηλεκτρική, και ηλεκτροχημική κατεργασία, κ.λ.π.

- *Συννένωση* : συγκόλληση, σύνδεση διάχυσης, μηχανικές συγκολλήσεις, κ.λ.π.
- *Κατεργασίες αποπεράτωσης* : ακόνισμα, στίλβωση, κ.λ.π.

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου κατεργασίας εξαρτάται όχι μόνο από τη μορφή των συστατικών ή των τμημάτων που πρόκειται να παραχθούν αλλά και από πολλούς άλλους παράγοντες. Ο τύπος του υλικού και οι ιδιότητες του είναι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα εύθραυστα και σκληρά υλικά, παραδείγματος χάριν, δεν μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα, αλλά μπορούν να υποστούν χύτευση ή κάποια κατεργασία αποβολής υλικού με την βοήθεια διαφόρων μεθόδων. Η διαδικασία της κατεργασίας αλλάζει συνήθως τις ιδιότητες των υλικών. Τα μέταλλα που διαμορφώνονται σε θερμοκρασία δωματίου, παραδείγματος χάριν, γίνονται ισχυρότερα, σκληρότερα, και λιγότερο όλκιμα από ήταν πριν από την επεξεργασία.

1.5.1 Διαστάσεις και επιφάνεια

Το μέγεθος, το πάχος, και η πολυπλοκότητα του σχήματος του τμήματος που παράγεται, έχουν ένα σημαντικό ρόλο στη μέθοδο που επιλέγεται για να το παράγει. Επίπεδα κομμάτια με λεπτές διατομές, παραδείγματος χάριν, δεν έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά κατά την χύτευση. Σύνθετα τμήματα δεν μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα και οικονομικά, ενώ μπορούν να υποστούν χύτευση ή να κατασκευαστούν από μεμονωμένα κομμάτια καθώς και να παρασκευαστούν με τεχνικές μεταλλουργίας κόνεων. Οι ανοχές και η ποιότητα επιφάνειας που προκύπτουν κατά την κατεργασία εν θερμώ, δεν μπορούν να είναι τόσο καλές όσο εκείνες που προκύπτουν κατά την κατεργασία εν ψυχρώ. Οι αλλαγές στις διαστάσεις καθώς και η οξείδωση επιφάνειας εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας σε ανυψωμένες θερμοκρασίες. Μερικές διαδικασίες χύτευσης παράγουν μια καλύτερη ποιότητα επιφάνειας από άλλες λόγω των διαφορετικών τύπων υλικών που χρησιμοποιούνται. Από όλα τα παραπάνω φαίνεται ότι το μέγεθος και η μορφή των κατασκευασμένων προϊόντων ποικίλλουν ευρέως.

1.5.2 Κόστος λειτουργίας και κατεργασίας

Το σχέδιο και το κόστος της σχεδίασης, η χρονική διάρκεια που απαιτείται για να αρχίσει η παραγωγή, και η επίδραση των υλικών των κομματιών προς κατεργασία στην διάρκεια ζωής των εργαλείων, είναι σημαντικές παράμετροι που δεν πρέπει να λησμονηθούν. Το κόστος του εξοπλισμού μπορεί να είναι ουσιαστικό, ανάλογα με το μέγεθος εργαλείων, το σχέδιο, και την αναμενόμενη διάρκεια ζωής. Για τα κομμάτια που γίνονται από ακριβά υλικά, όσο χαμηλότερο είναι το ποσοστό απορριμμάτων, τόσο πιο οικονομική θα είναι η διαδικασία παραγωγής. Επειδή η κατεργασία παράγει απόβλητο, μπορεί να μην έχουμε πιο οικονομικό αποτέλεσμα από ότι θα είχαμε εάν χρησιμοποιούσαμε μια διαδικασία διαμόρφωσης, με όλους τους άλλους εξωτερικούς παράγοντες να μένουν σταθεροί. Η διαθεσιμότητα των μηχανών και του εξοπλισμού αλλά και η εμπειρία όσον αφορά τις λειτουργίες μέσα στη διαδικασία της κατασκευής, είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες κόστους. Εάν μερικά κομμάτια δεν είναι διαθέσιμα, ίσως να χρειαστεί να παραχθούν από εξωτερικούς κατασκευαστές.

1.5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η λειτουργία των μηχανημάτων, στις διάφορες μεθόδους κατεργασίας, έχει και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ανάλογα με τον τύπο λειτουργίας και μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται, μερικές διαδικασίες έχουν επιπτώσεις καταστροφικές για το περιβάλλον. Εκτός αν ελέγχονται κατάλληλα, τέτοιες διαδικασίες μπορούν να προκαλέσουν την μόλυνση του αέρα, του νερού, αλλά και να αυξήσουν επικίνδυνα την ηχορύπανση. Η ασφαλής χρήση του μηχανικού εξοπλισμού είναι άλλη μια σημαντική προτεραιότητα, που επιβάλλει τις αναγκαίες προφυλάξεις για να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι στις θέσεις εργασίας. Παρόλα αυτά πολλοί από τους παραπάνω κίνδυνους, όσον αφορά την ασφάλεια και το περιβάλλον, μπορούν να μειωθούν με την προσεκτική ανάλυση των προϊόντων, του σχεδίου τους, των υλικών που χρησιμοποιούνται, και των διαδικασιών και των μεθόδων κατεργασίας που υιοθετούνται στην παραγωγή των προϊόντων αυτών.

Τον παραπάνω σκοπό μπορούμε να τον επιτύχουμε λαμβάνοντας ειδικά μέτρα, όπως αναφέρονται παρακάτω :

- Μειώνοντας τα απόβλητα των υλικών στην πηγή προέλευσης τους, με ειδικές τροποποιήσεις στο σχέδιο των προϊόντων και μειώνοντας την ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται.
- Πραγματοποιώντας έρευνες και ταυτόχρονα αναπτύσσοντας περιβαλλοντικά ασφαλή προϊόντα και ανάλογες μεθόδους κατεργασίας.
- Μειώνοντας την χρήση επικίνδυνων υλικών στα προϊόντα και τις αντίστοιχες μεθόδους παρασκευής.
- Εξασφαλίζοντας τον κατάλληλο χειρισμό, την διάθεση και την απομάκρυνση όλων των αποβλήτων στους κατάλληλους χώρους.
- Επιτυγχάνοντας βήματα προόδου σε τομείς όπως η ανακύκλωση, η διαχείριση αποβλήτων, και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών.

Σημαντικές εξελίξεις έχουν πραγματοποιηθεί τελευταία όσον αφορά τους παραπάνω προβληματισμούς που θέσαμε. Πλέον οι όροι περιβαλλοντικά συνειδητό σχέδιο και συνειδητή κατασκευή έχουν γίνει κοινά στη βιομηχανία, γεγονός που δείχνει την ευρεία συνειδητοποίηση του προβλήματος. Σημαντική έμφαση δίνεται σήμερα στον *σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη και το περιβάλλον* (DFE). Αυτή η προσέγγιση ερευνά, πριν την κατασκευή, τον πιθανό αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο των υλικών, των προϊόντων, και των διαδικασιών έτσι ώστε μπορούν να επιτευχθούν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στα πρόωρα στάδια του σχεδίου και της παραγωγής. Οι βασικοί στόχοι πλέον είναι η αντιμετώπιση της ρύπανσης στην πηγή της, η ανακύκλωση, και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Αυτοί οι στόχοι έχουν οδηγήσει στην έννοια του *σχεδίου που βασίζεται στην ανακύκλωση* (DFR).

1.6 ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Οι βασικοί στόχοι του αυτοματισμού στις κατασκευαστικές δραστηριότητες είναι η επίτευξη του εκσυγχρονισμού στις διάφορες διαδικασίες με σκοπό να αυξηθεί η παραγωγικότητα, να βελτιωθεί η ποιότητα των προϊόντων αλλά και η ομοιομορφία, να ελαχιστοποιηθούν οι πρότυποι χρόνοι, και να μειωθεί το κόστος εργασίας. Από τη

δεκαετία του '40, η αυτοματοποίηση έχει επιταχυνθεί λόγω των ραγδαίων προόδων στα συστήματα ελέγχου των μηχανών αλλά και στην τεχνολογία υπολογιστών. Λίγες εξελίξεις στην ιστορία των κατασκευών είχαν σημαντικότερο αντίκτυπο από ότι είχαν οι υπολογιστές. Στις ημέρες μας η χρήση των υπολογιστών έχει επεκταθεί και έχει εισχωρήσει ακόμη και στους τομείς του μηχανολογικού σχεδίου και των μηχανολογικών κατασκευών. Έτσι η υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικούς υπολογιστές σχεδίαση και κατασκευή έχει πλέον οδηγήσει στην καθιέρωση ολόκληρων, υποβοηθούμενων από υπολογιστές, κατασκευαστικών συστημάτων. Η χρήση των υπολογιστών καλύπτει μια πολύ ευρεία σειρά εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου και της βελτιστοποίησης των διαδικασιών κατασκευής, του χειρισμού των υλικών, τις συναρμολογήσεις, καθώς και τις αυτοματοποιημένες επιθεωρήσεις και δοκιμές προϊόντων.

1.6.1 Συστήματα ελέγχου μηχανών

Ο *αριθμητικός έλεγχος* (NC) των μηχανών είναι μια μέθοδος ελέγχου των μετακινήσεων των συστατικών των μηχανών με την άμεση εισαγωγή των κωδικοποιημένων οδηγιών υπό μορφή αριθμητικών στοιχείων. Ο αριθμητικός έλεγχος εφαρμόστηκε αρχικά στην πρόωρη δεκαετία του '50 και ήταν μια σημαντική πρόοδος στον αυτοματισμό των μηχανών. Ιδιαίτερα ύστερα από τις συνεχείς προόδους στον τομέα των υπολογιστών, ο αριθμητικός έλεγχος επεκτάθηκε στον *αριθμητικό έλεγχο υπολογιστών* (CNC). Στον *προσαρμοστικό έλεγχο* (AC), οι παράμετροι διαδικασίας ρυθμίζονται αυτόματα για να βελτιστοποιήσουν το ποσοστό παραγωγής και την ποιότητα των προϊόντων και να ελαχιστοποιήσουν τις παραμέτρους κόστους. Παράμετροι όπως οι δυνάμεις, οι θερμοκρασίες, η ποιότητα επιφάνειας και οι διαστάσεις των κομματιών, ελέγχονται συνεχώς με την βοήθεια οθονών. Εάν αυτές κινούνται εκτός των καθορισμένων ορίων, το σύστημα ρυθμίζει αυτόματα τις μεταβλητές διαδικασίας έως ότου οι παράμετροι βρεθούν πάλι εντός των αποδεκτών ορίων.

Σημαντικές προόδους έχουν γίνει στον αυτοματοποιημένο χειρισμό των υλικών στα διάφορα στάδια της τελειοποίησης όπως ο χειρισμός από την αποθήκευση στις μηχανές, από μηχανή σε μηχανή, αλλά και στα σημεία της επιθεώρησης και της αποστολής των τελικών προϊόντων. Πρωτοεμφανιζόμενα την δεκαετία του '60, τα βιομηχανικά ρομπότ

αντικαθιστούν σιγά-σιγά τους ανθρώπους στις διαδικασίες που είναι επαναλαμβανόμενες, ανιαρές, και επικίνδυνες, μειώνοντας κατά συνέπεια τη δυνατότητα του ανθρώπινου σφάλματος, τη μεταβλητότητα στην ποιότητα των προϊόντων, και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα. Τα ρομπότ με τις αισθητήριες δυνατότητες αντίληψης αναπτύσσονται συνεχώς, με αποτέλεσμα οι κινήσεις τους να αρχίζουν να εξομοιώνονται με εκείνες των ανθρώπων. Τα αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα συναρμολόγησης αντικαθιστούν την δαπανηρή συναρμολόγηση που πραγματοποιείται με την βοήθεια κατάλληλων χειριστών. Πλέον τα προϊόντα σχεδιάζονται ή ακόμη και επανασχεδιάζονται έτσι ώστε μπορούν να συναρμολογηθούν ευκολότερα με την βοήθεια των μηχανών.

1.6.2 Τεχνολογία υπολογιστών

Οι υπολογιστές μας επιτρέπουν να ενσωματώσουμε ουσιαστικά όλες τις φάσεις των διαδικασιών κατασκευής, οι οποίες αποτελούνται από διάφορες τεχνικές καθώς επίσης και διευθυντικές δραστηριότητες. Με την βοήθεια περίπλοκου και εκσυγχρονισμένου λογισμικού, οι κατασκευαστές έχουν τώρα την ευχέρεια να ελαχιστοποιήσουν το κόστος κατασκευής, να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων, να μειώσουν το χρόνο ανάπτυξης προϊόντων, και να διατηρήσουν μια ανταγωνιστική πολιτική στις εσωτερικές αλλά και παγκόσμιες αγορές. Η ολοκληρωμένη, με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, κατασκευή (CIM) θεωρείται πλέον ιδιαίτερα αποτελεσματική, με οφέλη όπως :

- Ανταπόκριση στις γρήγορες αλλαγές όσον αφορά την ζήτηση της αγοράς, την τροποποίηση προϊόντων, και τους πιο σύντομους κύκλους ζωής των προϊόντων.
- Υψηλής ποιότητας προϊόντα σε χαμηλό κόστος.
- Καλύτερη χρήση των υλικών, των μηχανημάτων, και του προσωπικού.
- Καλύτερος έλεγχος της παραγωγής και της διαχείρισης της συνολικής λειτουργίας κατασκευής.

Στις ημέρες μας το υποβοηθούμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή σχέδιο (CAD) επιτρέπει στο σχεδιαστή να αντιληφθεί τα αντικείμενα ευκολότερα χωρίς να είναι απαραίτητο να αναλωθεί σε δαπανηρές απεικονίσεις, μοντέλα, ή πρωτότυπα. Αυτά τα σύστημα είναι πλέον ικανά για γρήγορα και πλήρως αναλυτικά σχέδια, από ένα απλό

υποστήριγμα μέχρι και σύνθετες δομές όπως τα φτερά αεροσκαφών. Παράλληλα χρησιμοποιώντας και την *υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή εφαρμοσμένη μηχανική* (CAE), η απόδοση των δομών που υποβάλλονται σε στατικά ή κυμαινόμενα φορτία και θερμοκρασίες μπορεί πλέον να προσομοιωθεί, να αναλυθεί, και να δοκιμασθεί αποτελεσματικότερα, ακριβέστερα, και γρηγορότερα από ότι στο παρελθόν. Πλέον τα σχέδια είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν και να τροποποιηθούν άμεσα και εύκολα ανά πάσα στιγμή. Ταυτόχρονα οι πληροφορίες που αναπτύσσονται μπορούν να καταχωρηθούν, να ανακτηθούν, να παρουσιαστούν, να τυπωθούν, και να μεταφερθούν οπουδήποτε άμεσα.

Η *υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή κατασκευή* (CAM), περιλαμβάνει όλες τις φάσεις της κατασκευής, χρησιμοποιώντας και λαμβάνοντας υπόψη περαιτέρω τον μεγάλο αριθμό πληροφοριών όσον αφορά τα υλικά και οι διαδικασίες, που συλλέγονται και καταχωρούνται στις βάσεων δεδομένων του οργανισμού. Οι υπολογιστές σήμερα βοηθούν σημαντικά τους κατασκευαστές μηχανικούς στην οργάνωση των επί μέρους εργασιών όπως ο προγραμματισμός του αριθμητικού ελέγχου των μηχανών, ο προγραμματισμός των ρομποτικών διατάξεων για την διαχείριση των υλικών, ο σχεδιασμός των εργαλείων και των προσαρτημάτων που απαιτούνται για την παραγωγική διαδικασία καθώς και η διασφάλιση του ορθού ποιοτικού έλεγχου.

Μια άλλη σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται στις ημέρες μας είναι και η *υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή διαδικασία προγραμματισμού* (CAPP). Η τεχνική αυτή είναι ικανή να βελτιώσει την παραγωγικότητα μέσω της βελτιστοποίησης των σχεδίων διαδικασιών, της μείωσης των δαπανών προγραμματισμού, και της βελτίωσης της συνέπειας των λειτουργιών ποιότητας και αξιοπιστίας των προϊόντων. Λειτουργίες όπως η εκτίμηση των δαπανών και του επιπέδου εργασίας μπορούν επίσης να ενσωματωθούν στο σύστημα.

Η *τεχνητή νοημοσύνη* (AN), τέλος, περιλαμβάνει τη χρήση των μηχανών και των υπολογιστών με τρόπο τέτοιο ώστε να αντικαταστήσουν τελικά την ανθρώπινη νοημοσύνη. Τα συστήματα που ελέγχονται από υπολογιστές γίνονται μέρα με την μέρα ικανά να μαθαίνουν μέσω εμπειριών και να λαμβάνουν αποφάσεις που βελτιστοποιούν τις διαδικασίες και ελαχιστοποιούν τις δαπάνες. Ειδικότερα τα έμπειρα σύστημα, τα οποία είναι ευφυή προγράμματα υπολογιστών, αναπτύσσονται γρήγορα έχοντας

τρομερές δυνατότητες όσον αφορά την λύση δύσκολων ρεαλιστικών προβλημάτων, που μόνο ειδικοί εμπειρογνώμονες θα μπορούσαν να λύσουν. Ως εκ τούτου εύκολα καταλαβαίνει κανείς την σπουδαιότητα και χρησιμότητα τα συστημάτων αυτών. Ταυτόχρονα με τις προόδους στα *τεχνητά νευρωνικά δίκτυα* (ANN), που σχεδιάζονται για να προσομοιώσουν την διαδικασία σκέψης του ανθρώπινου εγκεφάλου, τα παραπάνω συστήματα έχουν πλέον την δυνατότητα της μοντελοποίησης και προσομοίωσης των παραγωγικών λειτουργιών, της επιτήρησης και ελέγχου των κατασκευαστικών διαδικασιών, της διάγνωσης πιθανών προβλημάτων στην απόδοση των μηχανών, της διεύθυνσης οικονομικού προγραμματισμού, ακόμη και διαχείρισης της στρατηγικής μιας επιχείρησης.

Μπορούμε πλέον να οραματιστούμε το *εργοστάσιο του μέλλοντος*, στο οποίο η παραγωγική διαδικασία θα λαμβάνει χώρα με ελάχιστη, ίσως και μηδαμινή, άμεση ανθρώπινη μεσολάβηση. Ο άνθρωπος ρόλος θα εντοπίζεται στην επίβλεψη, την συντήρηση, και την αναβάθμιση των μηχανών, των υπολογιστών και του λογισμικού. Ο αντίκτυπος τέτοιων προόδων στο εργατικό δυναμικό δεν μένει παρά να αξιολογηθεί πλήρως [5].

1.7 ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Η ποιότητα των προϊόντων είναι πάντα μια από τις σημαντικότερες πτυχές της κατασκευής, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα την εμπορευσιμότητα των προϊόντων και της ικανοποίησης των πελατών. Παραδοσιακά, η διασφάλιση της ποιότητας συνηθίζεται να πραγματοποιείται με την επιθεώρηση των μερών των προϊόντων αφότου αυτά έχουν κατασκευαστεί. Τα κομμάτια αυτά επιθεωρούνται για να εξασφαλίσουν ότι προσαρμόζονται σε ένα λεπτομερές σύνολο προδιαγραφών και προτύπων όπως οι διαστάσεις, η ποιότητα επιφάνειας, αλλά και οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες τους. Εντούτοις, η ποιότητα δεν μπορεί ουσιαστικά να επιθεωρηθεί σε ένα προϊόν αφότου έχει πραγματοποιηθεί η παραγωγή του. Η μέχρι τώρα εφαρμογή της επιθεώρησης των προϊόντων αφότου αυτά παραχθούν, αντικαθίσταται τελευταία από την ευρύτερη άποψη ότι η ποιότητα πρέπει να εξασφαλισθεί σε ένα προϊόν ξεκινώντας από το στάδιο του αρχικού σχεδίου και λαμβάνοντας υπόψη και όλα τα ενδιάμεσα στάδια, όπως αυτά της

κατασκευής και της συναρμολόγησης, έως ότου φθάσουμε στην τελική παραγωγή του προϊόντος. Επειδή τα προϊόντα παρασκευάζονται συνήθως με τη χρησιμοποίηση διάφορων διαδικασιών κατασκευής, που μπορούν να έχουν σημαντικές παραλλαγές στην απόδοσή τους ακόμη και μέσα σε μια μικρή χρονική περίοδο, ο έλεγχος των διαδικασιών αυτών είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όσον αφορά την ποιότητα των προϊόντων. Σύμφωνα με τα παραπάνω αυτό που πραγματικά κάνουμε είναι να ελέγχουμε τις διαδικασίες και όχι κατά ανάγκη τα προϊόντα. Η παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή στον κατασκευαστή, δημιουργώντας ποικίλες δυσκολίες στις διαδικασίες συναρμολόγησης, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά πιθανή και η δυσaréσκεια του πελάτη. Αντίθετα από τη γενική δημόσια άποψη, τα χαμηλής ποιότητας προϊόντα δεν κοστίζουν απαραίτητα λιγότερο από ότι τα υψηλής ποιότητας προϊόντα.

Η ισχυρή τάση στην παγκόσμια κατασκευή και την ανταγωνιστικότητα έχει δημιουργήσει την ανάγκη για τη διεθνή συμμόρφωση και συναίνεση σχετικά με την καθιέρωση των μεθόδων ποιοτικού ελέγχου. Αυτό έχει οδηγήσει στην εγκαθίδρυση του Διεθνή Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) και πιο συγκεκριμένα στην σειρά ISO 9000 όσον αφορά την ποιοτική διαχείριση και τα πρότυπα ποιοτικής διασφάλισης. Η εγγραφή μιας επιχείρησης για αυτά τα πρότυπα, που είναι στην ουσία μια πιστοποίηση ποιοτικών διαδικασιών και όχι μια πιστοποίηση προϊόντων, σημαίνει ότι η επιχείρηση προσαρμόζεται στις συνεπείς πρακτικές όπως προσδιορίζονται από το δικό της ποιοτικό σύστημα. Το ISO 9000 έχει επηρεάσει μόνιμα τον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις διευθύνουν τις συναλλαγές τους στο παγκόσμιο εμπόριο και γίνεται γρήγορα το παγκόσμιο πρότυπο ποιότητας.

1.8 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ασφαλών προϊόντων είναι ένα σημαντικό και ακέραιο μέρος των ευθυνών ενός κατασκευαστή. Όλοι εκείνοι που αναμιγνύονται με το σχέδιο, την κατασκευή, και το μάρκετινγκ των προϊόντων πρέπει να έχουν πλήρη επίγνωση των συνεπειών της πιθανής αποτυχίας των προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των αποτυχιών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της πιθανής κακής χρήσης του προϊόντος. Έχει υπάρξει ένας πολλαπλασιασμός των αξιώσεων αξιοπιστίας προϊόντων, των ποικίλων

βαθμών αξίας, που γίνονται ενάντια στους κατασκευαστές του βιομηχανικού εξοπλισμού, ιδιαίτερα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ανθρώπινοι παράγοντες όπως η εφαρμοσμένη μηχανική και εργονομικές οι εκτιμήσεις είναι σημαντικές πτυχές του σχεδίου και της κατασκευής των ασφαλών προϊόντων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Θέλοντας να κάνουμε μια εισαγωγή όσον αφορά την έννοια της κατεργασίας της κοπής, μπορούμε να πούμε πως πρόκειται για μια τεχνική που στοχεύει στην επιτυχή παραγωγή της επιθυμητής μορφής του προς κατεργασία κομματιού. Επιθυμητός στόχος μπορεί να είναι ακόμη και η βελτίωση των ανοχών και της ποιότητας της επιφάνειας ενός προηγουμένως ήδη κατεργασμένου κομματιού, γεγονός που επιτυγχάνεται με την αφαίρεση του υπερβολικού υλικού υπό μορφή αποβλήτου μέσω ενός μεταλλικού κοπτικού εργαλείου εργαλειομηχανής. Η κατεργασία της κοπής είναι ικανή να επιτύχει γεωμετρικές διαμορφώσεις, ανοχές και ποιότητα επιφάνειας που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική. Εντούτοις, η κοπή αφαιρεί υλικό, για το οποίο έχουν ήδη ξοδευτεί χρήματα, υπό μορφή αποβλήτου που είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί. Ως εκ τούτου οι εξελίξεις στοχεύουν συχνά στη μείωση ή, εάν είναι δυνατό, στην μη χρησιμοποίηση της τεχνικής της κοπής, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε μαζική παραγωγή. Για τον παραπάνω λόγω άλλωστε η μαζική βιομηχανική μορφοποίηση των περισσοτέρων μεταλλικών αντικειμένων γίνεται κυρίως με διαμόρφωση του υλικού ή με χύτευση. Παρακάτω γίνεται προσπάθεια να αναλυθεί εκτενώς η κατεργασία της κοπής.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Οι βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές (αυτές δηλαδή που μπορούν να αλλάξουν άμεσα) στην διαδικασία κοπής είναι :

- Το υλικό του κοπτικού εργαλείου.
- Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου, η ποιότητα της επιφάνειας του, καθώς και η οξύτητά του.

- Το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου καθώς και η θερμοκρασία.
- Οι συνθήκες κοπής, όπως η ταχύτητα και το βάθος κοπής αλλά και η πρόωση.
- Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως η ακαμψία κ.λ.π.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι αυτές που επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Τέτοιες είναι :

- Ο τύπος του αποβλήτου που παράγεται.
- Οι δυνάμεις και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διαδικασία της κοπής.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας στο ως προς κατεργασία τεμάχιο, στο απόβλητο, και το κοπτικό εργαλείο.
- Η φθορά και η καταστροφή του κοπτικού εργαλείου.
- Η ποιότητα της επιφάνειας που παράγεται στο κομμάτι μετά το τέλος της κατεργασίας.

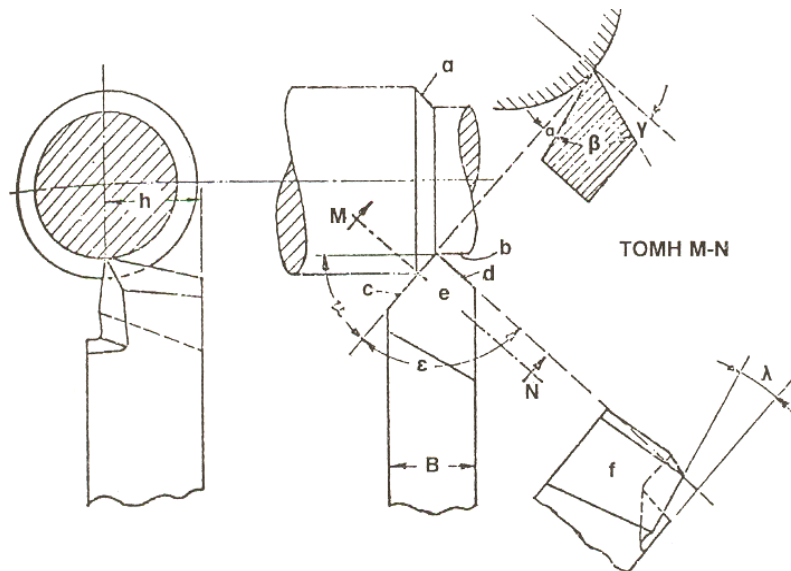
Από τις βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές που αναφέραμε παραπάνω, αυτές που είναι πιο σημαντικές στην κατεργασία της κοπής είναι :

Η ταχύτητα κοπής : Είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής.

Το βάθος κοπής : Είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου.

Η πρόωση : Είναι η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Η κίνηση της πρόωσης στον τόρνο γίνεται από το κοπτικό εργαλείο, αλλά σε άλλες περιπτώσεις είναι δυνατό να γίνει και από το προς κατεργασία τεμάχιο. Στον τόρνο, ειδικότερα, μπορούμε να πούμε πως η πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικείμενου.

Δύο βασικοί παράγοντες της κατεργασίας κοπής είναι η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται αλλά και το κοπτικό εργαλείο. Όσον αφορά την εργαλειομηχανή αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως, ειδικά στην περίπτωση της περίπτωση κοπής με απλή σημειακή επαφή, είναι ο τόρνος. Από την άλλη ακόμα πιο μεγάλη είναι η σημασία της επιλογής του κοπτικού εργαλείου. Το εργαλείο αυτό καθορίζεται από μερικά γεωμετρικά μεγέθη που φαίνονται στο σχήμα 2.1.



- | | | | |
|---|------------------------|---|------------------------|
| a | Επιφάνεια κοπής | α | Γωνία ελευθερίας |
| b | Κατεργασμένη επιφάνεια | β | Γωνία σφήνας |
| c | Κύρια κόψη | γ | Γωνία αποβλήτου |
| d | Δευτερεύουσα κόψη | ε | Γωνία κόψεων |
| e | Επιφάνεια αποβλήτου | κ | Γωνία θέσης εργαλείου |
| f | Ελεύθερη επιφάνεια | λ | Γωνία κλίσης της κοπής |
| h | Ύψος αιχμής | B | Πλάτος εργαλείου |

Σχήμα 2.1 : Γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.

Όσον αφορά το κοπτικό εργαλείο, οι κυριότερες γωνίες του είναι :

Η γωνία ελευθερίας α : Επιτρέπει την μείωση της τριβής μεταξύ του προς κατεργασία τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου στις περιοχές του εργαλείου που πρόσκεινται στις δύο κόψεις του.

Η γωνία αποβλήτου γ : Είναι η γωνία μεταξύ του μετώπου του κοπτικού εργαλείου και της καθέτου που διέρχεται από το σημείο κοπής. Ελέγχει αποτελεσματικά την κοπή, ενώ πιθανή αύξηση της γωνίας αποβλήτου οδηγεί στην μείωση των δυνάμεων κοπής. Σε μεγάλες όμως γωνίες αποβλήτου το κοπτικό εργαλείο γίνεται πιο αιχμηρό και είναι πιθανή η υπερθέρμανση του καθώς και ελάττωση της αντοχής του. Τέλος σε μεγάλες

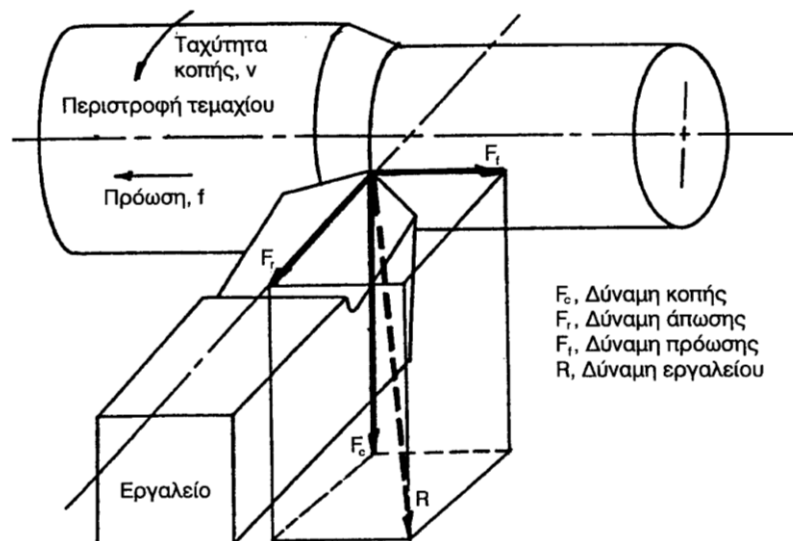
ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία αποβλήτου λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Η γωνία τοποθέτησης κ : Επηρεάζει την διάρκεια ζωής του εργαλείου καθώς και τις δυνάμεις κοπής. Όταν αυξάνεται η γωνία τοποθέτησης, αυξάνεται και το πάχος του αποβλήτου και έτσι μειώνεται η δύναμη κοπής. Αντιθέτως, όταν μειώνεται η γωνία κ , αυξάνεται το μήκος της κόψης και η επιφάνεια απαγωγής της θερμότητας κοπής, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής του εργαλείου.

2.3 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΟΠΗΣ

2.3.1. Λοξή κοπή

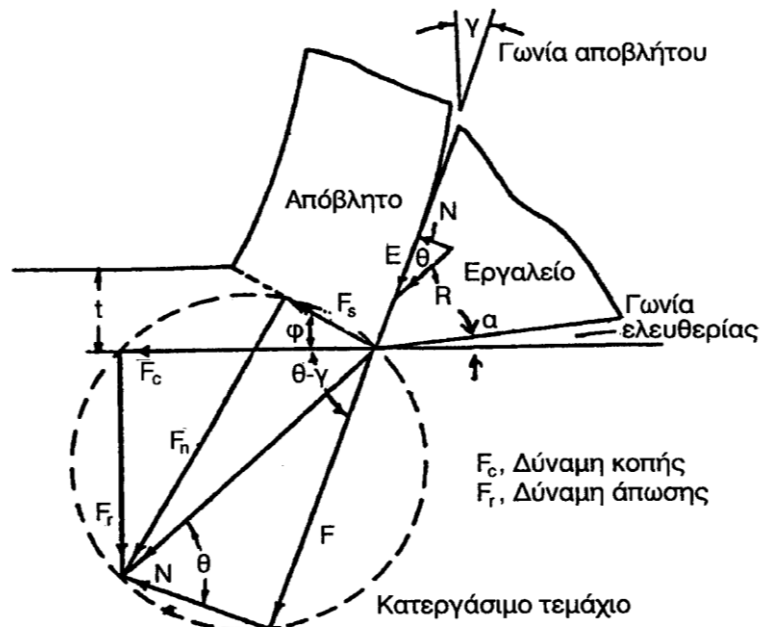
Πρόκειται για την γενική μορφή της κοπής. Όπως και στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής, που θα δούμε αμέσως μετά, χρησιμοποιείται ένα κοπτικό εργαλείο με σχήμα σφήνας για την αφαίρεση του μετάλλου. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το κοπτικό εργαλείο καθώς και η δύναμη του εργαλείου μαζί με τις δυνάμεις κοπής, άπωσης και πρόωσης για την περίπτωση της λοξής κοπής.



Σχήμα 2.2 : Δυνάμεις σε λοξή κοπή

2.3.2 Ορθογωνική κοπή

Στην ορθογωνική κοπή η τέμνουσα άκρη του εργαλείου είναι ευθεία και κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Εδώ το επίπεδο της κοπής είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του προς κατεργασία κομματιού, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή του υλικού είναι δισδιάστατη και η κατεργασία είναι επίπεδη παραμορφωσιακή με την προϋπόθεση ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του αποβλήτου. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής.



Σχήμα 2.3 : Δυνάμεις σε ορθογωνική κοπή

Προχωράμε τώρα στον υπολογισμό ορισμένων σημαντικών εξισώσεων που αφορούν τις δυνάμεις κοπής. Στο προηγούμενο σχήμα η F είναι η δύναμη τριβής ενώ η N είναι η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής αποβλήτου και εργαλείου. Οι F_n και F_s είναι η κάθετη και η εφαπτομενική συνιστώσα στο επίπεδο διάτμησης SS αντίστοιχα. Για τις παραπάνω δυνάμεις ισχύουν οι σχέσεις :

$$F_n = F_c \sin \phi + F_r \cos \phi \quad (2-1)$$

$$F = F_c \sin \gamma + F_r \cos \gamma \quad (2-2)$$

$$N = F_c \cos \gamma - F_r \sin \gamma \quad (2-3)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_r \sin \phi \quad (2-4)$$

Όπου F_c είναι η δύναμη κοπής και F_r (ή F_t) η δύναμη άπωσης. Θα ισχύει επιπλέον :

$$F_s = \sqrt{F^2 + N^2} \cos(\phi + \theta - \gamma) \quad (2-5)$$

ή

$$F_s = k(SS) = kt_1 / \sin \phi \quad (2-6)$$

όπου k είναι το όριο διαρροής του υλικού σε διάτμηση στην επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση και t_1 είναι το βάθος κοπής (αλλιώς DOC ή a_p).

Έτσι η συνολική δύναμη που ασκείται από το εργαλείο στο προς κατεργασία υλικό θα είναι :

$$R = \sqrt{F^2 + N^2} = \frac{kt_1}{\sin \phi \cos(\phi + \theta - \gamma)} \quad (2-7)$$

Η δύναμη κοπής F_c είναι η οριζόντια συνιστώσα της R , οπότε θα ισχύει :

$$F_c = \sqrt{F^2 + N^2} \cos(\theta - \gamma) = \frac{kt_1 \cos(\theta - \gamma)}{\sin \phi \cos(\phi + \theta - \gamma)} \quad (2-8)$$

Ομοίως η δύναμη άπωσης θα είναι η κατακόρυφη συνιστώσα της R , οπότε θα ισχύει :

$$F_r = \sqrt{F^2 + N^2} \sin(\theta - \gamma) = \frac{kt_1 \sin(\theta - \gamma)}{\sin \phi \cos(\phi + \theta - \gamma)} \quad (2-9)$$

Πέρα από τα παραπάνω εάν κάνουμε την παραδοχή ότι η ζώνη διάτμησης σχηματίζεται σε ορισμένη γωνία ϕ από την διεύθυνση κοπής, ώστε η δύναμη κοπής F_c να παίρνει την

ελάχιστη της τιμή, τότε για την ελάχιστη αυτή τιμή της F_c το γινόμενο $\sin\phi \cos(\phi+\theta-\gamma)$ θα πρέπει να γίνει μέγιστο. Αυτό θα συμβεί όταν :

$$2\phi - \gamma + \theta = \pi/2 \quad (2-10)$$

Έτσι θα έχουμε από (2-4) :

$$F_c = \frac{2kt_1 \cos(\theta - \gamma)}{1 - \sin(\theta - \gamma)} = 2kt_1 \cot\phi \quad (2-11)$$

Τέλος η γωνία ϕ μπορεί να υπολογισθεί από τον λόγο r_c του πάχους του αποβλήτου t_2 :

$$r_c = \frac{t_1}{t_2} = \frac{(SS) \sin \phi}{(SS) \sin(\frac{\pi}{2} - \phi + \gamma)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} = \frac{v_c}{v} \quad (2-12)$$

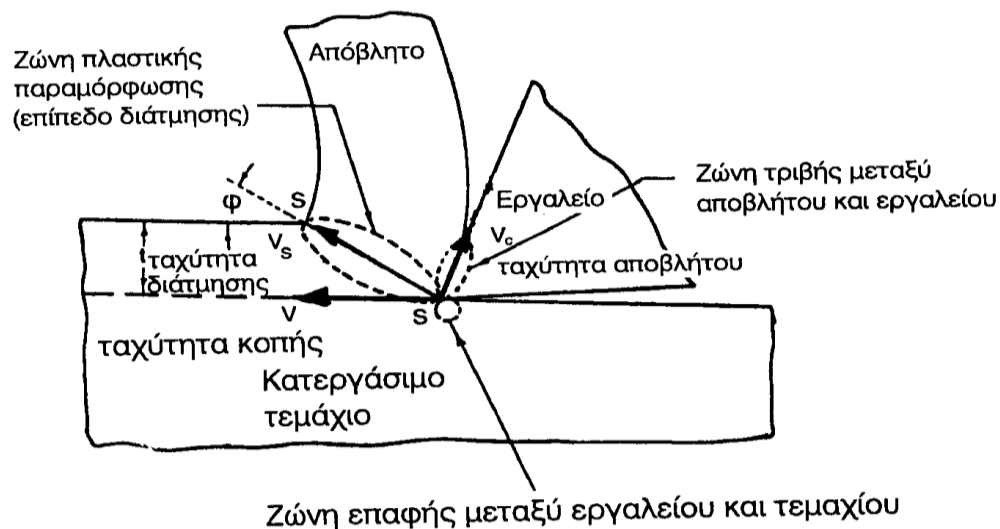
όπου v_c η ταχύτητα του αποβλήτου και v η ταχύτητα κοπής. Η γωνία ϕ μπορεί να υπολογισθεί και από την σχέση :

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \gamma}{1 - r_c \sin \gamma} \quad (2-13)$$

Πριν ολοκληρώσουμε με τις δυνάμεις θα πρέπει να πούμε πως οι σχέσεις αυτές προέρχονται από πειραματικές εργασίες του Merchant πάνω στην ορθογωνική κοπή και ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια για τα πολυμερή υλικά. Εάν θέλουμε να γενικεύσουμε τις σχέσεις αυτές και για τους χάλυβες θα πρέπει να κάνουμε την παραδοχή ότι η τιμή της τάσης διαρροής είναι κάποια συνάρτηση της κάθετης τάσης στο επίπεδο της διάτμησης.

Στο σημείο αυτό τέλος θα πρέπει να αναφερθούμε και στις ζώνες δαπάνης μηχανικού έργου κατά την διάρκεια της κατεργασίας της κοπής. Οι ζώνες αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4 και είναι οι εξής :

1. Η ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης.
2. Η ζώνη τριβής μεταξύ εργαλείου και αποβλήτου.
3. Η ζώνη επαφής μεταξύ εργαλείου και αντικειμένου.



Σχήμα 2.4 : Ζώνες δαπάνης μηχανικού έργου κοπής και ανάπτυξης θερμότητας.

2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ

Επειδή ο τύπος του αποβλήτου που παράγεται επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα επιφάνειας που παράγεται καθώς και ολόκληρη την διαδικασία κοπής, είναι αναγκαίο να διαχωρίσουμε τα απόβλητα στις παρακάτω βασικές κατηγορίες :

1. Συνεχές απόβλητο : Το συνεχές απόβλητο σχηματίζεται κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων ή κραμάτων (όπως ο μαλακός χάλυβας, το αργίλιο κ.λ.π), σε μεγάλες ταχύτητες κοπής, με την χρησιμοποίηση σκληρομετάλλων ως κοπτικών εργαλείων. Συνεχές απόβλητο σχηματίζεται επίσης με την αύξηση της γωνίας αποβλήτου του κοπτικού εργαλείου και της ταχύτητας κοπής, καθώς και με την χρήση υγρών κοπής. Αυτής της μορφής το απόβλητο είναι το πλέον επιθυμητό από την άποψη των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά την κοπή, της καταναλισκόμενης ισχύος, της τραχύτητας της επιφάνειας και της φθοράς του κοπτικού εργαλείου.

2. Ασυνεχές απόβλητο : Το ασυνεχές απόβλητο σχηματίζεται κατά την κοπή ψαθυρών υλικών (όπως ο χυτοσίδηρος, ο χυτός ορείχαλκος κ.λ.π.). Σχηματισμό αποβλήτου τέτοιας μορφής μπορεί να έχουμε ακόμη με την αύξηση του θεωρητικού πάχους του αποβλήτου.

3. Συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή (BUE) : Τέλος το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή σχηματίζεται περίπου όπως το συνεχές απόβλητο με μόνη διαφορά ότι στην περιοχή της κόψης του εργαλείου, και επί της επιφάνειας του αποβλήτου, μικρά τεμάχια του προς κατεργασία μετάλλου προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου με αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρικής μορφής του εργαλείου. Το σχηματιζόμενο απόβλητο κινείται επί της ψευδοακμής. Σε περιπτώσεις όπου η ψευδοακμή συνεχίζει να αναπτύσσεται παρουσιάζονται φαινόμενα αύξησης της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας.

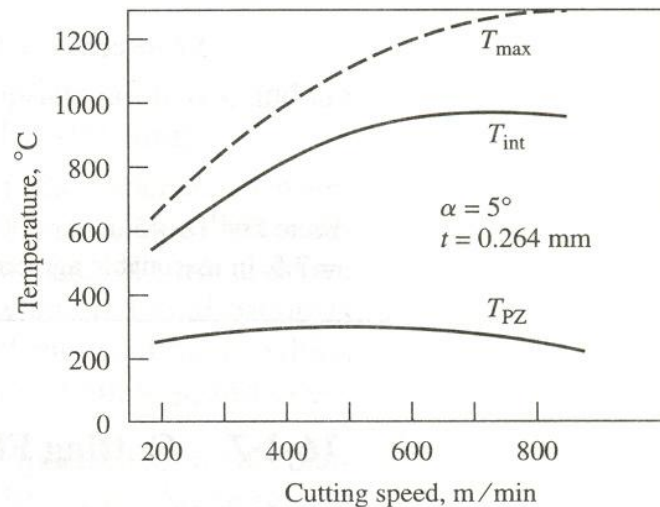
Πέρα από τα παραπάνω πρέπει να αναφέρουμε την σπουδαία επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στον σχηματισμό αποβλήτου αλλά και στην τραχύτητα της επιφάνειας. Για παράδειγμα, κατά την κοπή ενός σχετικά όλκιμου υλικού (όπως ο ανθρακούχος χάλυβας), σε σχετικά μικρές ταχύτητες (2 m/min) έχουμε τον σχηματισμό ασυνεχούς απόβλητου ενώ το κατεργασμένο τεμάχιο αποκτά μια σχετικά τραχεία επιφάνεια. Όταν η ταχύτητα κοπής αυξηθεί (7 m/min) το σχηματιζόμενο απόβλητο είναι συνεχές και ολισθαίνει επάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Έτσι το λιπαντικό υγρό κοπής έχει πρόσβαση και στις δύο κόψεις του εργαλείου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μιας καλής ποιότητας κατεργασμένης επιφάνειας. Επιπλέον αύξηση της ταχύτητας (20 m/min), έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ψευδοακμής και τραχείας κατεργασμένης επιφάνειας λόγω της μεταφοράς μεγάλου ποσού θερμότητας στην αιχμή του κοπτικού εργαλείου.

Τέλος, σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες (40 m/min), η ψευδοακμή εξαφανίζεται αλλά στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου σε επαφή με το απόβλητο προσκολλάται ένα λεπτό στρώμα μετάλλου, με αποτέλεσμα η κίνηση του αποβλήτου ως προς την κόψη του εργαλείου να γίνεται με συνθήκες μεγάλης τριβής, περίπου με συνθήκες καθαρής διάτμησης. Έτσι προκαλείται μια απότομη αύξησης της θερμοκρασίας. Οι δυσμενείς αυτές συνθήκες τάσεων και θερμοκρασία επιταχύνουν την φθορά του εργαλείου με τον σχηματισμό κρατήρα στην επιφάνεια επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του αποβλήτου.

2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται στις κατεργασίες είναι συγκεντρωμένη σε μια πολύ μικρή θερμική ζώνη. Μόνο ένα μικρό μέρος από αυτή καταχωρείται στο προς κατεργασία τεμάχιο και το απόβλητο ενώ η πλειοψηφία της ενέργειας μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα.

Επειδή η ζώνη κοπής συνεχίζει να κινείται προς το τεμάχιο που πρόκειται να κατεργασθεί, παρατηρείται μια ελάχιστη θέρμανση μπροστά από το κοπτικό εργαλείο και, τουλάχιστον σε υψηλές ταχύτητες κοπής, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας (πάνω από 80%) απομακρύνεται από το απόβλητο. Εντούτοις, το κοπτικό εργαλείο βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το απόβλητο και, εν τη απουσία ενός αποτελεσματικού στρώματος θερμότητας, το μέτωπο του κοπτικού εργαλείου ανεβάζει θερμοκρασία. Η τριβή στο μέτωπο του κοπτικού εργαλείου είναι επίσης μια ουσιαστική πηγή θέρμανσης. Λεπτομερείς υπολογισμοί δείχνουν ότι η μέγιστη θερμοκρασία αναπτύσσεται στο μέτωπο του κοπτικού εργαλείου, κάποια απόσταση μακριά από την αιχμή του εργαλείου αλλά πριν απομακρυνθεί το απόβλητο. Όπως θα αναμενόταν, τόσο η μέγιστη (T_{max}) όσο και η μέση αναπτυσσόμενη (T_{int}) θερμοκρασία, αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής (Σχ. 2.5).



Σχήμα 2.5 : Μεταβολή θερμοκρασίας σε σχέση με την ταχύτητα κοπής, κατά την κοπή χάλυβα AISI 1016 με κοπτικό εργαλείο καρβιδίου.

Η υψηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί είναι το σημείο τήξης του υλικού. Για αυτόν τον λόγο, τα κράματα των οποίων το σημείο τήξης είναι χαμηλότερο από την θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να μαλακώνει το κοπτικό εργαλείο (όπως τα κράματα Al και Mg) μπορούν, σε γενικές γραμμές, να κοπούν με οποιαδήποτε ταχύτητα, ειδικά με εργαλεία καρβιδίου.

Μια πρώτη εκτίμηση των θερμοκρασιών μπορεί να ληφθεί από την διαστατική ανάλυση, υποθέτοντας ότι όλη η ενέργεια της κοπής E μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι η μέση θερμοκρασία του μετώπου του κοπτικού εργαλείου T_T θα είναι :

$$T_T = E (vh/k\rho c)^{1/2} \quad (2-14)$$

όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα, ρ η πυκνότητα και c η ειδική θερμότητα (περιεκτικότητα θερμότητας ανά μονάδα όγκου) του υλικού του προς κατεργασία τεμαχίου. Κατά συνέπεια, υψηλότερες θερμοκρασίες αναμένονται σε περίπτωση κοπής ισχυρότερων υλικών (με υψηλότερη ενέργεια κοπής E) σε υψηλότερες ταχύτητες, ειδικά εάν το υλικό του προς κατεργασία κομματιού είναι ένας φτωχός αγωγός θερμότητας, χαμηλής πυκνότητας, και χαμηλής ειδικής θερμότητας. Υλικά όπως το τιτάνιο και τα υπερκράματα είναι δύσκολο να επεξεργασθούν μηχανικά σε αντίθεση με το αργίλιο και το μαγνήσιο. Ακόμα κι αν η περισσότερη από την θερμότητα απομακρύνεται μαζί με το απόβλητο, ορισμένη ποσότητα διασκορπίζεται στο τεμάχιο που πρόκειται να κατεργασθεί. Η προκύπτουσα αλλαγή διαστάσεων πρέπει να αντισταθμιστεί, και η συγκέντρωση θερμότητας στο κοπτικό εργαλείο είναι ένας σημαντικός παράγοντας που περιορίζει την ταχύτητα κοπής.

2.6 ΥΓΡΑ ΚΟΠΗΣ

Περίπου το 50% των ψυκτικών και λιπαντικών υγρών των κατεργασιών των μετάλλων χρησιμοποιούνται στην κοπή και την λείανση.

2.6.1 Λειτουργίες των υγρών κοπής

Τα ρευστά αυτά εκπληρώνουν βασικά τρεις σημαντικές λειτουργίες :

1. Λίπανση. Βοηθά στην μείωση της τριβής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του απόβλητου. Η λίπανση είναι αναγκαία σε κοπές υψηλής ταχύτητας, παρά το ότι η πρόσβαση στο μέτωπο του εργαλείου δεν είναι εύκολη, όσον αφορά την φθορά του εργαλείου, την κατανάλωση του έργου κοπής αλλά και την βελτίωση της τελικής επιφάνειας.

2. Ψύξη. Είναι αναγκαία για την απομάκρυνση της αναπτυσσόμενης θερμότητας λόγω της τριβής του αποβλήτου πάνω στην επιφάνεια του εργαλείου κοπής και λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του μετάλλου. Τα υγρά κοπής μειώνουν την θερμοκρασία του αποβλήτου και ψύχουν το προς κατεργασία τεμάχιο. Μπορεί επίσης να μειώσουν τη μαζική θερμοκρασία του εργαλείου. Συχνά παρατηρείται ότι ένα υγρό κοπής μειώνει τις θερμοκρασίες ώστε να επιτρέψει κοπές σε υψηλότερες ταχύτητες.

3. Προφύλαξη από συγκόλληση μετάλλου στο εργαλείο. Χάρη σε αυτή τους την λειτουργία εξασφαλίζεται καλή ποιότητα τελικής επιφάνειας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως θειούχα και χλωριούχα μείγματα στα υγρά κοπής.

2.6.2 Υγρά κοπής

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να έχουμε από ένα υγρό κοπής πρέπει να είναι :

- Κοπτική ικανότητα.
- Ικανότητα βελτίωσης της ποιότητας επιφάνειας.
- Διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.
- Προφύλαξη από διάβρωση του κοπτικού εργαλείου αλλά και του τεμαχίου.
- Προφύλαξη από μαύρισμα του προς κατεργασία τεμαχίου.
- Απουσία καπνού.
- Ευστάθεια κατά την λειτουργία.

Τα υγρά κοπής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

1. Η πρώτη κατηγορία είναι βασισμένη στα ορυκτά πετρέλαια με κατάλληλες πρόσθετες ουσίες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε χαμηλότερες ταχύτητες και με εργαλεία χάλυβα υψηλών ταχυτήτων.

2. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα γαλακτώματα (πετρέλαια που διασκορπίζονται στο νερό με την ενίσχυση των ενεργών στην επιφάνεια ουσιών), τα ημισυνθετικά υγρά (επίσης αποκαλούμενα ημιχημικά υγρά ή χημικά γαλακτώματα) και τα συνθετικά υγρά (επίσης αποκαλούμενα χημικά υγρά, τα οποία δεν περιέχουν πετρέλαιο αλλά μόνο υδροδιαλυτούς παράγοντες, ανασταλτικούς παράγοντες διάβρωσης, και άλατα).

2.6.3 Αποτελέσματα των υγρών κοπής

Η επιλογή ενός υγρού κοπής πρέπει επίσης να περιλαμβάνει και άλλες εκτιμήσεις, όπως τα αποτελέσματα στο υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου, την εργαλείομηχανή αλλά και τους βιολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

1. Αποτελέσματα στο υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου. Κατά επιλογή ενός υγρού κοπής, θα πρέπει να ελεγχθεί εάν το επεξεργασμένο στη μηχανή υλικό θα υποβληθεί σε υψηλές πιέσεις, οπότε κατά συνέπεια θα οδηγηθούμε σε ενδεχόμενο ράγισμα λόγω πίεσης και διάβρωσης. Αυτή η εκτίμηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα υγρά κοπής που έχουν τις πρόσθετες ουσίες θείου και χλωρίου. Παραδείγματος χάριν, τα υγρά που περιέχουν χλώριο δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά την κατεργασία του τιτανίου.

2. Αποτελέσματα στην εργαλείομηχανή. Όπως ένα υγρό κοπής μπορεί να έχει επιπτώσεις στο υλικό ενός τεμαχίου που πρόκειται να υποστεί κατεργασία, μπορεί ομοίως να έχει επιπτώσεις και στην εργαλείομηχανή και στα διάφορα μέρη αυτής, όπως για παράδειγμα τα ρουλεμάν. Η επιλογή του ρευστού πρέπει επομένως να περιλαμβάνει την εκτίμηση της συμβατότητάς της με τα υλικά των μερών της μηχανής.

3. Βιολογικά και περιβαλλοντικά αποτελέσματα. Επειδή ο χειριστής της εργαλείομηχανής βρίσκεται συνήθως σε στενή αμεσότητα με τα υγρά κοπής, τα αποτελέσματα της επαφής του χειριστή με τα υγρά πρέπει είναι μεγάλης σημαντικότητας. Οι ατμοί, ο καπνός, και οι μυρωδιές από τα υγρά κοπής μπορούν να προκαλέσουν αρκετά δερματικά, καθώς επίσης και αναπνευστικά προβλήματα. Ιδιαίτερη πρόοδος έχει γίνει στην εξασφάλιση της ασφαλούς χρήσης των υγρών κοπής όσον αφορά τις κατεργασίες των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η επίδραση στο εξωτερικό περιβάλλον, ιδιαίτερα όσον αφορά την υποβάθμιση του υγρού, είναι σημαντική.

Τα υγρά κοπής, καθώς επίσης και άλλα μεταλλουργικά υγρά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες κατεργασιών, είναι πιθανό να υποβληθούν σε χημικές αλλαγές κατά την χρησιμοποίησή τους με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που οφείλεται στα περιβαλλοντικά αποτελέσματα καθώς επίσης και στην μόλυνση που προέρχεται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων και των λεπτών τμημάτων μετάλλων που παράγονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μικροβίων (βακτηρίδια κ.λ.π.), ιδιαίτερα εν τη παρουσία ύδατος, και έχουν επιπτώσεις στις ιδιότητες και στα γενικότερα χαρακτηριστικά των υγρών, επηρεάζοντας κατά συνέπεια και την συνολική λειτουργία της κατεργασίας.

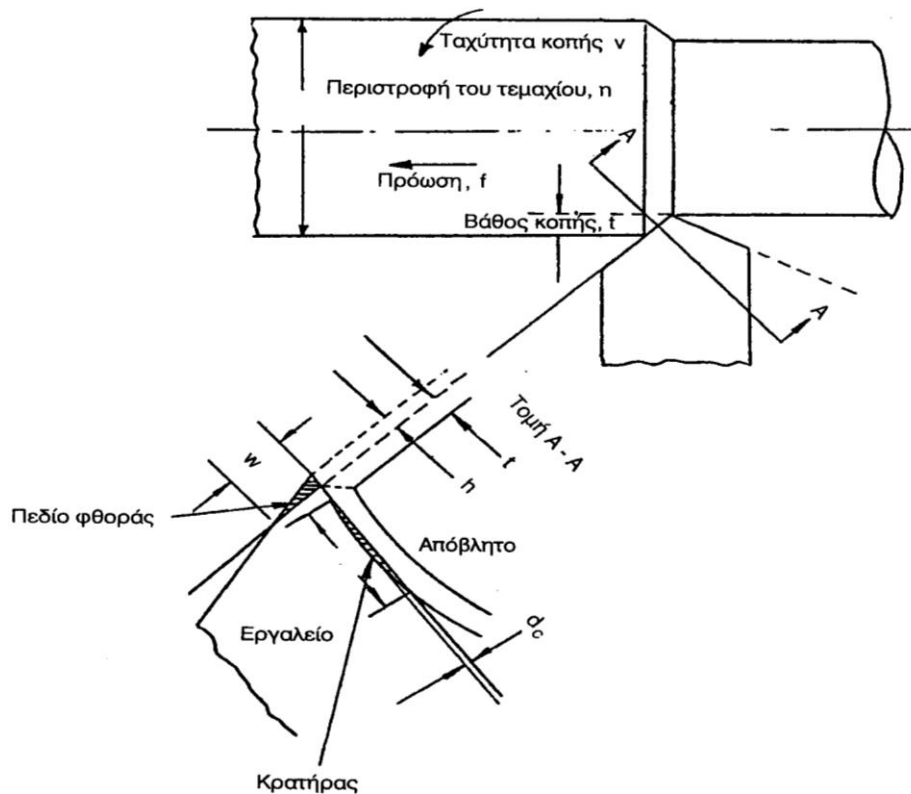
2.7 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Στις διαδικασίες παραμόρφωσης η διάρκεια ζωής των εργαλείων μετριέται σε χιλιάδες κομμάτια ή σε εβδομάδες ή ώρες λειτουργίας, και οι ανησυχίες εκτός από τις φθορές επισκιάζονται συχνά από τις εκτιμήσεις της πίεσης. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η φθορά των εργαλείων είναι η βασική ανησυχία στην κοπή των μετάλλων. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι το εργαλείο, που έχει σχετικά μικρή μάζα, εκτίθεται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Η διάρκεια ζωής των εργαλείων βρίσκεται συνήθως στο επίπεδο των δεκάδων των λεπτών και φθάνουν μόνο τις ώρες στις γραμμές παραγωγής για τη μαζική παραγωγή. Επομένως, η οικονομία της διαδικασίας ελέγχεται κατά ένα πολύ μεγάλο μέρος από την διάρκεια ζωής των εργαλείων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε πως η διάρκεια ζωής των εργαλείων ορίζεται συνήθως ως ο χρόνος (σε λεπτά) που χρειάζεται για να καλυφθεί το συγκεκριμένο κριτήριο φθοράς, όπως θα δούμε παρακάτω, κάτω από προσδιορισμένες συνθήκες διαδικασίας (π.χ. ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής κ.λ.π.), αν και για τη μαζική παραγωγή στις γραμμές μεταφοράς είναι επιθυμητή η διάρκεια ζωής των εργαλείων σε ώρες. Ακόμη ως διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου θεωρείται συνήθως και ο πραγματικός χρόνος κοπής που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών τροχίσεων του κοπτικού εργαλείου. Τέλος για εργαλεία όπως τα τρυπάνια ένα πρακτικότερο μέτρο είναι ο αριθμός οπών που ανοίγονται με το τρυπάνι.

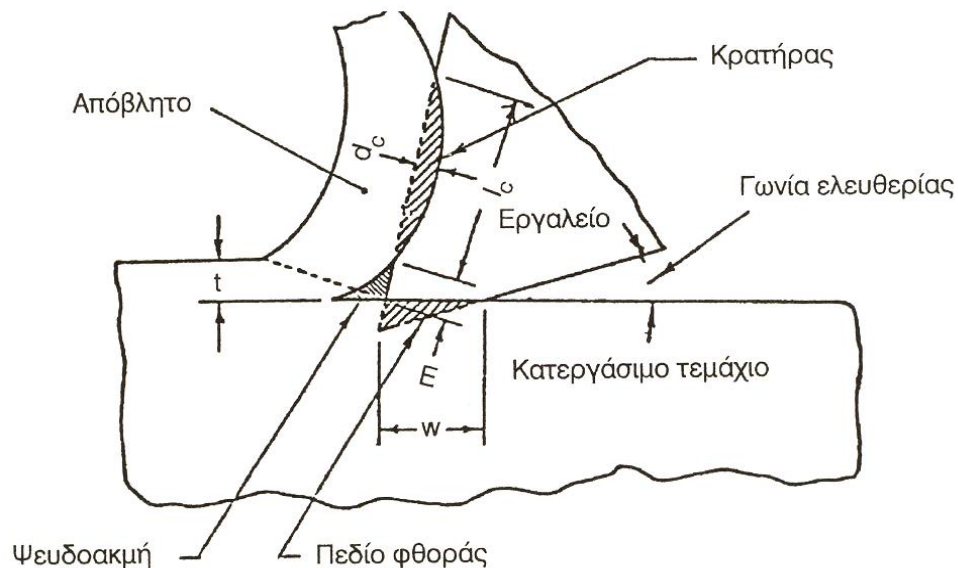
2.7.1 Φθορά κοπτικών εργαλείων

Η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι δυνατόν να πάρει διάφορες μορφές. Είναι πιθανό να έχουμε εμφάνιση αποφλοιώσης και θραύσης που οφείλονται στην ασυνέχεια της κοπής και στην ανομοιομορφία της δομής του κατεργάσιμου υλικού. Γενικότερα, σταδιακή φθορά λαμβάνει χώρα από στρογγύλευση των κοπτικών ακμών του κοπτικού εργαλείου ή από τον σχηματισμό κρατήρων και πεδίου φθοράς. Η φθορά του εργαλείου επηρεάζεται τόσο από το κατεργάσιμο υλικό όσο και από το υλικό του κοπτικού εργαλείου. Η σταδιακή φθορά εξαρτάται κυρίως από τις σχετικές σκληρότητες του αντικειμένου και του κοπτικού εργαλείου. Φυσικά το εργαλείο κοπής θα πρέπει να είναι αρκετά σκληρότερο από το τεμάχιο που πρόκειται να υποστεί κατεργασία. Στα σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνεται αναλυτικά η γεωμετρία της φθοράς του εργαλείου.



Σχήμα 2.6 : Γεωμετρία της φθοράς του εργαλείου.

Στο σχήμα 2.7 δίνονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη με τα οποία εκτιμάται η φθορά του κοπτικού εργαλείου. Το πεδίο φθοράς w μετατοπίζει την κόψη του εργαλείου και έτσι επηρεάζει τις διαστάσεις του τεμαχίου. Ταυτόχρονα η αυξημένη τραχύτητα της κόψης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, ενώ η προκύπτουσα μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής εργαλείου – τεμαχίου προκαλεί μια περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή αυτή και ταυτόχρονα μια αύξηση της δύναμης κοπής. Τέλος με την πάροδο του χρόνου κοπής έχουμε και την δημιουργία ενός κρατήρα στην ζώνη επαφής αποβλήτου – εργαλείου, ο οποίος γίνεται ολοένα και πιο βαθύς ενώ ταυτόχρονα η αιχμή του εργαλείου συνεχώς αδυνατίζει και οδηγούμαστε τελικά στην θραύση του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.7 : Χαρακτηριστικά μεγέθη φθοράς κοπτικού εργαλείου.

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων μπορεί να οφείλεται σε μεμονωμένα αίτια και είναι δυνατόν να θεωρηθεί σαν μια υπέρθεση διακεκριμένων μηχανισμών φθοράς. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω μηχανισμούς φθοράς :

1. Φθορά της κόπης του εργαλείου (θραύση, ρωγμές και πλαστική παραμόρφωση) που οφείλεται σε μηχανικές ή θερμικές υπερφορτίσεις.
2. Φθορά τριβής στις επιφάνειες επαφής εργαλείου – τεμαχίου και εργαλείου – αποβλήτου.
3. Φθορά προκαλούμενη από την συγκόλληση μικρών τεμαχίων υλικού στις επιφάνειες επαφής του κοπτικού εργαλείου. Η φθορά αυτής της μορφής είναι πιο έντονη συνήθως σε χαμηλές ταχύτητες κοπής λόγω δημιουργίας ψευδοακμής.
4. Φθορά από οξείδωση. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η παρουσία του οξυγόνου του ατμοσφαιρικού αέρα συντελούν στην μεγάλη φθορά του κοπτικού εργαλείου, ιδιαίτερα στις άκρες της κόπης, όπου σχηματίζεται ένα στρώμα οξειδίων. Το βάθος οξείδωσης του εργαλείου αυξάνει ανάλογα με τον χρόνο κοπής, επηρεάζει την ποιότητα επιφάνειας και μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην θραύση της κόπης και την καταστροφή του εργαλείου.
5. Φθορά από διάχυση. Έχει διαπιστωθεί ότι σε μεγάλες ταχύτητες κοπής εμφανίζονται αντιδράσεις από διάχυση μεταξύ των υλικών εργαλείου και τεμαχίου / αποβλήτου. Αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της δομής του υλικού του κοπτικού εργαλείου, γεγονός που επιταχύνει την μηχανική φθορά του.

2.7.2 Πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων

Ακόμα κι αν διάφοροι μηχανισμοί φθοράς εμφανίζονται συνήθως, η σταδιακή φθορά προέρχεται από μηχανισμούς εξαρτώμενους από την θερμοκρασία κατά μήκος των κόψεων και γύρω από την αιχμή του εργαλείου. Είδαμε μάλιστα ότι οι θερμοκρασίες επηρεάζονται πολύ από την ταχύτητα κοπής (σχέση 2-14), και είναι γνωστό ότι η σταδιακή φθορά είναι μια λειτουργία τριβής που, για μια δεδομένη ταχύτητα κοπής, είναι ανάλογη προς το χρόνο. Σε αντίθεση με τα παραπάνω η φθορά του κοπτικού εργαλείου δεν εξαρτάται από παράγοντες όπως η γεωμετρία του εργαλείου ή το βάθος κοπής. Ένα μέτρο προσδιορισμού της φθοράς του εργαλείου είναι η εμπειρική σχέση του Taylor :

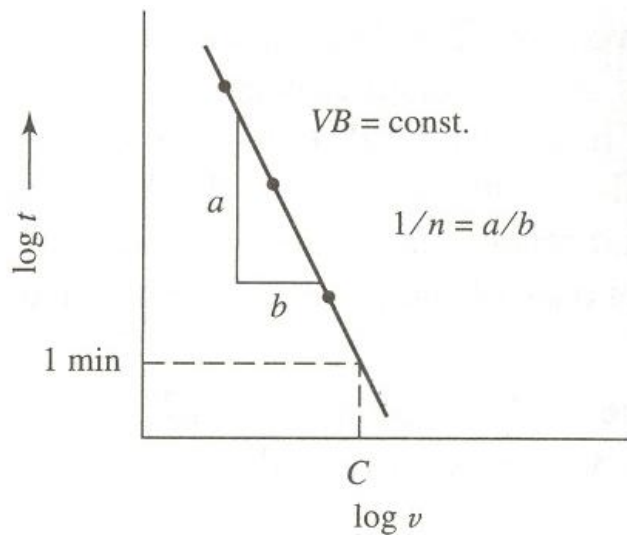
$$vt^n = C \quad (2-15)$$

όπου v είναι η γραμμική ταχύτητα κοπής (σε m/min ή ft/min), t είναι η διάρκεια ζωής του εργαλείου (σε min.), και C, n είναι σταθερές που εξαρτώνται από τα υλικά του εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου. Για να κυριολεκτήσουμε, η προηγούμενη εξίσωση πρέπει να γραφτεί όπως παρακάτω :

$$vt^n = Ct_{ref}^n \quad (2-16)$$

όπου $t_{ref} = 1 \text{ min}$

Αναλόγως, υπάρχει μια ευθύγραμμη σχέση όταν η διάρκεια ζωής των εργαλείων σχεδιάζεται με βάση την ταχύτητα, σε μια λογαριθμική κλίμακα (Σχ.2.8).



Σχήμα 2.8 : Διάρκεια ζωής των εργαλείων σε λογαριθμική κλίμακα.

Δεδομένου ότι η κοπή μετάλλων είναι στην ουσία ένα σύνθετο σύστημα, οι σταθερές εξαρτώνται επίσης από διάφορες μεταβλητές. Παρόλα αυτά, το C είναι βασικά σταθερό για ένα δεδομένο υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου, ενώ ο εκθέτης Taylor n είναι

χαρακτηριστικός για το υλικό από το οποίο αποτελείται το κοπτικό εργαλείο. Η τιμή του είναι χαρακτηριστικά 0.08-0.1 για HSS, 0.25-0.4 για τα καρβίδια, 0,4-0,6 για επικαλυμμένα καρβίδια, και 0.5-0.7 για κεραμικά εργαλεία.

Μια καλύτερη αίσθηση για τη σημασία του εκθέτη Taylor προκύπτει χρησιμοποιώντας και πάλι τους προηγούμενους τύπους, για να εκφράσουμε όμως την διάρκεια ζωής του εργαλείου :

$$t = \frac{K}{v^{1/n}} \quad (2-17)$$

όπου K σταθερά που εξαρτάται από το υλικό του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου.

Σημειώνεται εδώ ότι για $n = 0,1$, η διάρκεια ζωής του εργαλείου μειώνεται εξαιρετικά γρήγορα με τη δέκατη δύναμη της ταχύτητας, όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση.

Η παραγωγή θερμότητας επηρεάζεται από την είσοδο της συνολικής θερμότητας (ή της ενέργειας που εισάγεται), η οποία αυξάνεται με το πάχος του μη-παραμορφωμένου αποβλήτου h και το πλάτος του αποβλήτου (ή το βάθος της κοπής) w . Ο τύπος του Taylor μπορεί να επεκταθεί ώστε να λάβει υπόψη και τους παραπάνω παράγοντες :

$$t = \frac{K}{v^{1/n_1} f^{1/n_2} w^{1/n_3}} \quad (2-18)$$

όπου, γενικά, $n_1 < n_2 < n_3$. Αυτοί οι εκθέτες δεν είναι εντελώς ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλον και επηρεάζονται επίσης από τη γεωμετρία του εργαλείου αλλά και την διαδικασία που ακολουθείται. Χαρακτηριστικές τιμές για HSS είναι $n_1 = 0,1$, $n_2 = 0,18$, $n_3 = 0,45$. Επομένως, για αυξημένους βαθμούς αποβολής υλικού (για υψηλής απόδοσης κατεργασία), είναι προτιμητέο να αυξηθεί πρώτα το βάθος της κοπής, στην συνέχεια η πρόωση και τελευταία η ταχύτητα. Φυσικά, όταν περιορίζεται η διάρκεια ζωής των εργαλείων από την καταστροφική αποτυχία των εργαλείων, η εξίσωση Taylor είναι άχρηστη και πρέπει να αντικατασταθεί από ένα στατιστικό κριτήριο διάρκειας ζωής. Ακόμα και όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση Taylor, η στατιστική κατανομή της διάρκειας ζωής των εργαλείων πρέπει να ληφθεί υπόψη, ειδικά, εάν η εξίσωση

χρησιμοποιείται για να προγραμματίσει αλλαγές στο εργαλείο κάτω από συνθήκες αυτομάτου ελέγχου.

2.8 ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των εργαλείων κοπής ποικίλουν έτσι ώστε να ταιριάζουν στην διαδικασία κοπής, αλλά υπάρχουν και μερικά βασικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι κοινά σε όλα τα εργαλεία.

Η κατεργασία μπορεί, γενικά, να θεωρηθεί ως ένας συνεχής ανταγωνισμός για την επιβίωση μεταξύ του προς κατεργασία τεμαχίου και του υλικού του εργαλείου κοπής. Έχουν υπάρξει αρκετές βελτιώσεις όσον αφορά την κατεργασιμότητα των μετάλλων, αλλά τα βασικά αίτια των πρόσφατων προόδων στον τομέα των κατεργασιών είναι τα βήματα προόδου που έχουν επιτευχθεί στα υλικά των εργαλείων. Οι τελευταίες εξελίξεις δεν έχουν επιτρέψει μόνο την γρηγορότερη αφαίρεση υλικού, αλλά έχουν διευκολύνει επίσης και την πρόοδο στον σχεδιασμό των εργαλείομηχανών αλλά και τον έλεγχο τους.

Θα περίμενε κανείς πως το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να έχει ιδιότητες ακριβώς αντίθετες από εκείνες του προς κατεργασία κομματιού :

1. Το εργαλείο πρέπει να είναι σκληρότερο από το σκληρότερο συστατικό του υλικού του προς κατεργασία κομματιού, όχι μόνο σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και σε πραγματικές θερμοκρασίες συνθήκες. Η υψηλή σκλήρυνση εν θερμώ αποτρέπει την πλαστική παραμόρφωση, εξασφαλίζει ότι η γεωμετρία του εργαλείου κοπής διατηρείται κάτω από τις ακραίες συνθήκες που παρουσιάζονται κατά τη διαδικασία σχηματισμού αποβλήτου, και βοηθά επίσης στην αντίσταση της φθοράς.
2. Η ανθεκτικότητα είναι απαραίτητη έτσι ώστε το εργαλείο να επιζήσει των μηχανικών κλονισμών στις διαδικασίες διακεκομμένης κοπής. Οι κλονισμοί εμφανίζονται ακόμα και στις διαδικασίες σχηματισμού συνεχούς αποβλήτου, όταν αντιμετωπίζει το εργαλείο ένα εντοπισμένο σκληρό σημείο.
3. Η χαμηλή προσκόλληση στο υλικό του κομματιού που πρόκειται να κατεργασθεί βοηθά να αποφευχθεί η τοπική συγκόλληση. Παραδόξως, η υψηλή προσκόλληση είναι επιθυμητή όταν μια ζώνη τριβής μεταξύ αποβλήτου και εργαλείου πρόκειται να σταθεροποιηθεί.

4. Η διάχυση των συστατικών του εργαλείου στο υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου οδηγεί στη γρήγορη φθορά. Επομένως, η διαλυτότητα του εργαλείου στο υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου πρέπει να είναι χαμηλή.

Διάφορα υλικά κοπτικών εργαλείων, που έχουν ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμα σήμερα. Τα υλικά των εργαλείων διαιρούνται συνήθως στις παρακάτω γενικές κατηγορίες :

- Ανθρακούχοι χάλυβες – Χάλυβες με μικρές προσμίξεις (Cr, Mn κ.λ.π.)
- Χυτοκράματα (Στελλίτες)
- Ταχυχάλυβες
- Σκληρομέταλλα (Συνήθη και επενδεδυμένα)
- Κεραμικά υλικά
- Υπέρσκληρα υλικά (CBN – Διαμάντι)

2.9 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Λόγω των διάφορων μηχανικών, φυσικών, θερμικών, και χημικών αποτελεσμάτων που προκαλούνται από την προηγούμενη επεξεργασία του, η επιφάνεια ενός κατασκευασμένου κομματιού έχει γενικά ιδιότητες και συμπεριφορά που είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνους του πρωτογενούς τεμαχίου.

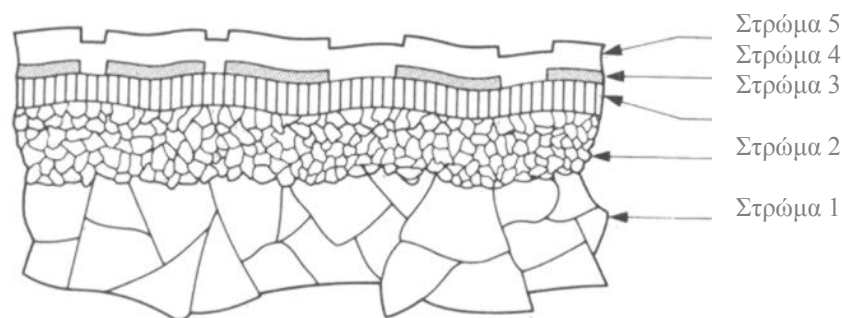
Η τριβή, η φθορά, και η λίπανση, που ονομάζονται στις ημέρες μας τριβολογία, είναι φαινόμενα επιφάνειας. Η τριβή επηρεάζει τις δυνάμεις, τις απαιτήσεις ισχύος, και την ποιότητα της επιφάνειας των υπό παραγωγή τμημάτων. Η φθορά αλλάζει την επιφάνεια και την γεωμετρία των εργαλείων, γεγονός που στη συνέχεια έχει επιπτώσεις στην ποιότητα των κατασκευασμένων προϊόντων και στα οικονομικά της παραγωγής. Η λίπανση, με λίγες εξαιρέσεις, είναι μια ακέραια πτυχή όλων των διαδικασιών κατασκευής, καθώς επίσης και της κατάλληλης λειτουργίας των μηχανημάτων και του εξοπλισμού.

Μια άλλη σημαντική πτυχή στην τεχνολογία επιφανειών είναι η επεξεργασία των επιφανειών για να τροποποιηθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους. Ταυτόχρονα η μέτρηση των σχετικών διαστάσεων και των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των μερών

είναι μια ακέραια συνιστώσα της εναλλάξιμης κατασκευής, που είναι η βασική έννοια της τυποποίησης και της μαζικής παραγωγής. Μια άλλη σημαντική συνιστώσα αφορά την εξέταση και επιθεώρηση των κατασκευασμένων προϊόντων, χρησιμοποιώντας και τις καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές μεθόδους εξέτασης. Τέλος μια από τις κρισιμότερες πτυχές της κατασκευής είναι ποιότητα των προϊόντων.

2.9.1 Δομή και ιδιότητες επιφάνειας

Κατά την στενή εξέταση της επιφάνειας ενός κομματιού μετάλλου μπορεί να βρεθεί ότι αποτελείται γενικά από διάφορα στρώματα (Σχ.2.9). Ξεκινώντας από το εσωτερικό του μετάλλου και κινούμενοι εξωτερικά προς την επιφάνεια είναι το μαζικό στρώμα μετάλλου (στρώμα 1). Επάνω από το στρώμα αυτό, βρίσκεται ένα στρώμα που συνήθως έχει παραμορφωθεί πλαστικά και έχει υποστεί σκλήρυνση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής (στρώμα 2). Το βάθος και οι ιδιότητες του υφιστάμενου σκλήρυνσης στρώματος εξαρτώνται από παράγοντες όπως η μέθοδος επεξεργασίας που χρησιμοποιείται. Τα αιχμηρά εργαλεία και η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων διαδικασίας παράγουν επιφάνειες με ελάχιστη ή καμία διαταραχή. Παραδείγματος χάριν, εάν η επιφάνεια παράγεται με την κατεργασία με ένα ιδιαίτερα αιχμηρό εργαλείο ή κάτω από φτωχές συνθήκες κοπής, το παραπάνω στρώμα θα είναι σχετικά παχύ.



Σχήμα 2.9 : Σχηματική αναπαράσταση της δομής της επιφάνειας των μετάλλων. Το πάχος του κάθε διαφορετικού στρώματος εξαρτάται από τις συνθήκες της διαδικασίας καθώς και από το περιβάλλον.

Εκτός και αν το μέταλλο υποβάλλεται σε επεξεργασία και κρατείται σε ένα αδρανές περιβάλλον (ή είναι ένα ευγενές μέταλλο, όπως ο χρυσός ή ο λευκόχρυσος), ένα στρώμα οξειδίων βρίσκεται συνήθως πάνω από το στρώμα 2 (στρώμα 3).

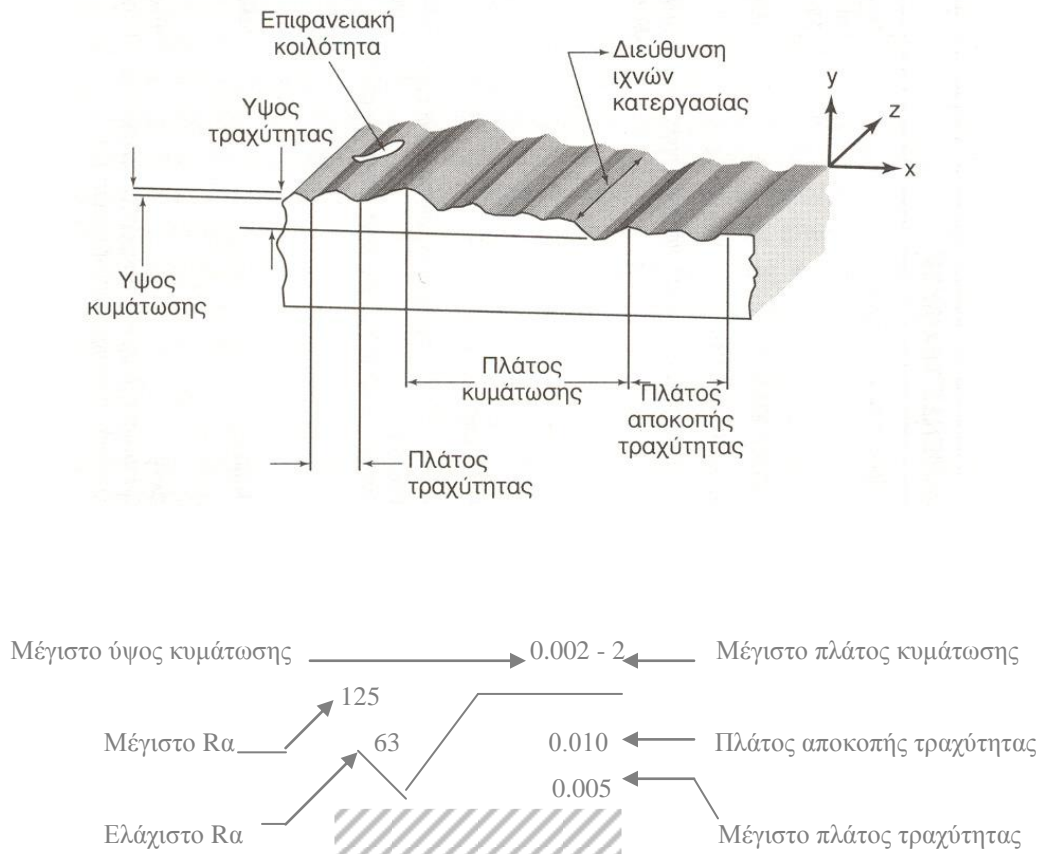
Κάτω από κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες, τα στρώματα οξειδίων της επιφάνειας είναι γενικά καλυμμένα με απορροφημένα στρώματα αερίου και υγρασίας (στρώμα 4). Τελικά, η πιο ακραία επιφάνεια του μετάλλου μπορεί να καλυφθεί με μολυσματικούς παράγοντες, όπως ρύποι, σκόνη, υπολείμματα λιπαντικών, ρύποι από το περιβάλλον κ.λ.π.(στρώμα 5).

Κατά συνέπεια, οι επιφάνειες έχουν γενικά ιδιότητες που είναι πολύ διαφορετικές από εκείνες του υποστρώματος. Το οξείδιο στην επιφάνεια ενός μετάλλου, παραδείγματος χάριν, είναι γενικά πολύ σκληρότερο από ότι στην βάση του μετάλλου. Ως εκ τούτου τα οξείδια τείνουν να είναι εύθραυστα και λειαντικά. Αυτό το χαρακτηριστικό της επιφάνειας έχει διάφορα σημαντικά αποτελέσματα στην τριβή, την φθορά, και τη λίπανση όσον αφορά την επεξεργασία των υλικών και τα επιστρώματα των προϊόντων. Οι παράγοντες που εμπλέκονται στη δομή της επιφάνειας των μετάλλων είναι επίσης σχετικοί, σε έναν μεγάλο βαθμό, στη δομή της επιφάνειας των πλαστικών και των κεραμικών. Η σύσταση της επιφάνειας αυτών των υλικών εξαρτάται, όπως με τα μέταλλα, από τη μέθοδο παραγωγής. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν επίσης τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας αυτών των υλικών.

2.9.2 Μορφολογία επιφάνειας

Ανεξάρτητα από την μέθοδο παραγωγής, όλες οι επιφάνειες έχουν τα δικά τους χαρακτηριστικά, όπως η σύσταση της επιφάνειας, η τραχύτητα, καθώς και η ποιότητα επιφάνειας. Η περιγραφή της σύστασης της επιφάνειας ως γεωμετρικής ιδιότητας είναι αρκετά σύνθετη. Εντούτοις, ορισμένες οδηγίες έχουν καθιερωθεί για τον προσδιορισμό της σύστασης της επιφάνειας από την άποψη των καθορισμένων με σαφήνεια και μετρήσιμων ποσοτήτων (Σχ.2.10).

Όσον αφορά το παρακάτω σχήμα (Σχ.2.10), οι *ατέλειες* είναι τυχαίες παρατυπίες, όπως γρατσουνιές, οπές, κοιλότητες, ραφές, σχισμές, ρωγμές κ.λ.π. Η *διεύθυνση των ιχνών κατεργασίας* (ή διεύθυνση των ανωμαλιών) είναι η κατεύθυνση του κυρίαρχου προτύπου



Σχήμα 2.10 : Βασική ορολογία και σύμβολα που περιγράφουν την ποιότητα επιφάνειας. Οι ποσότητες είναι δοσμένες σε μm .

επιφάνειας και είναι συνήθως ορατή ακόμη και στο γυμνό μάτι. Η *τραχύτητα* αποτελείται από πολύ στενά χωρισμένες, ανώμαλες αποκλίσεις σε μια κλίμακα μικρότερη από την αντίστοιχη της κυμάτωσης. Εκφράζεται με βάση το ύψος της, το πλάτος (ή μήκος) της και την απόσταση της από την επιφάνεια, κατά μήκος της οποίας μετρείται. Η *κυμάτωση* είναι μια επαναλαμβανόμενη απόκλιση από μια επίπεδη επιφάνεια, όπως για παράδειγμα τα κύματα στην επιφάνεια του νερού. Μετρείται και περιγράφεται με βάση το διάστημα μεταξύ των παρακείμενων κορυφών των κυμάτων (πλάτος ή μήκος κυμάτωσης) και την υψομετρική διαφορά μεταξύ των κορυφών και των κοιλάδων των κυμάτων (ύψος κυμάτωσης).

2.9.3 Τραχύτητα επιφάνειας

Η τραχύτητα επιφάνειας περιγράφεται γενικά από δύο μεθόδους : (α) την *αριθμητική μέση τιμή* (R_a , CLA ή AA) και (β) την *ενδεικνυόμενη τιμή* (R_q ή RMS). Η αριθμητική μέση τιμή είναι βασισμένη στη σχηματική απεικόνιση μιας τραχιάς επιφάνειας που εμφανίζεται στο σχήμα 2.11. Η αριθμητική μέση τιμή, καθορίζεται από την παρακάτω σχέση :

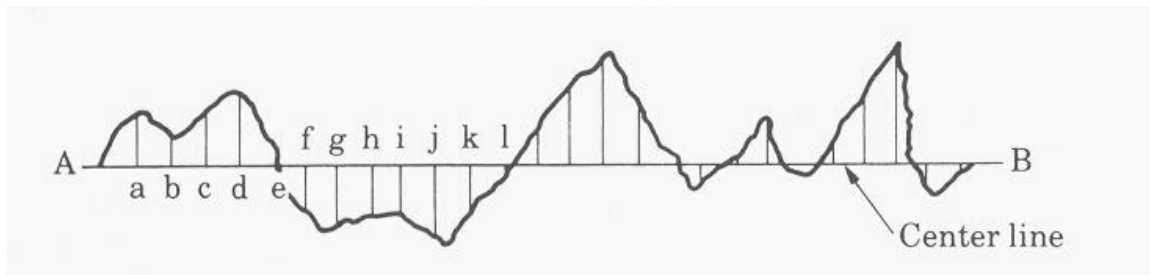
$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n} \quad (2-19)$$

όπου όλα τα a, b, c, d αποτελούν απόλυτες τιμές.

Η ενδεικνυόμενη τιμή καθορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (2-20)$$

Η δεδομένη γραμμή AB στο σχήμα 2.11 είναι τοποθετημένη έτσι ώστε το άθροισμα των εμβαδών των περιοχών επάνω από τη γραμμή να είναι ίσο με το άθροισμα των εμβαδών των περιοχών κάτω από αυτή. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται γενικά για την τραχύτητα επιφάνειας είναι τα μm (μικρόμετρα) ή μin . (μικροίντσες), όπου $1 \mu m = 40 \mu in$ και $1 \mu in = 0.025 \mu m$.



Σχήμα 2.11 : Συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας μέσω των σχέσεων (2-19) και (2-20).

Επιπλέον, μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την *μέγιστη τιμή* (R_i ή R_{\max}) ως μέτρο της τραχύτητας. Ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της βαθύτερης κοιλότητας και της υψηλότερης κορυφής. Μας δείχνει το ποσό υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί για να ληφθεί τελικά μια ομαλή επιφάνεια.

Λόγω της απλότητάς της, η αριθμητική μέση τιμή R_a , υιοθετήθηκε διεθνώς στα μέσα της δεκαετίας του '50 και χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη. Οι εξισώσεις (2-19) και (2-20) δείχνουν ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ R_a και R_q . Για μια τραχύτητα επιφάνειας με μορφή καμπύλης ημίτονου, το R_q είναι μεγαλύτερο από το R_a , κατά έναν παράγοντα $1,1$. Αυτός ο παράγοντας είναι $1,1$ για τις περισσότερες διαδικασίες κατεργασίας με την κοπή, $1,2$ για τη λείανση, και $1,4$ για την Honing.

Γενικά, δεν μπορούμε επαρκώς να περιγράψουμε μια επιφάνεια από τις τιμές των R_a και R_q και μόνο, δεδομένου ότι οι τιμές αυτές είναι μέσοι όροι. Δύο επιφάνειες μπορεί να έχουν την ίδια τιμή τραχύτητας αλλά η πραγματική τους γεωμετρία μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική. Μερικές βαθιές κοιλότητες, παραδείγματος χάριν, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην τιμή της τραχύτητας. Εντούτοις, οι διαφορές στο προφίλ της επιφάνειας μπορούν να είναι σημαντικές και όσον αφορά την κόπωση, την τριβή, και τα χαρακτηριστικά της φθοράς ενός κατασκευασμένου προϊόντος.

2.9.4 Σύμβολα για την τραχύτητα επιφάνειας

Τα αποδεκτά όρια για την τραχύτητα επιφάνειας είναι προσδιορισμένα σε τεχνικά σχέδια από τα σύμβολα που εμφανίζονται γύρω από το σημάδι ελέγχου στο κάτω τμήμα του σχήματος 2.10, ενώ οι τιμές τους τοποθετούνται αριστερά του σημαδιού αυτού. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μια επιφάνεια απλά προσδιορίζουν την τραχύτητα και την κυμάτωση και δεν περιλαμβάνουν τις ρωγμές. Όποτε κρίνεται απαραίτητο, μια ειδική σημείωση συμπεριλαμβάνεται στα τεχνικά σχέδια για να περιγράψει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση των ρωγμών επιφανείας.

2.9.5 Μέτρηση της τραχύτητας επιφάνειας

Διάφορα διαθέσιμα εμπορικά όργανα, αποκαλούμενα ως μετρητές προφίλ επιφάνειας, χρησιμοποιούνται για την μέτρηση και την καταγραφή της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Τα πλέον χρησιμοποιημένα όργανα φέρουν ένα διαμαντένιο οξύ εργαλείο που κινείται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής πέρα από την επιφάνεια. Ακόμη, μπορούμε να παρατηρήσουμε την τραχύτητα επιφάνειας άμεσα μέσω ενός μικροσκοπίου οπτικής ανίχνευσης. Οι στερεοσκοπικές φωτογραφίες, τέλος, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τις τρισδιάστατες όψεις των επιφανειών, και μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να μετρήσουμε την τραχύτητα επιφάνειας.

2.10 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η κατεργασιμότητα στην κοπή είναι ένα χαρακτηριστικό του υλικού και αναφέρεται στο σύνολο των ιδιοτήτων του υλικού που έχουν κάποια επίδραση στην κατεργασία. Το συνηθέστερο μέτρο της κατεργασιμότητας είναι η διάρκεια ζωής του εργαλείου ή η φθορά του εργαλείου. Έτσι, ένα υλικό με μεγάλη κατεργασιμότητα προκαλεί μικρότερη φθορά του εργαλείου από ένα άλλο συγκριτικά λιγότερο κατεργάσιμο υλικό. Το πεδίο φθοράς του εργαλείου που προκύπτει για μία δεδομένη μεταβολή διαστάσεων του τεμαχίου είναι ένα ποσοτικό μέτρο της κατεργασιμότητας.

Εκτός των παραπάνω, η έννοια της κατεργασιμότητας εμπλέκει και ένα μέτρο της ποιότητας της τελικής επιφάνειας και επιπλέον μπορεί να αναφέρεται σε δυνάμεις κοπής και σε ενέργεια. Έτσι, υλικό υψηλής κατεργασιμότητας θεωρείται εκείνο που κατά την κατεργασία του προκύπτει μια καλή αποπερατωμένη επιφάνεια σε συνδυασμό με μία ελάχιστη φθορά του κοπτικού εργαλείου και μια ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για την κοπή.

Μια ταξινόμηση των υλικών από την άποψη της κατεργασιμότητας γίνεται με τους “δείκτες κατεργασιμότητας”. Οι δείκτες αυτοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην πράξη αν και οδηγούν σε ορισμένες περιπτώσεις σε σφάλμα, επειδή αναφέρονται σε ποσοτική σύγκριση ενώ στην πραγματικότητα η σύγκριση είναι περισσότερο ποιοτική. Σαν δείκτης κατεργασιμότητας 100 λαμβάνεται για τα σιδηρούχα μέταλλα η κατεργασιμότητα χάλυβα AISI 1212 (American Standards) και για τα κράματα αλουμινίου η κατεργασιμότητα του κράματος 7075-T6 (American Standards). Ένα δύσκολο σε κατεργασία υλικό, όπως ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας, έχει δείκτη περίπου 25.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Επίσης αναφερόμενο και ως παράλληλος διανεμημένη επεξεργασία, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) είναι ένα παράδειγμα πληροφορίας-επεξεργασίας που εμπνέεται από τον τρόπο που η πυκνά διασυνδεδεμένη, παράλληλη δομή του εγκεφάλου επεξεργάζεται τις πληροφορίες. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι συλλογές μαθηματικών μοντέλων που εξομοιώνουν μερικές από τις παρατηρούμενες ιδιότητες των βιολογικών νευρικών συστημάτων. Τα ANNs αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων στοιχείων που αντιστοιχούν στους νευρώνες του εγκεφάλου, και είναι δεμένα μαζί με σταθμισμένες συνδέσεις που αντιστοιχούν στις συνάψεις του εγκεφάλου.

Η εκμάθηση στα βιολογικά συστήματα περιλαμβάνει και τις ρυθμίσεις στις συνδέσεις μεταξύ των συνάψεων, που υπάρχουν ανάμεσα στους νευρώνες. Αυτό συμβαίνει και στα ANNs επίσης. Η εκμάθηση τυπικά πραγματοποιείται με παραδείγματα μέσω της εκπαίδευσης, ή της έκθεσης σε ένα σύνολο στοιχείων εισόδου / εξόδου, όπου ο αλγόριθμος κατάρτισης ρυθμίζει επαναληπτικά τους συντελεστές των συνδέσεων. Αυτοί οι συντελεστές των συνδέσεων καταχωρούν την γνώση που απαιτείται για να λύσει τα συγκεκριμένα προβλήματα.

Παρά το γεγονός ότι οι υπολογιστές είναι αρκετά πιο γρήγοροι από ότι το ανθρώπινο μυαλό, οι άνθρωποι πλεονεκτούν στο να αναγνωρίζουν χαρακτηριστικά (πρόσωπα, φωνές, κ.λ.π.) ακόμη και κάτω από δύσκολες συνθήκες, αλλά και στο να προσαρμόζονται σε νέες και δυναμικές καταστάσεις. Αυτά τα πλεονεκτήματα οφείλονται στην ικανότητα των ανθρώπων να χρησιμοποιούν παράλληλα τις διάφορες αισθήσεις τους και σε πραγματικό χρόνο. Ο κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης που ονομάζεται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks – ANNs) προσπαθεί να προσδώσει και στους υπολογιστές μερικές από αυτές τις ικανότητες μέσω της μίμησης του τρόπου επεξεργασίας των δεδομένων από το ανθρώπινο μυαλό.

Το ανθρώπινο μυαλό έχει περίπου 100 δισεκατομμύρια συνδεδεμένους νευρώνες (κύτταρα που είναι οι θεμελιώδεις λειτουργικές μονάδες του νευρικού ιστού) και περισσότερες από χίλιες φορές τον παραπάνω αριθμό συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων αυτών. Ο κάθε νευρώνας εκτελεί μόνο ένα απλό καθήκον : Δέχεται ένα σύνολο σημάτων εισόδου. Όταν η συνδυασμένη είσοδος είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο κρίσιμο επίπεδο, ο νευρώνας μεταφέρει το δικό του ηλεκτροχημικό σήμα στους παρακείμενους νευρώνες στην έξοδο. Θεωρείται σήμερα ότι η ανθρώπινη εκμάθηση επιτυγχάνεται με την μεταβολή στην δύναμη των διασυνδέσεων μεταξύ των νευρώνων.

Ένα πλήρως ανεπτυγμένο δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδοσίας είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ενός ANN και είναι χτισμένο, σύμφωνα με τα παραπάνω, από διάφορα επίπεδα στοιχείων επεξεργασίας (νευρώνες). Οι νευρώνες στο πρώτο επίπεδο (εισόδου) τροφοδοτούνται με τα δεδομένα εισόδου, όπως δυνάμεις, ταχύτητες, ηλεκτρικές τάσεις κ.λπ. Κάθε νευρώνας αθροίζει όλες τις εισόδους, με μια είσοδο ανά νευρώνα στο επίπεδο εισόδου, αλλά πολλές εισόδους ανά νευρώνα στο επόμενο επίπεδο. Κάθε νευρώνας μεταφέρει δεδομένα, σύμφωνα με μια συνάρτηση μεταφοράς, σε όλους τους νευρώνες του επομένου επιπέδου. Εντούτοις, κάθε νευρώνας λαμβάνει ένα διαφορετικό σήμα, λόγω των διαφορετικών συντελεστών διασύνδεσης μεταξύ των νευρώνων.

Το τελευταίο επίπεδο είναι το επίπεδο εξόδου. Η έξοδος κάθε νευρώνα σε αυτό το επίπεδο συγκρίνεται με την επιθυμητή ή πραγματική έξοδο. Η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής εξόδου και της ήδη υπολογισμένης (το σφάλμα) ανατροφοδοτείται στο δίκτυο έτσι ώστε οι συντελεστές των συνδέσεων να ρυθμιστούν σε έναν τρόπο που να ελαχιστοποιεί αυτό το σφάλμα. Αφού επαναληφθεί αυτή η διαδικασία αρκετές φορές, το δίκτυο "εκπαιδεύεται" και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τα δεδομένα εισόδου που δεν έχουν εμφανισθεί προηγουμένως στο σύστημα.

Με βάση και τα παραπάνω μπορούμε να δώσουμε τον παρακάτω ορισμό όσον αφορά τα νευρωνικά δίκτυα :

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας μαζικά διανεμημένος επεξεργαστής που αποτελείται από απλές μονάδες επεξεργασίας, ο οποίος έχει μια φυσική κλίση για να καταχωρήσει την εμπειρική γνώση και να την καταστήσει διαθέσιμη για τη χρήση. Μοιάζει με τον εγκέφαλο σε δύο όψεις : 1) Η γνώση αποκτιέται από το δίκτυο, μέσω του περιβάλλοντος του και μιας διαδικασίας εκμάθησης 2) Οι δυνάμεις συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, που είναι

γνωστές ως συναπτικά βάρη, χρησιμοποιούνται για να καταχωρήσουν την επίκτητη γνώση [12].

Αν και τα ANNs είχαν αναπτυχθεί αρχικά στα τέλη της δεκαετίας του '50, μόλις στα μέσα της δεκαετίας του '80 οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις γενικές εφαρμογές. Σήμερα τα ANNs εφαρμόζονται σε έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό πραγματικών προβλημάτων ιδιαίτερης πολυπλοκότητας. Είναι καλές μηχανές αναγνώρισης προτύπων και γεροί ταξινομητές, με δυνατότητα να καθιερωθούν στην εξαγωγή των αποφάσεων ακόμη και όταν έχουμε ανακριβή στοιχεία εισόδου. Προσφέρουν ιδανικές λύσεις σε ποικίλα προβλήματα ταξινόμησης, όπως η ομιλία, η αναγνώριση χαρακτηριστικών και σημάτων, καθώς επίσης και σε λειτουργικές προβλέψεις και στην μοντελοποίηση συστημάτων όπου οι φυσικές διαδικασίες δεν γίνονται κατανοητές ή είναι ιδιαίτερα σύνθετες. Έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη για την πρόβλεψη της ποιότητας της επιφάνειας ενός κομματιού προς κατεργασία, με παραμέτρους εισόδου όπως οι δυνάμεις, η ακουστική εκπομπή, και η ταχύτητα περιστροφής των αξόνων. Τα ANNs μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για να ελέγξουν προβλήματα, όπου οι μεταβλητές εισόδου είναι μετρήσεις, που χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν έναν ενεργοποιητή εξόδου, και το δίκτυο μαθαίνει τη λειτουργία ελέγχου. Το πλεονέκτημα των ANNs βρίσκεται στην ανθεκτικότητά τους ενάντια στις διαστρεβλώσεις στα στοιχεία εισόδου και στην δυνατότητα εκμάθησής τους. Είναι συχνά ιδανικά στην επίλυση των προβλημάτων που είναι πάρα πολύ σύνθετα για τις συμβατικές τεχνολογίες (π.χ., προβλήματα που δεν έχουν μια αλγοριθμική λύση ή για τα οποία μια αλγοριθμική λύση είναι πάρα πολύ σύνθετη για να βρεθεί) και χρειάζονται συχνά σε προβλήματα, στα οποία οι άνθρωποι είναι καλοί στην επίλυση, αλλά για τα οποία οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν αρκούν.

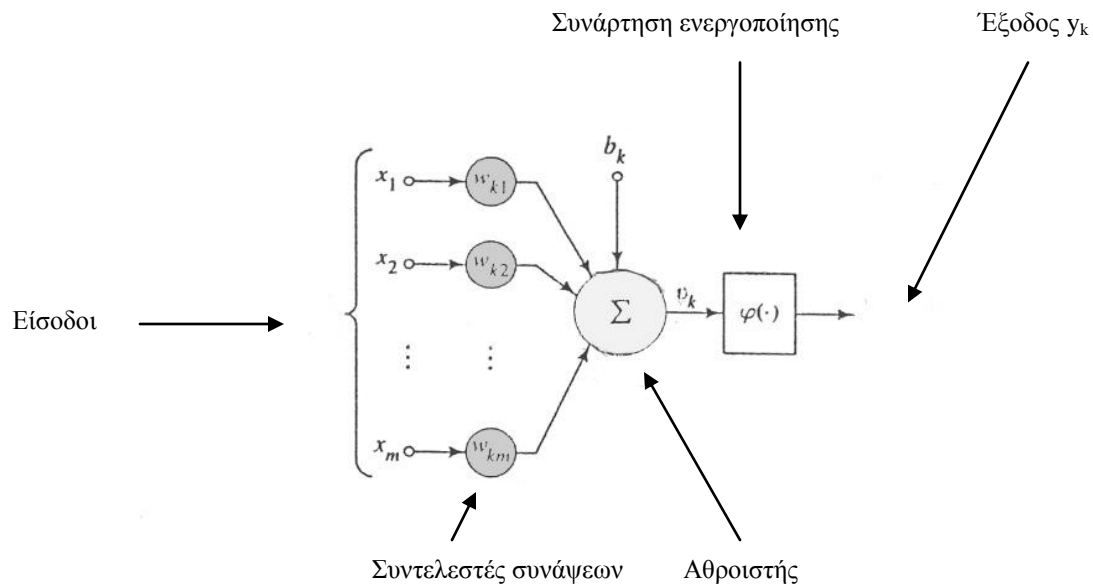
Υπάρχει ένα πλήθος διαφορετικών τύπων ANNs. Μερικά από τα δημοφιλέστερα ANNs περιλαμβάνουν μια πολυεπίπεδη αντίληψη που εκπαιδεύεται γενικά με την οπισθόδρομη διάδοση του αλγορίθμου σφάλματος. Μερικά ANNs είναι ταξινομημένα ως πρόσθιας τροφοδότησης ενώ άλλα είναι επαναλαμβανόμενα (δηλ. implement feedback) ανάλογα με πώς τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω του δικτύου. Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των διαφόρων τύπων των ANNs είναι με βάση την μέθοδο εκμάθησης (ή εκπαίδευσης) τους, δεδομένου ότι μερικά ANNs υιοθετούν την

εποπτευμένη κατάρτιση ενώ άλλα δεν χρειάζονται την επίβλεψη. Η εποπτευμένη κατάρτιση είναι ανάλογη με έναν σπουδαστή που καθοδηγείται από έναν εκπαιδευτικό. Οι αλγόριθμοι που δεν απαιτούν επίβλεψη εκτελούν ουσιαστικά την συγκέντρωση των δεδομένων σε παρόμοιες ομάδες, που βασίζονται σε μετρημένες ιδιότητες ή τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και λειτουργούν ως είσοδοι στους αλγορίθμους. Αυτό είναι ανάλογο με έναν σπουδαστή που εξάγει το μάθημα ολοκληρωτικά από μόνος του. Τα ANNs μπορούν να εφαρμοστούν στο λογισμικό ή και σε εξειδικευμένο υλικό.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑ

Ο νευρώνας είναι μια μονάδα επεξεργασίας – πληροφοριών που είναι θεμελιώδης στη λειτουργία ενός νευρωνικού δικτύου. Το διάγραμμα ομάδων δεδομένων του σχήματος 3.1 εμφανίζει το μοντέλο ενός νευρώνα, ο οποίος διαμορφώνει την βάση για τον σχεδιασμό των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Παρατηρούμε τρία βασικά στοιχεία του νευρωνικού μοντέλου:

1. Μια ομάδα από συνάψεις (ή συνδετικούς κρίκους), κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα βάρος ή ένα δικό της συντελεστή. Συγκεκριμένα, ένα σήμα x_j στην είσοδο της σύναψης j , που είναι συνδεδεμένη με το νευρώνα k , πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή της σύναψης w_{kj} . Είναι σημαντικό να γίνει μια σημείωση του τρόπου με τον οποίο γράφονται οι δείκτες των συντελεστών σύναψης w_{kj} . Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται στον εν λόγω νευρώνα και ο δεύτερος δείκτης αναφέρεται στο τέλος εισόδου της σύναψης στην οποία αναφέρεται ο συντελεστής. Αντίθετα από μια σύναψη του εγκεφάλου, ο συντελεστής σύναψης ενός τεχνητού νευρώνα μπορεί να βρεθεί σε μια σειρά που περιλαμβάνει αρνητικές καθώς επίσης και θετικές τιμές.
2. Έναν αθροιστή για το άθροισμα των σημάτων εισόδου, που σταθμίζονται από τους συντελεστές w_{kj} . Ο αθροιστής δέχεται και μια εξωτερική τιμή b_k που ονομάζεται *bias*. Τα *bias* έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση ή την μείωση της εισόδου της συνάρτησης ενεργοποίησης, ανάλογα με το εάν είναι οι τιμές των b_k είναι θετικές ή αρνητικές, αντίστοιχα. Έτσι το *bias* βοηθά να είναι η είσοδος της συνάρτησης ενεργοποίησης πάντα σε παρόμοιες συνθήκες και συμβάλει έτσι στην διαμόρφωση των σχέσεων μεταξύ εισόδου και εξόδου του κάθε νευρώνα.



Σχήμα 3.1 : Μη γραμμικό μοντέλο ενός νευρώνα.

3. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης για τον περιορισμό του εύρους της εξόδου ενός νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης αναφέρεται επίσης και ως συμπιεστική λειτουργία με την έννοια ότι συμπιέζει την επιτρεπόμενη σειρά εύρους του σήματος εξόδου σε μια πεπερασμένη τιμή.

Χαρακτηριστικά, η κανονικοποιημένη σειρά εύρους της εξόδου ενός νευρώνα γράφεται σαν ένα κλειστό διάστημα μονάδων $[0,1]$ ή εναλλακτικά $[-1,1]$.

Σε μαθηματικούς όρους, μπορούμε να περιγράψουμε έναν νευρώνα k παραθέτοντας τις παρακάτω εξισώσεις :

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (3-1)$$

και

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (3-2)$$

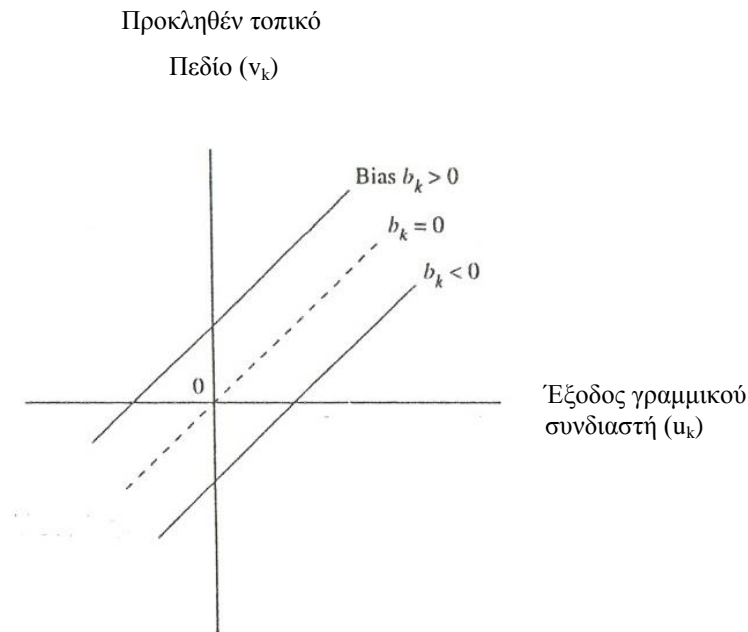
όπου $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ είναι τα σήματα εισόδου και $w_{k1}, w_{k2}, w_{k3}, \dots, w_{km}$ είναι οι συντελεστές των συνάψεων του νευρώνα k . Ο u_k είναι ο γραμμικός συνδιαστής της

εξόδου, που οφείλεται στα σήματα εισόδου. Το b_k είναι το bias, ενώ $\varphi(\dots)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και y_k είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα. Η χρήση του b_k επιδρά στην εφαρμογή ενός μετασχηματισμού στην έξοδο u_k του γραμμικού συνδιαστή στο μοντέλο του σχήματος 3.1, όπως φαίνεται και από την παρακάτω εξίσωση :

$$v_k = u_k + b_k \quad (3-3)$$

Συγκεκριμένα, ανάλογα με το εάν η τιμή b_k είναι θετική ή αρνητική, η σχέση μεταξύ του προκληθέντος τοπικού πεδίου ή της δυναμικής ενεργοποίησης v_k του νευρώνα k και του γραμμικού συνδιαστή εξόδου u_k , τροποποιείται με τρόπο που διευκρινίζεται στο σχήμα 3.2. Από εδώ και πέρα χρησιμοποιείται ο όρος "προκληθέν τοπικό πεδίο".

Το b_k είναι μια εξωτερική παράμετρος του τεχνητού νευρώνα k . Η παρουσία της παραμέτρου αυτής φαίνεται και από την σχέση (3-2). Χρησιμοποιώντας ακόμη τις εξισώσεις (3-1) και (3-3) προκύπτει :



Σχήμα 3.2 : Μετασχηματισμός που προέρχεται από την παρουσία του b_k . Παρατηρούμε ότι $v_k = b_k$ για $u_k = 0$.

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (3-4)$$

και

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (3-5)$$

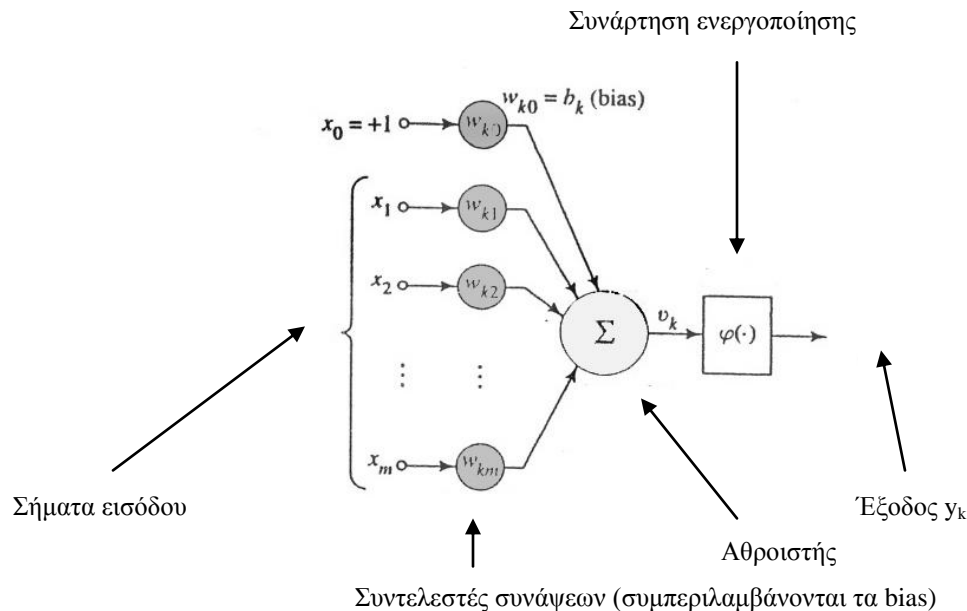
Στην εξίσωση (3-4) προσθέσαμε μια νέα σύναψη. Η είσοδος της είναι :

$$x_0 = +1 \quad (3-6)$$

και ο συντελεστής της είναι :

$$w_{k0} = b_k \quad (3-7)$$

Μπορούμε επομένως να ξαναδιατυπώσουμε το μοντέλο του νευρώνα k , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Σε αυτό το σχήμα, η επίδραση του bias γίνεται φανερή κάνοντας δύο ενέργειες : (1) προσθέτοντας ένα νέο σήμα εισόδου σταθερό στην τιμή +1, και (2) προσθέτοντας ένα νέο συντελεστή σύναψης ίσο με το b_k . Παρότι τα μοντέλα των σχημάτων 3.1 και 3.3 είναι διαφορετικά στην εμφάνιση, είναι από μαθηματική άποψη ισοδύναμα.



Σχήμα 3.3 : Άλλο ένα μη γραμμικό μοντέλο ενός νευρώνα.

3.3 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η συνάρτηση ενεργοποίησης, που συμβολίζεται με $\varphi(v)$, καθορίζει την έξοδο ενός νευρώνα από την άποψη του προκληθέντος τοπικού πεδίου v . Παρακάτω προσδιορίζουμε τους βασικούς τύπους συναρτήσεων ενεργοποίησης, που χρησιμοποιούμε στα περισσότερες εφαρμογές :

1. Βηματική συνάρτηση. Για αυτόν τον τύπο συνάρτησης ενεργοποίησης, που περιγράφεται στο σχήμα 3.4-α, ισχύει :

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases} \quad (3-8)$$

Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία της εφαρμοσμένης μηχανικής, αυτή η μορφή της βηματικής συνάρτησης αναφέρεται συνήθως ως συνάρτηση *Heaviside* (Heaviside function). Αντίστοιχα με τα παραπάνω, η έξοδος του νευρώνα k που υιοθετεί μια τέτοια βηματική συνάρτηση εκφράζεται όπως φαίνεται παρακάτω :

$$y_k = \begin{cases} 1, & v_k \geq 0 \\ 0, & v_k < 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

όπου v_k είναι το προκληθέν τοπικό πεδίο του νευρώνα. Ισχύει λοιπόν :

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k \quad (3-10)$$

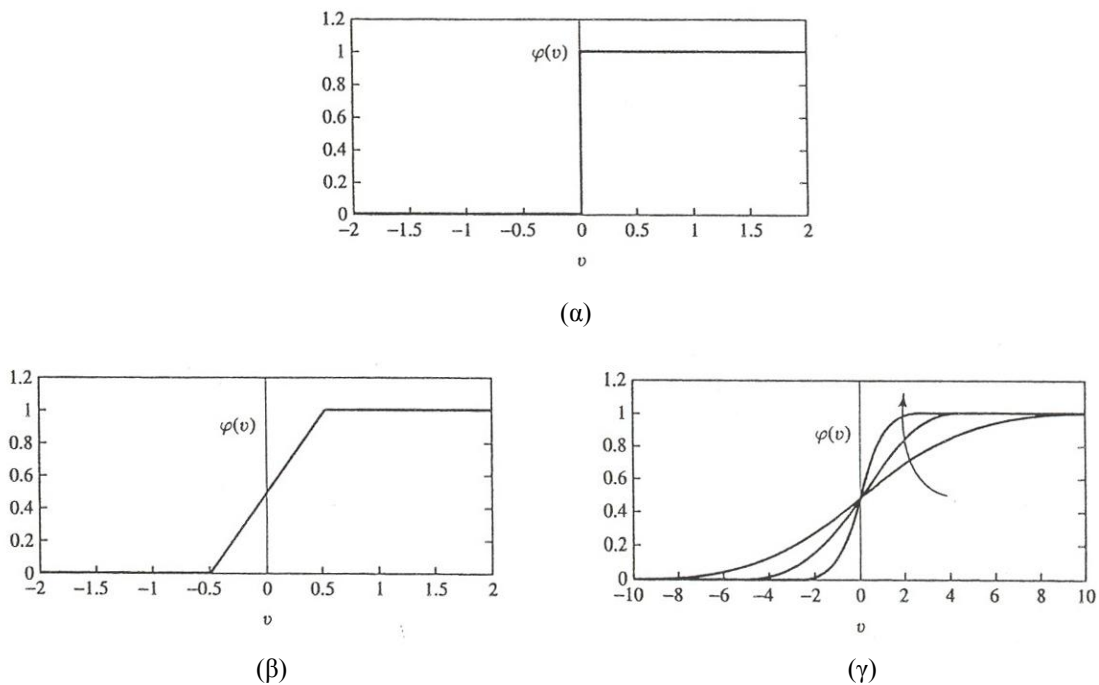
Ένας τέτοιος νευρώνας αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως μοντέλο McCulloch – Pitts, σε αναγνώριση της πρωτοποριακής εργασίας των McCulloch και Pitts (1943). Σε αυτό το μοντέλο, η έξοδος ενός νευρώνα παίρνει την τιμή 1 εάν το προκληθέν τοπικό πεδίο εκείνου του νευρώνα είναι μη αρνητικό, και την τιμή 0 σε κάθε άλλη περίπτωση.

2α. Γραμμική συνάρτηση. Για αυτή την μορφή της συνάρτησης ενεργοποίησης, ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$\varphi(v) = v \quad (3-11)$$

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως όταν οι νευρώνες χρειάζεται να εκτελούν μόνο γραμμικούς υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται ακόμη και στους νευρώνες εξόδου δικτύων, στα οποία προηγούμενοι νευρώνες εφαρμόζουν την σιγμοειδή συνάρτηση, ώστε η έξοδος του δικτύου να μην περιορίζεται μόνο στο εύρος $[-1,1]$, αλλά να μπορεί να πάρει κάθε τιμή.

2β. Γραμμική συνάρτηση ξεχωριστών βημάτων. Για αυτή την μορφή της γραμμικής συνάρτησης που περιγράφεται στο σχήμα 3.4-β, έχουμε :



Σχήμα 3.4 : (α) Βηματική συνάρτηση, (β) Γραμμική συνάρτηση ξεχωριστών βημάτων, (γ) Σιγμοειδής συνάρτηση, για ποικιλία κλίσεων της παραμέτρου a .

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq +\frac{1}{2} \\ v, & +\frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2} \\ 0, & v \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (3-12)$$

όπου ο παράγοντας ενίσχυσης μέσα στη γραμμική περιοχή της λειτουργίας υποτίθεται ότι είναι μονάδα. Αυτή η μορφή της συνάρτησης ενεργοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση σε έναν μη γραμμικό ενισχυτή. Οι ακόλουθες δύο καταστάσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές μορφές της γραμμικής συνάρτησης ξεχωριστών βημάτων :

A) Ένας γραμμικός συνδυαστής προκύπτει εάν η γραμμική περιοχή της λειτουργίας διατηρείται χωρίς να επέλθει κορεσμός.

B) Η γραμμική συνάρτηση ξεχωριστών βημάτων, μειώνεται σε μια βηματική συνάρτηση, εάν ο παράγοντας ενίσχυσης της γραμμικής περιοχής γίνει απείρως μεγάλος.

3. Σιγμοειδής συνάρτηση. Η σιγμοειδής συνάρτηση, της οποίας η γραφική παράσταση φαίνεται στο σχήμα 3.4-γ, είναι μακράν η πιο διαδεδομένη μορφή συναρτήσεων ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Καθορίζεται ως μια αυστηρά αυξανόμενη συνάρτηση η οποία εκθέτει μια ιδανική ισορροπία μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς. Ένα παράδειγμα της σιγμοειδούς συνάρτησης είναι η λογιστική συνάρτηση, που καθορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (3-13)$$

όπου το a είναι η παράμετρος κλίσεως της σιγμοειδούς συνάρτησης. Μεταβάλλοντας την παράμετρο a μπορούμε να λάβουμε σιγμοειδής συναρτήσεις διαφορετικών κλίσεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4-γ. Στην πραγματικότητα, η κλίση στην αρχή είναι ίση με $a/4$. Οριακά, καθώς η παράμετρος κλίσεως προσεγγίζει το άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση γίνεται απλά μια βηματική συνάρτηση. Εκτιμώντας ότι μια βηματική συνάρτηση παίρνει τις τιμές 0 ή 1, μια σιγμοειδής μπορεί να πάρει μια συνεχή σειρά από τιμές από το 0 έως και το 1.

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που καθορίζονται στις εξισώσεις (3-8), (3-11), (3-12) και (3-13) έχουν εύρος από 0 έως και +1. Είναι μερικές φορές επιθυμητό να έχει η συνάρτηση ενεργοποίησης εύρος από -1 έως +1, οπότε σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση ενεργοποίησης παίρνει μια αντισυμμετρική μορφή όσον αφορά την αρχή της. Δηλαδή η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μια περίεργη συνάρτηση του προκληθέντος τοπικού πεδίου. Συγκεκριμένα, η βηματική συνάρτηση της εξίσωσης (3-8) καθορίζεται τώρα όπως φαίνεται παρακάτω :

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v > 0 \\ 0, & v = 0 \\ -1, & v < 0 \end{cases} \quad (3-14)$$

η όποια αναφέρεται συνήθως στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία ως συνάρτηση *Signum* (Signum function).

Για την αντίστοιχη μορφή της σιγμοειδούς συνάρτησης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης, που καθορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\varphi(v) = \tanh(v) \quad (3-15)$$

Επιτρέποντας σε μια συνάρτηση ενεργοποίησης σιγμοειδούς τύπου να πάρει αρνητικές τιμές, όπως μπορεί να προκύψει από την εξίσωση (3-15), είναι δυνατό να έχουμε διάφορα οφέλη.

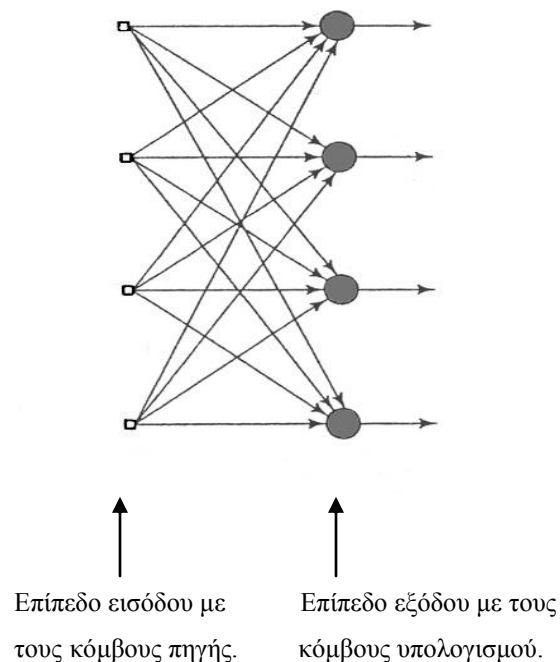
3.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες ενός νευρωνικού δικτύου είναι δομημένοι είναι στενά συνδεδεμένος με τον αλγόριθμο εκμάθησης, που χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει το δίκτυο. Μπορούμε, λοιπόν, να μιλήσουμε για τους αλγορίθμους εκμάθησης, που χρησιμοποιούνται στο σχέδιο των νευρωνικών δικτύων, καθώς αυτά κατασκευάζονται καθώς και για την αρχιτεκτονική των δικτύων αυτών.

Γενικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε τρεις πλήρως διαφορετικές τάξεις αρχιτεκτονικών των δικτύων :

1. Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο οι νευρώνες οργανώνονται υπό μορφή επιπέδων. Στην απλούστερη μορφή ενός τέτοιου δικτύου, έχουμε ένα επίπεδο εισόδου των κόμβων πηγής που προβάλλονται επάνω σε ένα επίπεδο εξόδου, το οποίο αποτελείται από νευρώνες (κόμβους υπολογισμού), αλλά όχι αντίστροφα. Δηλαδή αυτό το δίκτυο είναι αυστηρά πρόσθιας τροφοδότησης ή μη κυκλικού τύπου.



Σχήμα 3.5 : Πρόσθιας τροφοδότησης ή μη κυκλικό δίκτυο με ένα επίπεδο νευρώνων.

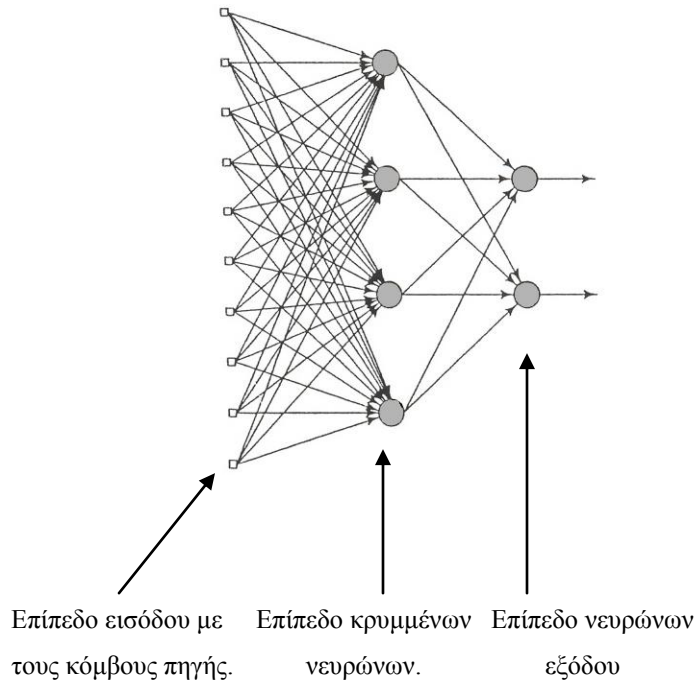
Ένα τέτοιο δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 3.5, για την περίπτωση τεσσάρων κόμβων τόσο στο επίπεδο εισόδου, όσο και σε αυτό της και εξόδου. Αυτό το δίκτυο καλείται *δίκτυο ενός επιπέδου*, όπου ο προσδιορισμός “ενός επιπέδου”, αναφέρεται στο επίπεδο εξόδου των κόμβων υπολογισμού. Δεν μετράμε το επίπεδο εισόδου των κόμβων πηγής επειδή κανένας υπολογισμός δεν εκτελείται εκεί.

2. Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης πολλαπλών επιπέδων

Η δεύτερη τάξη των πρόσθιας τροφοδότησης νευρωνικών δικτύων χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός ή περισσότερων κρυμμένων επιπέδων, των οποίων οι κόμβοι υπολογισμού ονομάζονται αντίστοιχα *κρυμμένοι νευρώνες* ή *κρυμμένες μονάδες*. Η λειτουργία των κρυμμένων νευρώνων είναι να επεμβαίνουν μεταξύ της εξωτερικής εισόδου και της εξόδου του δικτύου με κάποιο χρήσιμο τρόπο. Με την προσθήκη ενός ή περισσότερων κρυμμένων επιπέδων, το δίκτυο είναι ικανό να εξαγάγει στατιστικές υψηλής τάξης. Σε μια μάλλον χαλαρή έννοια, το δίκτυο αποκτά μια σφαιρική προοπτική παρά την τοπική συνδετικότητα που οφείλεται στην πρόσθετη ομάδα των συνδέσεων μεταξύ των συνάψεων και την πρόσθετη διάσταση των νευρωνικών αλληλεπιδράσεων. Η δυνατότητα των κρυμμένων νευρώνων να εξαγάγουν υψηλής τάξης στατιστικές είναι ιδιαίτερα πολύτιμη, ειδικά όταν το μέγεθος του επιπέδου εισόδου είναι μεγάλο.

Οι κόμβοι πηγής στο επίπεδο εισόδου του δικτύου παρέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία του προτύπου ενεργοποίησης (διάνυσμα εισόδου), τα οποία αποτελούν τα σήματα εισόδου που εφαρμόζονται στους νευρώνες (κόμβους υπολογισμού) στο δεύτερο επίπεδο (δηλ. το πρώτο κρυμμένο επίπεδο). Τα σήματα εξόδου του δεύτερου επιπέδου χρησιμοποιούνται ως εισοδοί στο τρίτο επίπεδο, και το ίδιο συμβαίνει για το υπόλοιπο του δικτύου. Τυπικά οι νευρώνες, σε κάθε επίπεδο του δικτύου, έχουν ως εισόδους τα σήματα εξόδου του προηγούμενου επιπέδου μόνο. Το σύνολο σημάτων εξόδου των νευρώνων στο τελικό επίπεδο εξόδου του δικτύου, αποτελεί τη γενική απάντηση του δικτύου στο πρότυπο ενεργοποίησης που παρέχεται από τους κόμβους πηγής στο πρώτο επίπεδο εισόδου. Η αρχιτεκτονική γραφική παράσταση του σχήματος 3.6 μας δείχνει το σχεδιάγραμμα ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου πρόσθιας τροφοδότησης για την περίπτωση ενός μονού κρυμμένου επιπέδου.

Για συντομία το δίκτυο στο σχήμα 3.6 μπορεί να αναφέρεται και ως δίκτυο 10-4-2 επειδή έχει 10 κόμβους πηγής, 4 κρυμμένους νευρώνες και 2 νευρώνες εξόδου. Σαν ένα άλλο παράδειγμα, ένα δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με m κόμβους πηγής, h_1 νευρώνες στο πρώτο κρυμμένο επίπεδο, h_2 νευρώνες στο δεύτερο κρυμμένο επίπεδο, και q νευρώνες στο επίπεδο εξόδου, μπορεί σύμφωνα με τα παραπάνω να αναφέρεται και ως δίκτυο $m-h_1-h_2-q$.



Σχήμα 3.6 : Πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ένα κρυμμένο επίπεδο και ένα επίπεδο εξόδου.

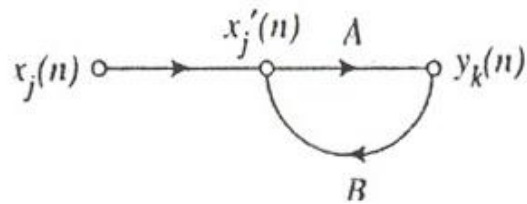
Το νευρωνικό δίκτυο στο σχήμα 3.6 λέμε ότι είναι *πλήρως συνδεδεμένο* με την έννοια ότι κάθε κόμβος σε κάθε επίπεδο του δικτύου συνδέεται με κάθε άλλο κόμβο στο παρακείμενο μπροστινό επίπεδο. Εάν, εντούτοις, μερικές από τις συνδέσεις επικοινωνίας (συνδέσεις συνάψεων) λείπουν από το δίκτυο, λέμε ότι το δίκτυο είναι *μερικώς συνδεδεμένο*.

3. Δίκτυα με ανάδραση

Όπως είπαμε όταν το σήμα εξόδου κάθε νευρώνα οδηγείται ως είσοδος μόνο στους νευρώνες του επομένου επιπέδου, λέμε πως έχουμε ένα δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης. Ένα νευρωνικό δίκτυο με ανάδραση είναι στην ουσία ένα νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης, το οποίο έχει όμως τουλάχιστον έναν βρόγχο ανατροφοδότησης.

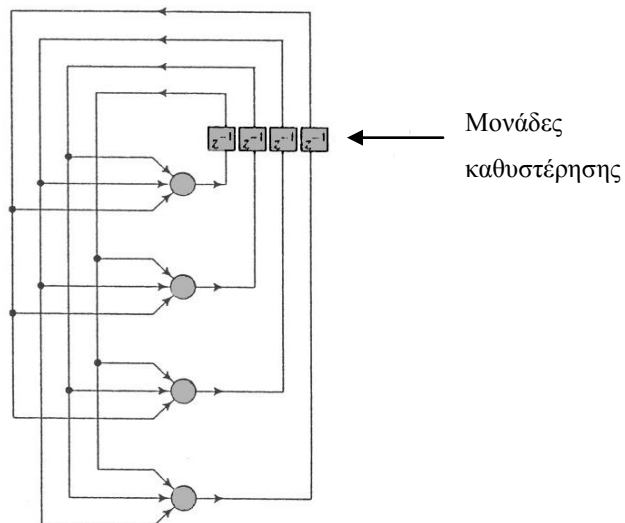
Στο σημείο αυτό πρέπει να πούμε πως η έννοια της ανατροφοδότησης ενυπάρχει σε κάθε δυναμικό σύστημα, όταν η έξοδος ενός στοιχείου (νευρώνα) του συστήματος επηρεάζει με συγκεκριμένο τρόπο την είσοδο που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο στοιχείο. Η ανατροφοδότηση παρατηρείται σχεδόν σε κάθε μέρος του νευρικού συστήματος του ανθρώπινου αλλά και άλλων οργανισμών. Στο επόμενο σχήμα (Σχ.3.7)

παρουσιάζεται ένα γράφημα ροής σημάτων ενός συστήματος ανατροφοδότησης που αποτελείται από ένα βρόγχο ανατροφοδότησης.



Σχήμα 3.7 : Γράφημα ροής σημάτων συστήματος ανατροφοδότησης με έναν βρόγχο.

Στο γράφημα αυτό, το σήμα εισόδου $x_j(n)$, το εσωτερικό σήμα $x'_j(n)$ και το σήμα εξόδου $y_k(n)$, είναι συναρτήσεις της μεταβλητής χρόνου n . Το σύστημα θεωρείται ότι είναι γραμμικό και αποτελείται από ένα κλάδο εμπρόσθιας τροφοδότησης (A) και από ένα κλάδο ανατροφοδότησης (B).

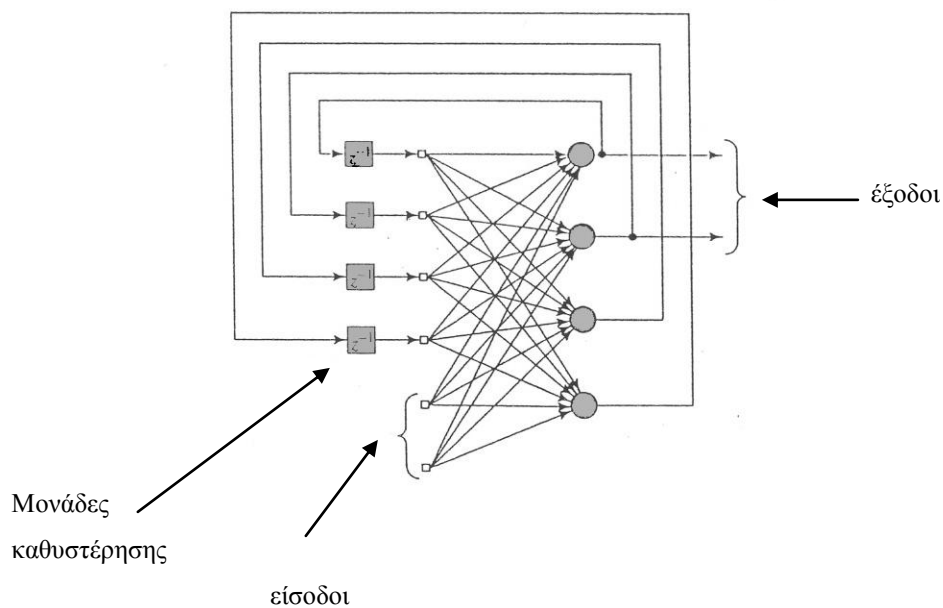


Σχήμα 3.8: Δίκτυο με ανάδραση χωρίς βρόγχους αυτό-ανατροφοδότησης και κρυμμένα επίπεδα.

Παραδείγματος χάριν, ένα δίκτυο με ανάδραση μπορεί να αποτελείται από ένα μονό επίπεδο νευρώνων, με κάθε νευρώνα να τροφοδοτεί το σήμα εξόδου του πίσω στην είσοδο όλων των άλλων νευρώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Στη δομή που απεικονίζεται σε αυτό το σχήμα δεν υπάρχει κανένας βρόγχος αυτό-ανατροφοδότησης στο δίκτυο. Η αυτό-ανατροφοδότηση αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου η έξοδος ενός νευρώνα ανατροφοδοτείται στην ίδια του την είσοδο. Το δίκτυο του σχήματος 3.8 επίσης δεν έχει κανέναν κρυμμένο νευρώνα.

Στο σχήμα 3.9, τέλος, επεξηγούμε μια άλλη τάξη των δικτύων ανάδρασης με κρυμμένους νευρώνες. Οι συνδέσεις ανατροφοδότησης που εμφανίζονται στο σχήμα 3.9 δημιουργούνται από τους κρυμμένους νευρώνες καθώς επίσης και από τους νευρώνες εξόδου.

Η παρουσία βρόγχων ανατροφοδότησης, στην επαναλαμβανόμενη δομή είτε του σχήματος 3.8 είτε του σχήματος 3.9, έχει έναν βαθύ αντίκτυπο στην δυνατότητα εκμάθησης του δικτύου και της απόδοσής του. Επιπλέον, οι βρόγχοι ανατροφοδότησης περιλαμβάνουν την χρήση ιδιαίτερου κλάδου που συντίθεται από στοιχεία μονάδων-καθυστέρησης (που συμβολίζονται με z^{-1}) και οδηγούν σε μια μη γραμμική δυναμική συμπεριφορά, υποθέτοντας ότι το νευρωνικό δίκτυο περιέχει μη γραμμικές μονάδες.



Σχήμα 3.9 : Δίκτυο με ανάδραση και κρυμμένους νευρώνες.

3.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η δημιουργία και υλοποίησης ενός νευρωνικού δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί με σχετική ευκολία μέσω του προγράμματος MATLAB. Το MATLAB είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον μηχανικό και χρησιμοποιείται σε όλα τα πεδία των εφαρμογών του. Είναι κατάλληλο για την προσομοίωση τόσο γραμμικών, όσο και μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων. Έχει τη δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης και σύνδεσής τους με μεθόδους βελτιστοποίησης και ελέγχου. Έχει επίσης τη δυνατότητα προγραμματισμού πολλών προβλημάτων με τη χρήση έτοιμων συναρτήσεων καθώς και υπορουτινών αριθμητικής ανάλυσης. Περιλαμβάνει εργαλεία για τον αυτόματο έλεγχο, τη βελτιστοποίηση, την επεξεργασία σήματος καθώς και την ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων, που μας ενδιαφέρουν εδώ. Η ευκολία με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η υλοποίηση νευρωνικών δικτύων, είναι ο λόγος που θα χρησιμοποιηθεί αυτό το πρόγραμμα στην εφαρμογή μας.

Το βασικό παράθυρο του προγράμματος είναι το MATLAB Command Window. Σε αυτό γράφονται οι εντολές, καλούνται οι διάφορες εφαρμογές που έχει δημιουργήσει ο χρήστης και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Για τη δημιουργία κάθε καινούριας εφαρμογής χρησιμοποιείται ένα αρχείο με κατάληξη .m το οποίο ανοίγει από το MATLAB Command Window με το menu File ή το αντίστοιχο εικονίδιο. Η εφαρμογή δημιουργείται μέσω ενός δεύτερου παραθύρου που ονομάζεται MATLAB Editor / Debugger. Όλα τα αρχεία που περιέχουν εφαρμογές, δηλαδή κάποιον εκτελέσιμο κώδικα εντολών, αποθηκεύονται με κάποιο όνομα. Για την εκτέλεσή τους καλείται το αντίστοιχο αρχείο με το όνομά του από το MATLAB Command Window. Η αναζήτηση των αρχείων από το πρόγραμμα γίνεται με συγκεκριμένη σειρά. Όταν καλείται ένα εκτελέσιμο αρχείο, ο Debugger ελέγχει τη σειρά εντολών και εντοπίζει αν υπάρχει κάποιο λάθος.

Η μνήμη του προγράμματος ονομάζεται workspace και αποτελεί το κομμάτι της μνήμης στο οποίο αποθηκεύονται οι εντολές και όλες οι μεταβλητές που έχουν οριστεί στο πρόγραμμα. Η αποθήκευσή τους γίνεται σε δυαδική μορφή, που μπορεί να διαβάσει γρήγορα μόνο το MATLAB. Αν χρειάζεται να διαβαστεί κάτι από τη μνήμη σε άλλο πρόγραμμα, πρέπει να αποθηκευτεί σε μορφή κειμένου με τη χρήση κατάλληλης

εντολής. Κάθε φορά που κλείνει το πρόγραμμα η μνήμη αδειάζει και ότι είναι αποθηκευμένο χάνεται εκτός εάν οριστεί η μόνιμη αποθήκευσή του σε κάποιο αρχείο. Η επιθεώρηση της μνήμης μπορεί να γίνει με το Workspace Browser από το αντίστοιχο εικονίδιο της βασικής γραμμής εργαλείων του MATLAB Command Window που περιλαμβάνει διάφορα εικονίδια τα οποία αντιστοιχούν και σε άλλες εντολές.

Στο σημείο αυτό δεν κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούμε εκτενώς στις εντολές του MATLAB, μιας και θα αναφερθούμε παρακάτω στις εντολές που χρησιμοποιούμε για την δημιουργία των νευρωνικών δικτύων, που είναι και ο στόχος μας. Παρόλα αυτά πρέπει να πούμε ότι ένα βασικό στοιχείο, που χρησιμοποιείται και στην κατασκευή των νευρωνικών δικτύων αλλά και στο πρόγραμμα MATLAB γενικότερα είναι τα μητρώα. Ο ορισμός τους γίνεται με την παρουσίαση των στοιχείων τους ανά γραμμή, τα οποία βρίσκονται μέσα σε αγκύλες. Έτσι έχουμε, για παράδειγμα :

$\mathbf{A} = [\mathbf{a} \ \mathbf{b}; \mathbf{c} \ \mathbf{d}]$: ορίζεται το μητρώο ή ο πίνακας A με δύο γραμμές και δύο στήλες. Στην πρώτη γραμμή υπάρχουν τα στοιχεία a , b και στη δεύτερη τα c , d. Τα στοιχεία μιας γραμμής χωρίζονται μεταξύ τους με κενό ή με κόμμα και οι γραμμές χωρίζονται μεταξύ τους με ερωτηματικό.

Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται και τα διανύσματα:

$\mathbf{p} = [1 \ 2 \ 3 \ 4]$: ορίζεται το διάνυσμα γραμμή με τα τέσσερα αυτά στοιχεία.

$\mathbf{p} = [1;2;3;4]$: ορίζεται το διάνυσμα στήλη με τα τέσσερα αυτά στοιχεία.

$\mathbf{p} = [1:4]$: ορίζεται ένα διάνυσμα γραμμή ίδιο με το πρώτο με τη χρήση του συμβόλου ‘ : ’, που υποδηλώνει το σύνολο των αριθμών από το 1 έως το 4 με βήμα 1. Αν το βήμα είναι διαφορετικό, για παράδειγμα 0,1 ορίζεται ως $1 : 0,1 : 4$.

Αν μετά από μια εντολή ακολουθεί ερωτηματικό, η εντολή εκτελείται χωρίς όμως να φαίνεται το αποτέλεσμα. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο όταν η εντολή είναι ενδιάμεση και δε μας ενδιαφέρει το αποτέλεσμά της. Για παράδειγμα όταν εισάγεται ένας πίνακας με πολλά στοιχεία που χρειάζεται για μετέπειτα υπολογισμούς, είναι χρήσιμο να μην εμφανίζεται ο πίνακας, αλλά να εκτελούνται οι υπολογισμοί και να φαίνεται μόνο το τελικό αποτέλεσμα. Συνήθως όλες οι εντολές ακολουθούνται από ερωτηματικό, εκτός από αυτές που δίνουν το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Η υλοποίηση ενός νευρωνικού δικτύου στο MATLAB γίνεται πολύ εύκολα ακόμη και για ένα πολύπλοκο δίκτυο, αρκεί ένας μικρός αριθμός εντολών. Το πρόγραμμα

περιλαμβάνει όλες τις συνηθισμένες συναρτήσεις ενεργοποίησης που αρκούν για κάθε περίπτωση, ενώ ακόμα κι αν χρειαστεί μια διαφορετική συνάρτηση, μπορεί να οριστεί από το χρήστη. Περιλαμβάνει ένα σημαντικό αριθμό αλγόριθμων εκπαίδευσης και όλες οι παράμετροι ενός αλγόριθμου μπορούν να καθοριστούν από το χρήστη. Η επιλογή του είδους του δικτύου, της αρχιτεκτονικής, των συναρτήσεων ενεργοποίησης και του αλγόριθμου εκπαίδευσης, γίνεται με μία μόνο εντολή. Επειδή οι διαθέσιμες εντολές είναι πάρα πολλές, θα γίνει αναφορά μόνο αυτών που πιθανώς θα χρειαστούμε για την δημιουργία του νευρωνικού δικτύου που θα επιλέξουμε.

Η βασική εντολή με την οποία δημιουργείται ένα νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδοσίας είναι η:

net = newff, που η ολοκληρωμένη σύνταξή της είναι:

net = newff(PR, [S1 S2...SN], {TF1 TF2...TFN} , BTF, PF), όπου:

PR : ο $R \times 2$ πίνακας των ελάχιστων και μέγιστων τιμών που μπορούν να πάρουν οι R μεταβλητές εισόδου.

Si : ο αριθμός των νευρώνων στο i επίπεδο σε σύνολο N επιπέδων.

Tfi : η συνάρτηση ενεργοποίησης στο i επίπεδο.

BTF : ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που θα χρησιμοποιηθεί.

PF : η συνάρτηση σφάλματος που χρησιμοποιείται για να κριθεί η απόδοση του δικτύου και το τέλος της εκπαίδευσης.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω ορίσματα της εντολής υπάρχουν πολλές επιλογές, οι πιο συνηθισμένες των οποίων είναι οι ακόλουθες.

Ο ορισμός των μέγιστων και ελάχιστων τιμών εισόδου μπορεί να γίνει και με διαφορετικό τρόπο. Αν έχει δοθεί ο πίνακας P που περιλαμβάνει το σύνολο των διανυσμάτων εισόδου κατά την εκπαίδευση, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή κάθε γραμμής του πίνακα, που αντιστοιχεί σε μια μεταβλητή εισόδου, δίνεται με την εντολή **minmax(p)**.

Όταν οι τιμές εισόδου δε χρειάζεται να είναι μεγαλύτερες από αυτές που δόθηκαν κατά την εκπαίδευση μπορεί να αντικατασταθεί ο πίνακας **PR** από την εντολή **minmax(p)**.

Για την επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης σε κάθε επίπεδο, μπαίνει στη θέση του **Tfi** η αντίστοιχη εντολή:

- 'logsig'** : αντιστοιχεί στη λογιστική σιγμοειδή συνάρτηση.
'tansig' : αντιστοιχεί στη σιγμοειδή συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης.
'purelin' : αντιστοιχεί στη γραμμική συνάρτηση $\varphi(v) = v$.

Η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου εκπαίδευσης γίνεται με την τοποθέτηση της αντίστοιχης εντολής στη θέση του **BTF**. Για τις διάφορες μορφές αλγορίθμων που μπορεί να συναντήσουμε, έχουμε :

- 'traingd'** : εφαρμόζεται ο βασικός αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης.
'traingda' : εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης με μεταβλητό ρυθμό εκπαίδευσης.
'traingdm' : εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης με τη χρήση παράγοντα ορμής.
'traingdx' : εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης με τη χρήση παράγοντα ορμής αλλά και μεταβλητό ρυθμό εκπαίδευσης.
'trainlm' : εφαρμόζεται ο αλγόριθμος των Levenberg-Marquardt.

Σε περίπτωση που δεν οριστεί κάποιος συγκεκριμένος αλγόριθμος, ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα ο αλγόριθμος των Levenberg-Marquardt, επειδή ολοκληρώνει πολύ γρήγορα την εκπαίδευση.

Η επιλογή της συνάρτησης σφάλματος που θα χρησιμοποιηθεί γίνεται με την τοποθέτηση της αντίστοιχης εντολής στη θέση του **PF** :

- 'mse'** : είναι η συνάρτηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Η συνάρτηση αυτή είναι η μόνη που μας ενδιαφέρει γι' αυτό και δεν αναφέρονται άλλες, ενώ μπορεί να παραλειφθεί ο ορισμός της, καθώς ορίζεται αυτόματα για τα νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδοσίας.

Κάθε αλγόριθμος εκπαίδευσης χαρακτηρίζεται από μια σειρά παραμέτρων, η τιμή των οποίων έχει ιδιαίτερη σημασία για το τελικό σφάλμα στην απόδοση του δικτύου και την ταχύτητα με την οποία θα οδηγηθεί σε αυτό. Ορισμένες παράμετροι που αφορούν όλους τους αλγόριθμους καθορίζονται με τις εντολές :

net.trainParam.goal = 0 : ορίζεται η τιμή που πρέπει να πάρει το σφάλμα για να σταματήσει η επανάληψη του αλγορίθμου.

net.trainParam.epochs = 50 : ορίζεται ο μέγιστος αριθμός εποχών που μπορεί να διαρκέσει η εκπαίδευση.

net.trainParam.min_grad = 1e-5 : ορίζεται η τιμή της παραγώγου του σφάλματος για την οποία θα σταματήσει η επανάληψη του αλγόριθμου.

net.trainParam.time = 200 : ορίζεται ο μέγιστος χρόνος σε δευτερόλεπτα που μπορεί να διαρκέσει η εκπαίδευση.

net.trainParam.lr = 0,1 : ορίζεται η τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης.

net.trainParam.show = 10 : ορίζεται ο αριθμός των εποχών, ανά τον οποίο παρουσιάζεται η εξέλιξη του δικτύου.

Ο καθορισμός συγκεκριμένων τιμών για τις παραμέτρους εκπαίδευσης δεν είναι αναγκαίος και αν δε γίνει χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές του αλγόριθμου.

Για το βασικό αλγόριθμο της οπισθόδρομης διάδοσης (gd) οι προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων είναι 0 για την τιμή του σφάλματος, 10 για το μέγιστο αριθμό εποχών, 10^{-10} για την ελάχιστη τιμή της παραγώγου, 0,01 για το ρυθμό εκπαίδευσης και για την παρουσίαση της εξέλιξης της εκπαίδευσης να γίνεται ανά 25 εποχές. Το κριτήριο διακοπής του αλγόριθμου είναι η τιμή του σφάλματος ή ο μέγιστος αριθμός εποχών ή η ελάχιστη τιμή της παραγώγου ή ο μέγιστος χρόνος εκπαίδευσης, να φτάσουν στην καθορισμένη τιμή.

Για τον αλγόριθμο της οπισθόδρομης διάδοσης με μεταβλητό ρυθμό εκπαίδευσης (gda) ισχύουν τα ίδια με την προσθήκη ορισμένων ακόμα παραμέτρων:

net.trainParam.lr_inc = 1,05 : που καθορίζει το συντελεστή αύξησης του ρυθμού εκπαίδευσης.

net.trainParam.lr_dec = 0,7 : που καθορίζει το συντελεστή μείωσης του ρυθμού εκπαίδευσης όταν αυτό χρειάζεται.

net.trainParam.maxJed_inc = 1,04 : που ορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση στη συνάρτηση σφάλματος σε μια επανάληψη.

Οι τιμές που δόθηκαν στους συντελεστές είναι ίσες με τις προεπιλεγμένες τιμές του αλγόριθμου. Η τελευταία παράμετρος επιβάλλει την ακύρωση της μεταβολής των συντελεστών βαρύτητας της τελευταίας επανάληψης, αν οδηγεί σε αύξηση του σφάλματος μεγαλύτερη από αυτή που ορίζεται με το συντελεστή.

Στον αλγόριθμο της οπισθόδρομης διάδοσης με τη χρήση παράγοντα ορμής (gdm) ισχύουν τα ίδια ακριβώς με το βασικό αλγόριθμο της οπισθόδρομης διάδοσης (gd), με μόνη διαφορά την ύπαρξη επιπλέον του παράγοντα ορμής. Η εντολή:

net.trainParam.mc = 0,9 : καθορίζει την τιμή του παράγοντα ορμής.

Η συγκεκριμένη τιμή είναι η προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος και η εντολή χρειάζεται μόνο αν είναι επιθυμητή η αλλαγή της.

Ο αλγόριθμος της οπισθόδρομης διάδοσης με τη χρήση παράγοντα ορμής αλλά και μεταβλητό ρυθμό εκπαίδευσης (gdx) έχει ως παραμέτρους το σύνολο των παραμέτρων των δύο προηγούμενων αλγόριθμων, οι οποίες ορίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Ο αλγόριθμος των Levenberg-Marquardt έχει ως παραμέτρους το μέγιστο αριθμό εποχών (με προεπιλεγμένη τιμή 100), την τιμή του σφάλματος που αποτελεί στόχο για την εκπαίδευση (με προεπιλεγμένη τιμή 0), την ελάχιστη τιμή της παραγώγου του σφάλματος (με προεπιλεγμένη τιμή 10^{-10}), τον αριθμό εποχών ανά τον οποίο παρουσιάζεται η εξέλιξη της εκπαίδευσης (με προεπιλεγμένη τιμή 25) και το μέγιστο χρόνο διάρκειας της εκπαίδευσης, που ορίζονται όπως και προηγουμένως. Επιπλέον έχει ορισμένες ακόμα παραμέτρους που καθορίζονται με τις εντολές :

net.trainParam.mu = 0,001 : δίνει τιμή στο συντελεστή μ που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος.

net.trainParam.mu_dec = 0,1 : ορίζει το συντελεστή κατά τον οποίο γίνεται κάθε φορά η μείωση του μ .

net.trainParam.mu_inc = 10 : ορίζει το συντελεστή κατά τον οποίο γίνεται κάθε φορά η αύξηση του μ .

net.trainParam.mu_max = 1e10 : ορίζει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το μ .

net.trainParam.mem_reduc = 1 : ορίζει το συντελεστή κατά τον οποίο μειώνεται η απαιτούμενη μνήμη, που συνεπάγεται και μείωση της ταχύτητας του αλγόριθμου. Όταν ισούται με 1 η ταχύτητα είναι η μέγιστη δυνατή. Όταν η διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή δεν είναι αρκετή, είναι αναγκαία η μείωση της απαιτούμενης μνήμης του αλγορίθμου, που γίνεται με την τοποθέτηση ενός μεγαλύτερου συντελεστή.

Οι τιμές που δίνονται εδώ είναι και οι προεπιλεγμένες του αλγορίθμου. Η συνθήκη διακοπής του αλγορίθμου περιλαμβάνει εκτός από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν για τους προηγούμενους αλγορίθμους και την περίπτωση που η τιμή του μ ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη.

Για την εφαρμογή ενός αλγορίθμου εκπαίδευσης χρειάζεται, εκτός από την αναφορά του και τον ενδεχόμενο επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων του, η παρουσίαση των

διανυσμάτων εισόδου και επιθυμητής εξόδου. Όλα τα διανύσματα εισόδου εισάγονται με την μορφή ενός $m \times Q$ πίνακα p . Κάθε στήλη του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα από τα Q διανύσματα εισόδου και κάθε γραμμή σε έναν από τους m κόμβους εισόδου του δικτύου. Αντίστοιχα τα διανύσματα στόχοι εξόδου εισάγονται με την μορφή ενός $l \times Q$ πίνακα t , όπου l ο αριθμός των νευρώνων εξόδου. Η διόρθωση των τιμών των συντελεστών βαρύτητας και των bias γίνεται μετά από κάθε πέρασμα όλων των διανυσμάτων, δηλαδή ανά εποχή.

Κάθε αλγόριθμος εκπαίδευσης μπορεί να συνδυασθεί με την τεχνική της πρόωρης διακοπής, ώστε να εξασφαλισθεί η ικανότητα γενίκευσης του δικτύου. Η τεχνική αυτή απαιτεί εκτός από τα διανύσματα εκπαίδευσης και την εισαγωγή δύο ακόμη ομάδων διανυσμάτων, την ομάδα επικύρωσης και την ομάδα ελέγχου, με τον εξής τρόπο :

$\mathbf{vv.P} = \mathbf{A}$: εισάγονται τα K διανύσματα εισόδου της ομάδας επικύρωσης μέσω ενός $m \times K$ πίνακα A .

$\mathbf{vv.T} = \mathbf{B}$: εισάγονται τα διανύσματα στόχοι εξόδου της ομάδας επικύρωσης μέσω ενός $l \times K$ πίνακα B .

$\mathbf{tv.P} = \mathbf{C}$: εισάγονται τα L διανύσματα εισόδου της ομάδας ελέγχου μέσω ενός $m \times L$ πίνακα C .

$\mathbf{tv.T} = \mathbf{D}$: εισάγονται τα L διανύσματα στόχοι εξόδου της ομάδας ελέγχου μέσω ενός $l \times L$ πίνακα D .

Αντί του \mathbf{vv} (validation vectors) μπορεί με το ίδιο αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί η στοιχειοσειρά \mathbf{val} και αντί του \mathbf{tv} (test vectors) η στοιχειοσειρά \mathbf{test} .

Η τελευταία απαραίτητη εντολή για τη δημιουργία του νευρωνικού δικτύου είναι η:

$[\mathbf{net}, \mathbf{tr}]$ η οποία επιστρέφει το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο και τον πίνακα \mathbf{tr} , ο οποίος περιέχει την τιμή της συνάρτησης σφάλματος για κάθε μια από τις τρεις ομάδες διανυσμάτων σε κάθε εποχή. Η ολοκληρωμένη σύνταξη της εντολής είναι :

$[\mathbf{net}, \mathbf{tr}] = \mathbf{train}(\mathbf{net}, \mathbf{P}, \mathbf{t}, [], [], \mathbf{vv}, \mathbf{tv})$, όπου :

\mathbf{net} : το νευρωνικό δίκτυο.

\mathbf{p} : ο πίνακας διανυσμάτων εισόδου της εκπαίδευσης.

\mathbf{t} : ο πίνακας διανυσμάτων στόχων εξόδου της εκπαίδευσης.

$[], []$: κενοί πίνακες που αντιστοιχούν στους πίνακες των διανυσμάτων επικύρωσης

και ελέγχου.

vv : ο πίνακας των διανυσμάτων επικύρωσης (μπορεί να καλείται και *val*).

tv : ο πίνακας των διανυσμάτων ελέγχου (μπορεί να καλείται και *test*).

Η δημιουργία ενός νευρωνικού δικτύου γίνεται με τη χρήση των εντολών που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα, μέσα από το παράθυρο του MATLAB Editor / Debugger. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία καλείται το αντίστοιχο αρχείο από το MATLAB Command Window και πραγματοποιείται η εκπαίδευση του δικτύου. Όταν ξεκινά η εκπαίδευση του δικτύου δίνονται αρχικές τιμές στους συντελεστές βαρύτητας και τα bias και όταν η εκπαίδευση ολοκληρωθεί καταλήγει στις τελικές τιμές. Αν για κάποιο λόγο χρειάζεται να δοθούν πάλι αρχικές τιμές αυτό μπορεί να γίνει με την εντολή:

net = init(net) που δίνει αρχικές τιμές στους συντελεστές βαρύτητας και τα bias με τον τρόπο που καθορίζεται από το πρόγραμμα.

Σε ένα εκπαιδευμένο δίκτυο μπορεί να παρουσιασθεί ένα οποιοδήποτε διάνυσμα εισόδου **f** και το δίκτυο να δώσει την έξοδο **Y** που αντιστοιχεί σε αυτό, με την εντολή :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{sim}(\mathbf{net}, \mathbf{f})$$

Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση ενός προβλήματος από το δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΣΩ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ

Η μοντελοποίηση των δυνάμεων κοπής είναι πάντα ένα από τα βασικά προβλήματα στην θεωρία κοπής των μετάλλων. Ο μεγάλος αριθμός αλληλένδετων παραμέτρων που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής (όπως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής, η φθορά των εργαλείων κοπής, η γωνία αποβλήτου κ.λ.π.) καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ανάπτυξη ενός κατάλληλου μοντέλου. Αν και ένα τεράστιο ποσό δεδομένων, σχετικών με τις δυνάμεις κοπής, είναι διαθέσιμο στα εγχειρίδια των κατεργασιών, τα περισσότερα από αυτά προσπαθούν να προσδιορίσουν τη σχέση μεταξύ μερικών από τις πιθανές παραμέτρους κοπής, καθορίζοντας ταυτόχρονα τις άλλες παραμέτρους. Ακόμη, οι απαραίτητοι μηχανισμοί για την εξαγωγή κατάλληλων μοντέλων από τα υπάρχοντα στοιχεία κατεργασίας, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμη όσο θα έπρεπε. Όπως θα δούμε παρακάτω γίνεται μια προσέγγιση για τη διαμόρφωση των δυνάμεων κοπής με τη βοήθεια των τεχνητών νευρικών δικτύων. Η κατάρτιση των δικτύων εκτελείται με τα πειραματικά στοιχεία της κατεργασίας. Το αναπτυγμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς προσομοίωσης καθώς και για να καθορίσει τις τιμές των δυνάμεων στα συστήματα ελέγχου σε συνθήκες κοπής.

Πολλές φορές, όπως είδαμε, χρησιμοποιούμε αναλυτικά μοντέλα για την μέτρηση, παραδείγματος χάρι, των τιμών των δυνάμεων κοπής. Οποιοδήποτε, όμως, αναλυτικό μοντέλο και να χρησιμοποιηθεί, μπορεί δύσκολα να αντιμετωπίσει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας κοπής. Επιπλέον, για την ανάπτυξη του μοντέλου, όπως είδαμε, απαιτούνται οι κατάλληλες μέθοδοι για την εξαγωγή των γενικών σχέσεων από τα υπάρχοντα στοιχεία κατεργασίας. Εξαιτίας των παραπάνω δυσκολιών που αντιμετωπίζουμε, στοχεύουμε στην ανάπτυξη μοντέλων σχετικών με τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής που βασίζονται όμως στην τεχνική των τεχνητών νευρικών δικτύων. Έτσι αντί της προσπάθειας να βρεθούν οι αναλυτικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων

της κατεργασίας με την χρήση των στατιστικών προσεγγίσεων, προτείνεται η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με την βοήθεια πειραματικών δεδομένων κατεργασιών.

4.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Στο σημείο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε κάποια συγκεκριμένης μορφής νευρωνικά δίκτυα για να μελετήσουμε, θεωρητικά, έννοιες όπως το σφάλμα εκπαίδευσης, ο αριθμός των νευρώνων στα πιθανά κρυμμένα επίπεδα, ο ρυθμός εκμάθησης, ο παράγοντας ορμής κ.λ.π. Η επίδραση των ακόλουθων δύο βασικών παραμέτρων κατάρτισης στη σύγκλιση του σφάλματος εκπαίδευσης ερευνάται επίσης, όπως θα δούμε παρακάτω : του ποσοστού εκμάθησης n , που ελέγχει την ταχύτητα της προσαρμογής των συντελεστών σύνδεσης μεταξύ των νευρώνων, αλλά και του παράγοντα ορμής α που λαμβάνει υπόψη το ποσοστό της τελευταίας αλλαγής των συντελεστών σύνδεσης.

4.2.1 Σφάλμα εκπαίδευσης

Η κατάρτιση των νευρωνικών δικτύων είναι επαναληπτική. Συνεχίζει κανονικά έως ότου επιτυγχάνεται ένα προκαθορισμένο σφάλμα εκπαίδευσης. Το μέσο σφάλμα εκπαίδευσης μπορεί να καθορισθεί από την παρακάτω σχέση :

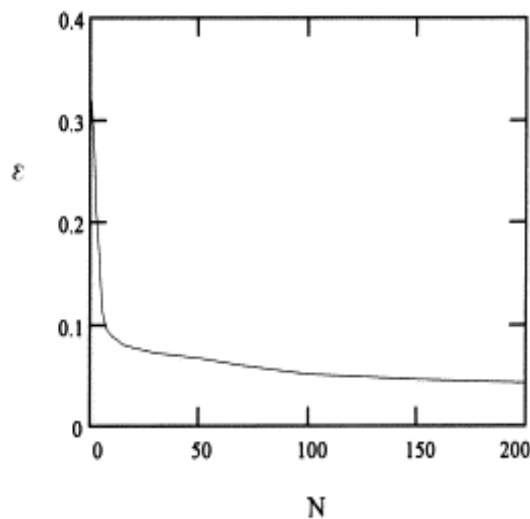
$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m |Y_d^{i,k} - Y_a^{i,k}|}{m}}{n} \quad (4-1)$$

όπου το n είναι ο αριθμός παραδειγμάτων εκπαίδευσης, το m ο αριθμός νευρώνων στο επίπεδο εξόδου (μπορεί για παράδειγμα να είναι τρία, αντιπροσωπεύοντας τις τρεις συνιστώσες δυνάμεις κοπής), και $Y_d^{i,k}$ και $Y_a^{i,k}$, είναι τα επιθυμητά και πραγματικά αποτελέσματα του νευρώνα εξόδου k στο παράδειγμα i στην συγκεκριμένη επανάληψη. Το μέσο σφάλμα είναι πολύ πιθανό, κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του δικτύου, να συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο οπότε στην περίπτωση αυτή η διαδικασία εκπαίδευσης πρέπει να θεωρηθεί ανεπιτυχής.

Για να καταλήξουμε σε κάποια συγκεκριμένα συμπεράσματα μπορούμε να θεωρήσουμε ένα δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης που περιέχει x νευρώνες στο επίπεδο εισόδου και y στο επίπεδο εξόδου. Ο αριθμός των νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο μπορεί να ποικίλει ανά περίπτωση. Ένα τέτοιο νευρωνικό δίκτυο μπορεί να εκπαιδευθεί με βάση ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων όπως η σκληρότητα του προς κατεργασία υλικού, η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, ο τύπος του προς κατεργασία υλικού, η γωνία αποβλήτου, η δύναμη κοπής, οι δυνάμεις άπωσης και πρόωσης κ.λ.π.

Το σχήμα 4.1 εμφανίζει το μέσο σφάλμα εκπαίδευσης ενός τέτοιου δικτύου, ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων N , με δεδομένο ότι το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται για $n = 0,5$ και $a = 0,5$. Φυσικά οι παράμετροι n και a μπορεί να πάρουν και άλλες τιμές. Μπορεί να φανεί στο σχήμα 4.1, ότι το ε συγκλίνει όχι στο μηδέν αλλά σε μια ιδιαίτερα χαμηλή τιμή (εδώ περίπου 0,034). Αυτό μπορεί να προκαλείται υπό την παρουσία μερικών αντικρουόμενων παραδειγμάτων στο σύνολο εκπαίδευσης.

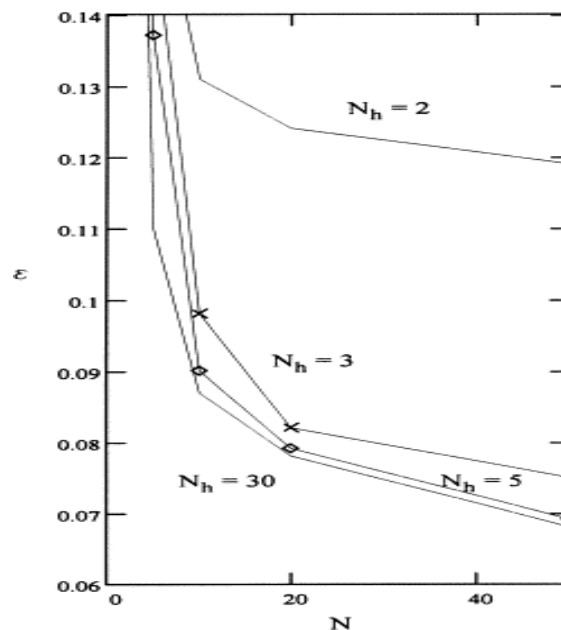
Αφότου εκπαιδευθεί το νευρωνικό δίκτυο μπορούν να εφαρμοσθούν σε αυτό ένα πλήθος από παραδείγματα που δεν συμμετείχαν στη διαδικασία κατάρτισης. Στην περίπτωση αυτή οι λύσεις των παραδειγμάτων (συνιστώσες δυνάμεις κοπής) δεν δίνονται, έτσι ώστε το δίκτυο να τις εκτιμήσει. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (4-1). Παρατηρείται συνήθως ότι το μέσο σφάλμα εκτίμησης είναι ελαφρώς υψηλότερο από το μέσο σφάλμα εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.1: Μεταβολή του μέσου σφάλματος εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων.[15]

4.2.2 Αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο

Ο αριθμός των νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου καθορίζεται από τον αριθμό των παραμέτρων εισόδου και εξόδου. Ο μόνος λόγος αλλαγής τους μπορεί να είναι η χρησιμοποίηση διαφορετικών σχεδίων κωδικοποίησης του προβλήματος. Αντίθετα, ο αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο είναι μια βασική παράμετρος της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Οφειλόμενη στην πλήρη αλληλοσύνδεση που υπάρχει μεταξύ των νευρώνων, η αύξηση στον αριθμό νευρώνων οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας του δικτύου και στη μείωση της ταχύτητας εκπαίδευσης. Από την άλλη, δίκτυα με περισσότερους νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο μπορούν να λύσουν πιο σύνθετα προβλήματα.



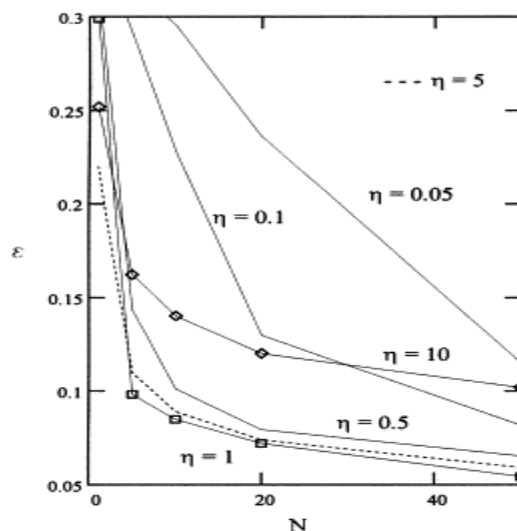
Σχήμα 4.2 : Μεταβολή του σφάλματος εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων εκπαίδευσης, για διάφορους αριθμούς νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο. [15]

Το σχήμα 4.2 εμφανίζει τη σχέση μεταξύ του μέσου σφάλματος εκπαίδευσης ϵ και του αριθμού των επαναλήψεων εκπαίδευσης N , για διάφορους αριθμούς κρυμμένων νευρώνων N_h (2, 3, 5 και 30). Φαίνεται στο σχήμα ότι με την αύξηση του N_h , το σφάλμα

εκπαίδευσης συγκλίνει γρηγορότερα και σε μια μικρότερη τιμή στην αρχή της διαδικασίας κατάρτισης. Εντούτοις, αυτή η επίδραση είναι ελάχιστη όταν $N_h \geq 8$. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένο σύνολο εκπαίδευσης μπορεί να επιλεγθεί οριακά $N_h=8$. Φυσικά ο αριθμός $N_h=8$ είναι ενδεικτικός και μπορεί μεταβάλλεται ανάλογα με την μορφή του δικτύου.

4.2.3 Ρυθμός εκμάθησης

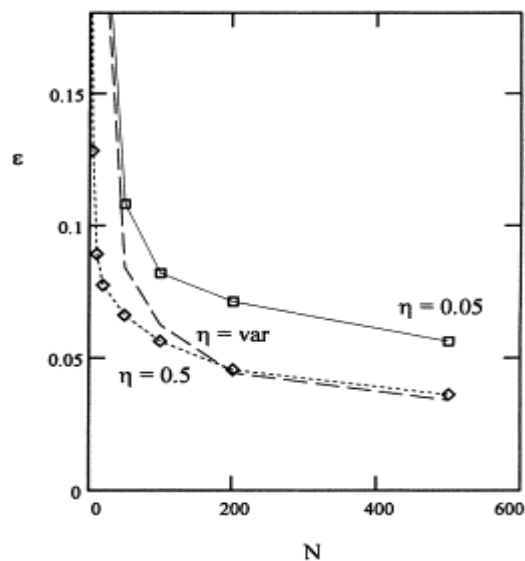
Ο ρυθμός εκμάθησης η έχει επιπτώσεις πρώτιστα στην ταχύτητα της εκπαίδευσης. Εάν η κατάρτιση ενός νευρωνικού δικτύου απαιτείται μόνο μία φορά, η ταχύτητα εκπαίδευσης δεν είναι τόσο σημαντική. Εντούτοις, η μελλοντική επέκταση του μοντέλου με τα νέα στοιχεία κατεργασίας απαιτεί την περιοδική επανεκπαίδευση του δικτύου. Βασικά, όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός εκμάθησης, τόσο γρηγορότερη είναι η κατάρτιση. Παρόλα αυτά, σε πολύ υψηλά ποσοστά εκμάθησης, το δίκτυο μπορεί να συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο στο διάστημα σφάλματος. Ο καθορισμός της επίδρασης του ποσοστού εκμάθησης στη σύγκλιση σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί με την βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου που εκπαιδεύεται με σταθερό παράγοντα ορμής ($\alpha = 0,5$), αλλά σε διάφορους ρυθμούς εκμάθησης η (0,05, 0,1, 0,5, 1, 5 και 10).



Σχήμα 4.3 : Μεταβολή του σφάλματος εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων εκπαίδευσης, για διάφορους ρυθμούς εκμάθησης. [15]

Στο σχήμα 4.3 εμφανίζεται η επίδραση του ρυθμού εκμάθησης στο μέσο σφάλμα εκπαίδευσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, εάν $n \leq 1$, με την αύξηση του n το μέσο σφάλμα συγκλίνει γρηγορότερα και σε μια μικρότερη τιμή. Εντούτοις, με την περαιτέρω αύξηση του n (επάνω από 1), η σύγκλιση του σφάλματος γίνεται πιο αργή και σε μια υψηλότερη τιμή. Τελικά, για μια τιμή του n (εδώ $n = 14$), εμφανίζεται ταλάντωση του μέσου σφάλματος, και σύγκλιση σε μια πολύ υψηλή τιμή (εδώ κοντά στο 0,63). Δεδομένου ότι για $n \leq 1$ δεν εμφανίζεται ταλάντωση, ένα n μέχρι και 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω εκπαίδευση. Τα συμπεράσματα που βγάζουμε εδώ είναι γενικά και έχουν εφαρμογή για διάφορες μορφές νευρωνικών δικτύων.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα τοπικά ελάχιστα κατά την χρησιμοποίηση των συνόλων κατάρτισης που περιέχουν αντικρουόμενα παραδείγματα (όπου, για παράδειγμα, στον ίδιο συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων εισόδου, οι τιμές των παραμέτρων εξόδου είναι σημαντικά διαφορετικές), ο ρυθμός εκμάθησης μπορεί να είναι μεταβαλλόμενος αντί για σταθερός. Δεδομένου ότι η πιθανότητα της εύρεσης των τοπικών ελαχίστων είναι υψηλότερη στην αρχή της διαδικασίας κατάρτισης, θα ήταν κατάλληλο να αρχίσει η κατάρτιση με μια χαμηλή τιμή του n και να αυξηθεί βαθμιαία. Αυτό θα βοηθούσε στο να αποφύγουμε τις μακριές επαναλήψεις στο τέλος της διαδικασίας εκπαίδευσης.

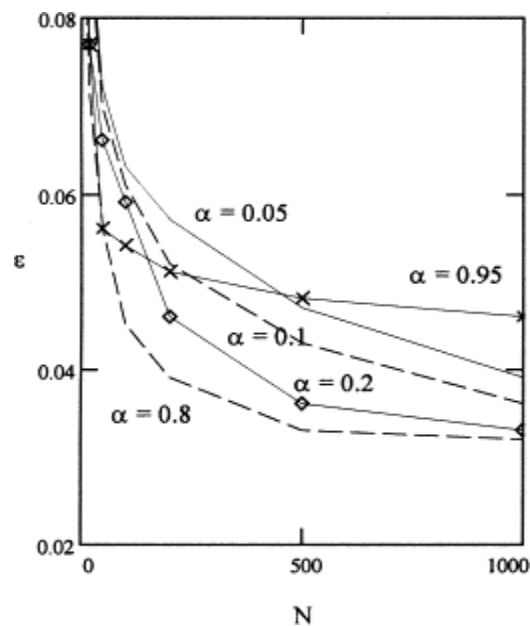


Σχήμα 4.4 : Μέσο σφάλμα εκπαίδευσης με σταθερούς και μεταβαλλόμενους ρυθμούς εκμάθησης. [15]

Το σχήμα 4.4 εμφανίζει το μέσο σφάλμα εκπαίδευσης ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων, για σταθερούς (0,05 και 0.5) και μεταβαλλόμενους ρυθμούς εκμάθησης. Στο σχήμα αυτό μπορεί να φανεί ακόμη ότι με μεταβαλλόμενο ρυθμό εκμάθησης, στην αρχή της διαδικασίας κατάρτισης η ταχύτητα σύγκλισης σφάλματος είναι χαμηλότερη από ότι με ένα σταθερό ρυθμό εκμάθησης $n = 0,5$. Εν τούτοις, με τη βαθμιαία αύξηση του ρυθμού εκμάθησης, το μέσο σφάλμα συγκλίνει στην ίδια τιμή, κατά τη διάρκεια του ίδιου αριθμού επαναλήψεων, τόσο με τον μεταβαλλόμενο όσο και με το σταθερό ($n = 0.5$) ρυθμό εκμάθησης.

4.2.4 Παράγοντας ορμής

Ο παράγοντας ορμής βοηθά στην σχετικά γρήγορη εκμάθηση, λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές που γίνονται στους συντελεστές σύνδεσης κατά τη διάρκεια της τελευταίας επανάληψης. Για τον καθορισμό της βέλτιστης τιμής του παράγοντα ορμής, μπορούμε να εκπαιδεύσουμε ένα νευρωνικό δίκτυο σε διάφορες τιμές του παράγοντα ορμής (π.χ. για $n = 0,5$ και $N_h = 7$).



Σχήμα 4.5 : Μεταβολή του σφάλματος εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων εκπαίδευσης, για διάφορες τιμές του παράγοντα ορμής.

Το σχήμα 4.5 αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του μέσου σφάλματος εκπαίδευσης και του αριθμού των επαναλήψεων, για διάφορες τιμές του παράγοντα ορμής α . Μπορεί να φανεί στο σχήμα ότι οι υψηλότερες τιμές του α , έχουν ως αποτέλεσμα γρηγορότερη εκπαίδευση και σύγκλιση σε χαμηλότερα σφάλματα εκπαίδευσης. Μόνο όταν το α είναι κοντά στο 1, το σφάλμα εκπαίδευσης συγκλίνει σε μια υψηλότερη τιμή. Η ταλάντωση του σφάλματος εκπαίδευσης δεν εμφανίζεται ακόμα και μετά από την προσθήκη μερικών αντικρουόμενων παραδειγμάτων. Έτσι μπορούμε να επιλέξουμε ένα α μεταξύ των τιμών 0.5-0.8 για τη βέλτιστη σύγκλιση.

4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΔΙΚΤΥΟ LEVENBERG - MARQUARDT (L-M)

Στην κοπή των μετάλλων μια στενή λουρίδα του μετάλλου αφαιρείται από την επιφάνεια του προς κατεργασία κομματιού, χρησιμοποιώντας ένα ακονισμένο και κατάλληλα διαμορφωμένο εργαλείο κοπής. Η γεωμετρική μορφή της επεξεργασμένης στη μηχανή επιφάνειας εξαρτάται κυρίως από τη μορφή του εργαλείου. Για την μοντελοποίηση και την ανάλυση της κοπής των μετάλλων καθώς και του σχηματισμού αποβλήτου έχουν γίνει πολλές προσπάθειες τις τελευταίες δεκαετίες. Στην κοπή των μετάλλων υπάρχει μια πολύ σύνθετη σχέση μεταξύ των διάφορων παραμέτρων διαδικασίας (όπως ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής και γεωμετρία εργαλείων) και των δυνάμεων κοπής. Οι παραπάνω είναι σημαντικοί παράγοντες, των οποίων η επιλογή συμβάλλει στο επεξεργασμένο στη μηχανή προϊόν, δεδομένου ότι όλοι επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής, την ισχύ και τον ρυθμό αφαίρεσης μετάλλων, σε μεγάλο βαθμό. Παρακάτω θα αναφερθούμε αναλυτικά στον τρόπο που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής τόσο η γεωμετρία του εργαλείου αλλά και η ταχύτητα, η τροφοδοσία και το βάθος κοπής, αναπτύσσοντας μάλιστα και το κατάλληλο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για να επιτύχουμε τον σκοπό μας.

Η παραδοσιακή μέθοδος αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης αυτών των παραμέτρων και της επίδρασής τους στις δυνάμεις κοπής, είναι με την βοήθεια μιας εμπειρικής σχέσης όπως ο πρώτος νόμος των δυνάμεων κοπής, ο δεύτερος νόμος των δυνάμεων κοπής, ο εμπειρικός νόμος του Granovsky κ.λ.π [14]. Σε αυτές τις σχέσεις, οι παράμετροι έχουν μερικούς σταθερούς εκθέτες, των οποίων η τιμή επιλέγεται ή

υπολογίζεται βάσει της εμπειρίας. Αυτή η επιλογή των εκθετών εισάγει πολλή υποκειμενικότητα. Είναι δύσκολο να συσχετισθεί η επιλογή αυτών των εκθετών με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες κοπής. Ο στόχος είναι να αναπτυχθούν τα μοντέλα ANN ώστε να μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της επιρροής της ταχύτητας, της πρόωσης, του βάθους κοπής και της γεωμετρίας του εργαλείου στις δυνάμεις κοπής, με τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων του Bhattacharyya και των Nagaraju et al.

4.3.1 Πειραματικά δεδομένα

Οι Nagaraju et Al πραγματοποίησαν αρκετές σειρές πειραμάτων για να μετρήσουν τις πραγματικές δυνάμεις κοπής σε διάφορες συνθήκες, ώστε να αξιολογήσουν τελικά την επιρροή της ταχύτητας, της πρόωσης και του βάθους κοπής στο δύο διαστάσεων σύστημα δυνάμεων κοπής σε μια διαδικασία κοπής μετάλλου. Προσπάθησαν επίσης να αναπτύξουν ένα μοντέλο ANN για τις δυνάμεις κοπής, που να βασίζεται στην χρησιμοποίηση ενός απλού αλγορίθμου οπισθόδρομης τροφοδότησης. Εντούτοις, οι τιμές που προέβλεψε το μοντέλο αυτό απείχαν αρκετά από τις πραγματικές τιμές που είχαν μετρηθεί κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Αντιθέτως οι τιμές που προβλέπει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που βασίζεται στον κανόνα εκμάθησης L-M, προσεγγίζουν κατά πολύ τις πραγματικές τιμές που προέκυψαν βάση των πειραμάτων. Παρακάτω αναλύουμε εκτενέστερα το δίκτυο L-M το οποίο επιλέγουμε τελικά και το οποίο μας βοηθά στον υπολογισμό των δυνάμεων της κοπής. Για την δημιουργία του δικτύου που παραθέτουμε πιο κάτω χρησιμοποιήσαμε ορισμένα από τα πειραματικά δεδομένα των Nagaraju et Al.

Στον πίνακα 4-1 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα που χρησίμευσαν για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου που προτείνουμε. Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε επικυρώνεται παρακάτω με τη σύγκριση των τιμών που προβλέπονται από τα μοντέλα με εκείνες που παρατηρούνται στα πραγματικά πειράματα. Τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης παρουσιάζονται και δείχνουν ότι τα μοντέλα ANN είναι σε θέση να προβλέψουν τις πραγματικές δυνάμεις κοπής με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, γεγονός που καθιερώνει έτσι τη δυνατότητα πραγματοποίησης και την αποτελεσματικότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

	Ταχύτητα	Πρόωση	Βάθος κοπής	Πειραματικές τιμές των δυνάμεων κοπής	
	v (m/min)	f (mm)	DOC (mm)	F _c (N)	F _t (ή F _f) (N)
1	29	0.212	1.0	457.1	361.9
2	22	0.107	1.0	276.2	209.5
3	17	0.107	1.0	238.1	142.8
4	13	0.212	1.0	333.3	285.7
5	29	0.212	1.2	571.4	428.5
6	22	0.212	1.2	457.4	342.9
7	17	0.212	1.2	476.2	380.9
8	13	0.107	1.2	323.8	280.9
9	29	0.212	1.5	523.8	428.6
10	22	0.212	1.5	619.1	523.8
11	17	0.212	1.5	523.8	428.5
12	13	0.212	1.5	428.5	333.3

Πίνακας 4-1 : Πειραματικά δεδομένα δυνάμεων κοπής για δεδομένη ταχύτητα, πρόωση και βάθος κοπής.

Όπως βλέπουμε στον πίνακα 4-1, τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούμε αποτελούνται από 12 γραμμές, σε κάθε μια από τις οποίες εμφανίζονται οι τιμές των τριών μεταβλητών εισόδου (ταχύτητας, πρόωσης, βάθους κοπής) και οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών εξόδου (δυνάμεις κοπής) που έχουν προκύψει ύστερα από μετρήσεις. Ο αριθμός των δεδομένων αυτών μπορεί να μην φαίνεται αρχικά αρκετά μεγάλος, όμως, παρακάτω θα δούμε πως η σωστή επιλογή και χρησιμοποίησή τους θα μας βοηθήσει να φθάσουμε στην κατασκευή ενός ακριβούς νευρωνικού δικτύου χαμηλών σφαλμάτων και ικανοποιητικής εκτίμησης των δυνάμεων.

Στην προσπάθεια μας να δημιουργήσουμε το, κατά το δυνατό, αρτιότερο νευρωνικό δίκτυο οδηγηθήκαμε σε ένα μεγάλο πλήθος δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές αφορούσαν τον τρόπο κατά τον οποίο θα χρησιμοποιούσαμε τα πειραματικά δεδομένα έτσι ώστε να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Αρχικά προσπαθήσαμε να χρησιμοποιήσουμε όλα τα παραπάνω δεδομένα συμπεριλαμβάνοντας όλες τις παραπάνω τιμές είτε στην ομάδα εκπαίδευσης, είτε στην ομάδα επικύρωσης, είτε στην ομάδα ελέγχου. Έτσι λάβανε χώρα δοκιμές σε δίκτυο στο οποίο τοποθετήσαμε 7 γραμμές ως ομάδα εκπαίδευσης, 3 γραμμές ως ομάδα επικύρωσης, 2 γραμμές ως ομάδα ελέγχου (7/3/2) ή ανάλογα σε δίκτυα με κατανομή γραμμών 6/3/3, 6/4/2, 5/4/3, κ.λ.π. Κατά τις δοκιμές όμως αυτών των δικτύων

και παρά το γεγονός ότι συχνά εναλλάσσαμε τις τιμές των ομάδων εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου, παρατηρήσαμε ότι το σφάλμα εκπαίδευσης δεν μειωνόταν πέρα από μια ελάχιστη τιμή στην οποία συνέκλινε. Έτσι θεωρήσαμε σκόπιμο να αφαιρέσουμε από τα πειραματικά μας δεδομένα δύο γραμμές που λόγω των ακραίων τιμών που εμπειρεύσαν, οδηγούσαν προφανώς το δίκτυο στο τοπικό αυτό ελάχιστο. Πράγματι με την αφαίρεση των γραμμών 3 και 10 από τις ομάδες εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου το δίκτυο απέκτησε την απαιτούμενη σταθερότητα και έφθασε έτσι σε χαμηλότερα σφάλματα και κατά συνέπεια σε ακριβέστερες εκτιμήσεις.

Ως εκ τούτου, προσπαθήσαμε με τις υπόλοιπες πειραματικές τιμές να καταλήξουμε σε ένα όσο το δυνατόν πιο ακριβές δίκτυο. Κάνοντας δοκιμές και προσπαθώντας να μην έχουμε στην ίδια ομάδα (εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου) τιμές που είναι ακραίες ή αμοιβαία αντικρουόμενες, καταλήξαμε στο ότι το δίκτυο μας θα αποτελείται από 4 γραμμές δεδομένων στην ομάδα εκπαίδευσης, 4 γραμμές δεδομένων στην ομάδα επικύρωσης και 2 γραμμές δεδομένων στην ομάδα ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα την ομάδα εκπαίδευσης αποτελούν οι γραμμές 8,2,4 και 5, την ομάδα επικύρωσης οι γραμμές 6,7,1 και 12, και τέλος την ομάδα ελέγχου οι γραμμές 9 και 11 (πίνακας 4-1). Οι γραμμές 3 και 10 θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω για την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις εκτιμήσεις του δικτύου.

4.3.2 Αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων

Όπως είναι φυσικό δεδομένου ότι έχουμε τρεις μεταβλητές εισόδου θα έχουμε τρεις νευρώνες στο επίπεδο εισόδου. Αντίστοιχα αφού έχουμε δύο μεταβλητές εξόδου θα έχουμε και δύο νευρώνες στο επίπεδο εξόδου. Το ερώτημα που τίθεται εδώ είναι το πόσα κρυμμένα επίπεδα θα έχουμε και πόσους νευρώνες θα περιέχει το κάθε ένα από αυτά. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο, δίκτυα με περισσότερους νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο μπορούν να λύσουν πιο σύνθετα προβλήματα. Από την άλλη, όμως, η συνεχής αύξηση στον αριθμό νευρώνων οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας του δικτύου και στη μείωση της ταχύτητας εκπαίδευσης. Έτσι χρειάζεται να επιλέξουμε έναν τέτοιο αριθμό νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων που να

οδηγούν στην μείωση του σφάλματος και όχι να δυσκολεύουν την επίτευξη των στόχων μας.

Πράγματι, με δεδομένες τις ομάδες εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου, όπως αναφέραμε παραπάνω, κάναμε ένα πλήθος δοκιμών για να προσδιορίσουμε τον ιδανικό αριθμό των κρυμμένων επιπέδων αλλά και των νευρώνων που θα υπάρχουν σε αυτά. Σε πρώτη φάση πειραματιστήκαμε δοκιμάζοντας την λύση ενός, δύο ή και τριών κρυμμένων επιπέδων. Συγκεκριμένα δοκιμάσαμε τις παρακάτω αλλά και πολλές άλλες μορφές δικτύων (στην παρένθεση αναφέρονται τα κρυμμένα επίπεδα και ο αριθμός των νευρώνων σε αυτά). Αρχικά δοκιμάσαμε την λύση ενός κρυμμένου επιπέδου : Δίκτυα (4,2), (5,2), (6,2), (7,2), (8,2), (9,2), (10,2), (11,2), (12,2), (13,2). Στην συνέχεια δοκιμάσαμε την λύση των δύο κρυμμένων επιπέδων : Δίκτυα (6,5,2), (6,6,2), (7,6,2), (7,7,2), (8,7,2), (8,8,2), (9,8,2), (9,9,2), (10,9,2) αλλά και άλλους συνδυασμούς αυτών. Τέλος δοκιμάσαμε την περίπτωση τριών κρυμμένων επιπέδων : Δίκτυα (7,6,5,2), (8,7,6,2), (9,8,7,2), (9,8,8,2), (10,9,8,2), (10,9,9,2), (11,10,9,2) και αρκετούς άλλους συνδυασμούς των παραπάνω, αλλά και ακόμη πιο σύνθετα δίκτυα όπως (20,15,10,2), (25,25,10,2), (25,20,15,2). Εδώ πρέπει να παρατηρήσουμε πως στις παραπάνω παρενθέσεις ο τελευταίος αριθμός αναφέρεται πάντα στους νευρώνες του επιπέδου εξόδου (που είναι πάντα 2). Ανά περίπτωση, ο πρώτος αριθμός αναφέρεται στους νευρώνες του πρώτου κρυμμένου επιπέδου, ο δεύτερος στους νευρώνες του δεύτερου κρυμμένου επιπέδου, ο τρίτος στους νευρώνες του τρίτου κρυμμένου επιπέδου κ.λ.π.. Ο αριθμός των νευρώνων του επιπέδου εισόδου δεν αναφέρεται καθόλου στον συμβολισμό αυτό όπως έχουμε πει σε προηγούμενη παράγραφο (εδώ θεωρείται ότι είναι πάντα 3).

Δεδομένου ότι φυσικά δεν είναι δυνατόν να παραθέσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο μεγάλο πλήθος αυτό των δοκιμών, μπορούμε να επισημάνουμε απλά πως αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων και του αριθμού των κρυμμένων επιπέδων είχαμε μια αρκετά καλή σύγκλιση του σφάλματος σε χαμηλότερες τιμές, όμως ταυτόχρονα υπήρξε και μια αστάθεια του δικτύου. Δηλαδή οι τιμές του σφάλματος δεν ήταν σταθερά χαμηλές, αλλά υπήρχαν μεγάλες διακυμάνσεις στην απόκριση του δικτύου. Ως εκ τούτου, και δεδομένου ότι το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε δεν έχει πολλές μεταβλητές εισόδου και εξόδου ώστε να θεωρείται πολυσύνθετο, επιλέξαμε να έχουμε ένα μόλις κρυμμένο επίπεδο που θα μας δίνει

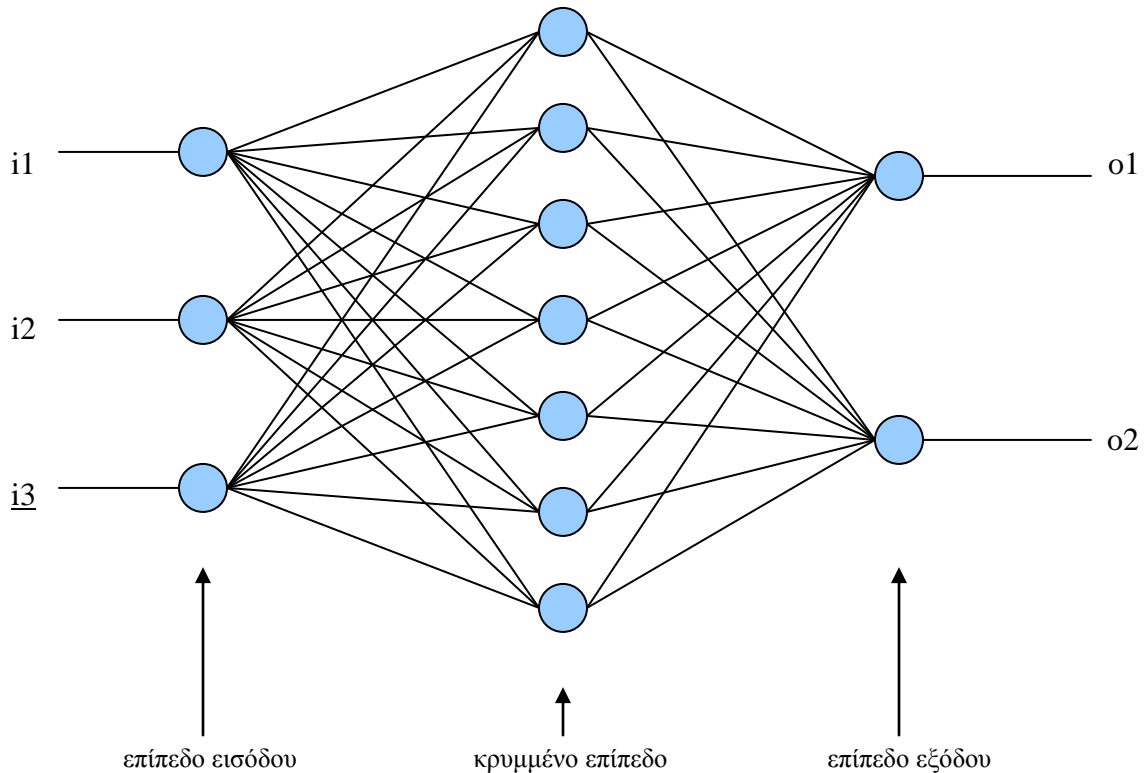
σταθερά χαμηλές τιμές σφάλματος και θα μειώνει ταυτόχρονα κατά πολύ την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Όσον αφορά τώρα τον αριθμό των νευρώνων που θα είχαμε στο κρυμμένο αυτό επίπεδο, τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέξαμε τον αριθμό αυτό ήταν δύο : α) η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) που προέκυπτε κάθε φορά που τρέχαμε το πρόγραμμα, για διαφορετικούς αριθμούς νευρώνων, και β) η απόκλιση των πραγματικών πειραματικών δεδομένων του πίνακα 4-1 από τις τιμές των μεταβλητών εξόδου που προέβλεπε το δίκτυο κάθε φορά που εισάγαμε ένα διάνυσμα εισόδου.

Έτσι χρησιμοποιώντας το πρώτο από τα παραπάνω κριτήρια, ύστερα από δοκιμές για διαφορετικούς αριθμούς νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο, καταλήξαμε στο ότι δίκτυα με αριθμούς νευρώνων από 6 έως και 12 έδιναν καλές τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκπαίδευσης (με καλύτερα τα δίκτυα με αριθμούς νευρώνων 7, 9 και 10 στο κρυμμένο επίπεδο). Ταυτόχρονα εισάγοντας κάποια διανύσματα εισόδου και συγκρίνοντας τις εκτιμώμενες από το δίκτυο τιμές με τις πραγματικές (πίνακας 4-1), προσπαθήσαμε να ικανοποιήσουμε και το δεύτερο κριτήριο που προαναφέραμε. Έτσι καταλήξαμε τελικώς σε δίκτυο ενός κρυμμένου επιπέδου με 7 νευρώνες στο επίπεδο αυτό. Το δίκτυο αυτό μας δίνει ικανοποιητικής τάξης μεγέθους μέσο τετραγωνικό σφάλμα και ταυτόχρονα μικρές αποκλίσεις των υπολογισμένων τιμών των μεταβλητών εξόδου (δυνάμεις κοπής) από τις πραγματικές.

4.3.3 Αρχιτεκτονική τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.6, καταλήξαμε σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται συνολικά από τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο (επίπεδο εισόδου) αποτελείται από 3 νευρώνες, το κρυμμένο επίπεδο αποτελείται από 7 νευρώνες, ενώ το επίπεδο εξόδου αποτελείται από 2 νευρώνες. Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, οι τρεις νευρώνες του επιπέδου εισόδου αντιστοιχούν στις τρεις παραμέτρους εισόδου (ταχύτητα, πρόωση και βάθος κοπής), ενώ οι δύο νευρώνες του επιπέδου εξόδου αντιστοιχούν στις δύο παραμέτρους εξόδου (δύναμη κοπής και δύναμη πρόωσης).

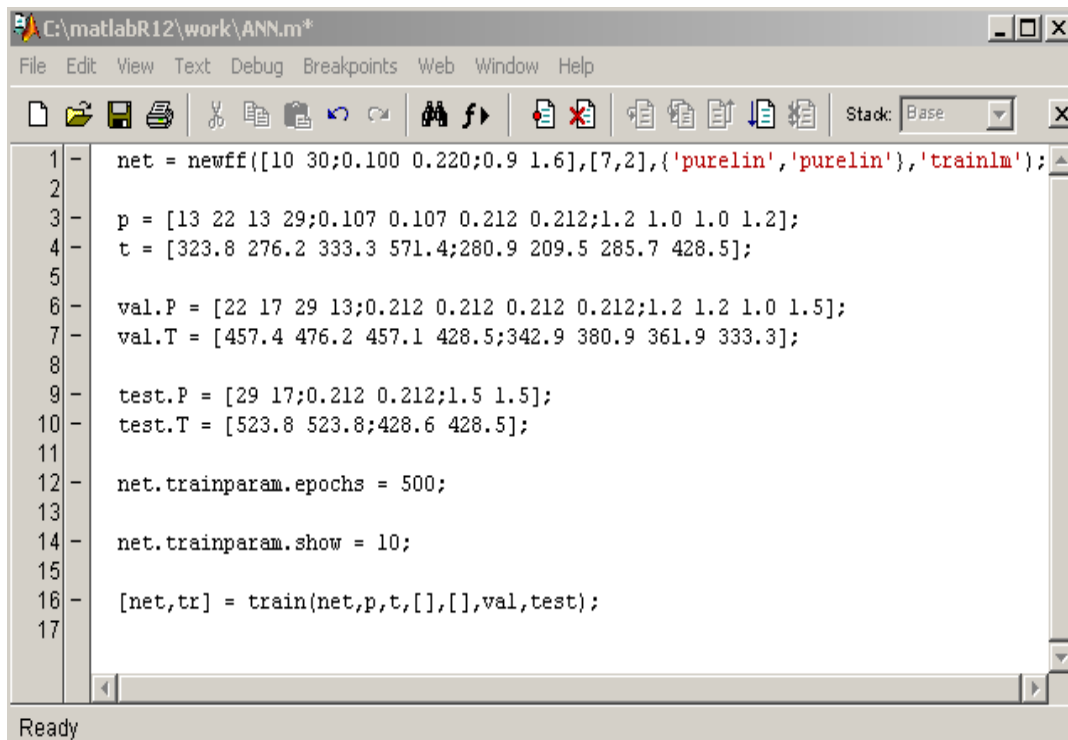


Σχήμα 4.6 : Αρχιτεκτονική του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου.

4.3.4 Δομή του προγράμματος

Παραπάνω αναφερθήκαμε εκτενέστατα στον τρόπο με τον οποίο καταλήξαμε στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική του δικτύου μας. Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε το πρόγραμμα με το οποίο έγινε η εκπαίδευση του δικτύου καθώς και τις διάφορες παραμέτρους αυτού. Στο σχήμα 4.7 φαίνεται η δομή του προγράμματος αναλυτικά. Πιο συγκεκριμένα :

- Στην γραμμή 1 παρουσιάζεται η εντολή `[net=newff]` με την οποία δημιουργείται ένα νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης. Στην εντολή αυτή εμπεριέχονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές εισόδου, ο αριθμός των νευρώνων που περιέχονται αντίστοιχα στο κάθε επίπεδο (και εδώ δεν λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο εισόδου), οι συναρτήσεις ενεργοποίησης σε



```
C:\matlabR12\work\ANN.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base
1 net = newff([10 30;0.100 0.220;0.9 1.6],[7,2],{'purelin','purelin','trainlm'};
2
3 p = [13 22 13 29;0.107 0.107 0.212 0.212;1.2 1.0 1.0 1.2];
4 t = [323.8 276.2 333.3 571.4;280.9 209.5 285.7 428.5];
5
6 val.P = [22 17 29 13;0.212 0.212 0.212 0.212;1.2 1.2 1.0 1.5];
7 val.T = [457.4 476.2 457.1 428.5;342.9 380.9 361.9 333.3];
8
9 test.P = [29 17;0.212 0.212;1.5 1.5];
10 test.T = [523.8 523.8;428.6 428.5];
11
12 net.trainparam.epochs = 500;
13
14 net.trainparam.show = 10;
15
16 [net,tr] = train(net,p,t,[],[],val,test);
17
Ready
```

Σχήμα 4.7 : Η τελική μορφή του προγράμματος για την κατασκευή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

- κάθε ένα από τα επίπεδα αυτά (κατόπιν δοκιμών βρέθηκε πως η γραμμική συνάρτηση είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το σφάλμα μας), και τέλος ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που όπως είπαμε είναι ο L-M.
- Στην γραμμή 3 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα εισόδου της ομάδας εκπαίδευσης.
 - Στην γραμμή 4 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα στόχων εξόδου της ομάδας εκπαίδευσης.
 - Στην γραμμή 6 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα εισόδου της ομάδας επικύρωσης.
 - Στην γραμμή 7 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα στόχων εξόδου της ομάδας επικύρωσης.

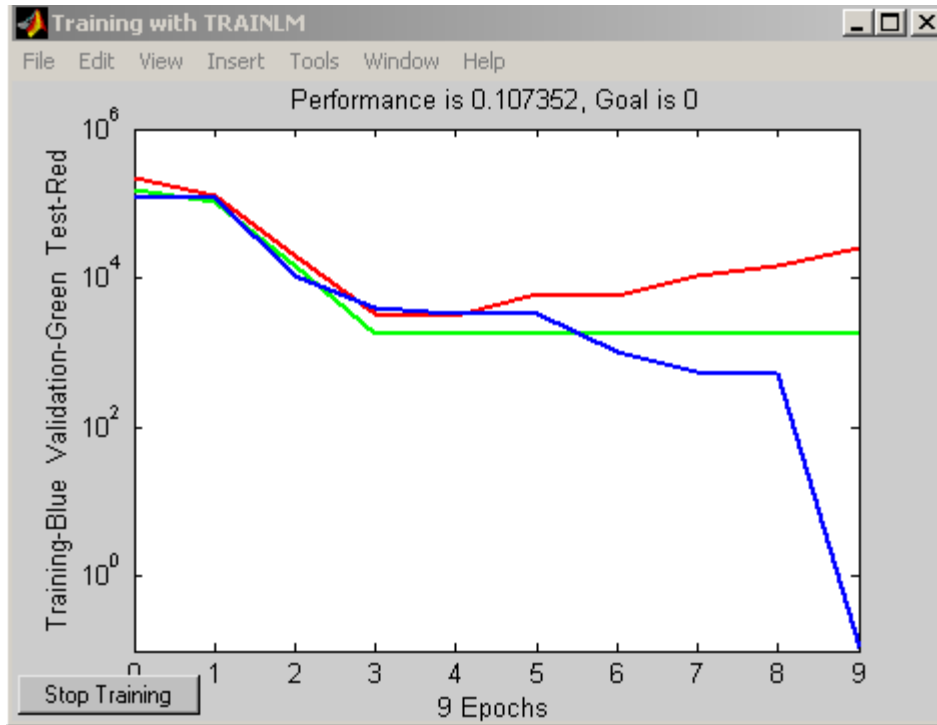
- Στην γραμμή 9 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα εισόδου της ομάδας ελέγχου.
- Στην γραμμή 10 εισάγονται με την μορφή πίνακα τα διανύσματα στόχων εξόδου της ομάδας ελέγχου.
- Στην γραμμή 12 ορίζεται ο μέγιστος αριθμός εποχών που μπορεί να διαρκέσει η εκπαίδευση.
- Στην γραμμή 14 ορίζεται ο αριθμός των εποχών, ανά τον οποίο θα παρουσιάζεται η εξέλιξη του δικτύου.
- Τέλος στην γραμμή 16 δίνεται η εντολή [net,tr] η οποία επιστρέφει το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο και τον πίνακα tr, ο οποίος περιέχει την τιμή της συνάρτησης σφάλματος για κάθε μια από τις τρεις ομάδες διανυσμάτων σε κάθε εποχή.

Περαιτέρω ανάλυση όσον αφορά την δομή του προγράμματος δεν κρίνεται σκόπιμη, δεδομένου ότι ήδη έχουμε αναφερθεί εκτενέστατα σε προηγούμενη ενότητα στις εντολές με τις οποίες κατασκευάζουμε ένα νευρωνικό δίκτυο. Απλά παραθέτουμε το πρόγραμμα στην τελική του μορφή (σχ.4.7).

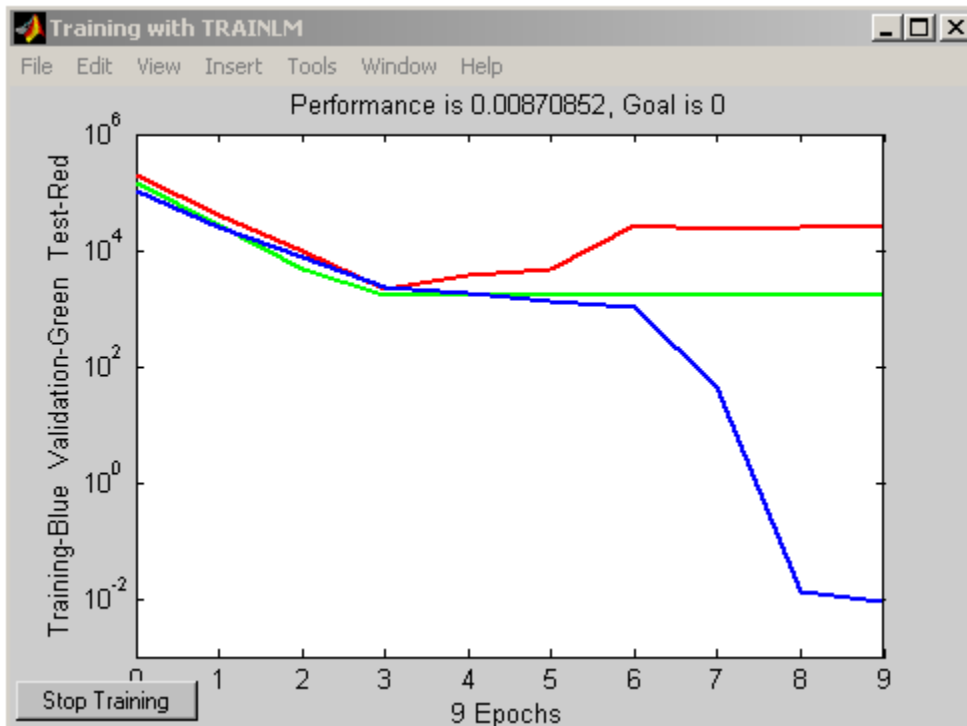
4.3.5 Σφάλμα εκπαίδευσης

Όπως είδαμε και προηγουμένως ο βασικός μας στόχος κατά την δημιουργία του νευρωνικού δικτύου ήταν η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκπαίδευσης (mean squared error – MSE). Με την τελική μορφή του νευρωνικού μας δικτύου το σφάλμα αυτό έφθασε αρκετά χαμηλές τιμές της τάξεως του 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} κ.λ.π. Κάθε φορά που τρέχαμε το πρόγραμμα φυσικά το σφάλμα αυτό μεταβαλλόταν. Έτσι παρακάτω παραθέτουμε τα σφάλματα (MSE) που προέκυψαν κατά την εκτέλεση ορισμένων επαναλήψεων του προγράμματος και βρίσκουμε ταυτόχρονα και μια μέση τιμή αυτών, έτσι ώστε να έχουμε μια εποπτική εικόνα για το που περίπου κυμαίνεται το σφάλμα μας. Επειδή δεν κρίνεται σκόπιμη η παράθεση ενός μεγάλου πλήθους επαναλήψεων, μιας και θα καταλάμβανε πολύ χώρο, θα παρουσιάσουμε ένα δείγμα από 6 επαναλήψεις που εκτελέστηκαν, με βάση τις οποίες θα προκύψει και η μέση τιμή του σφάλματος (MSE).

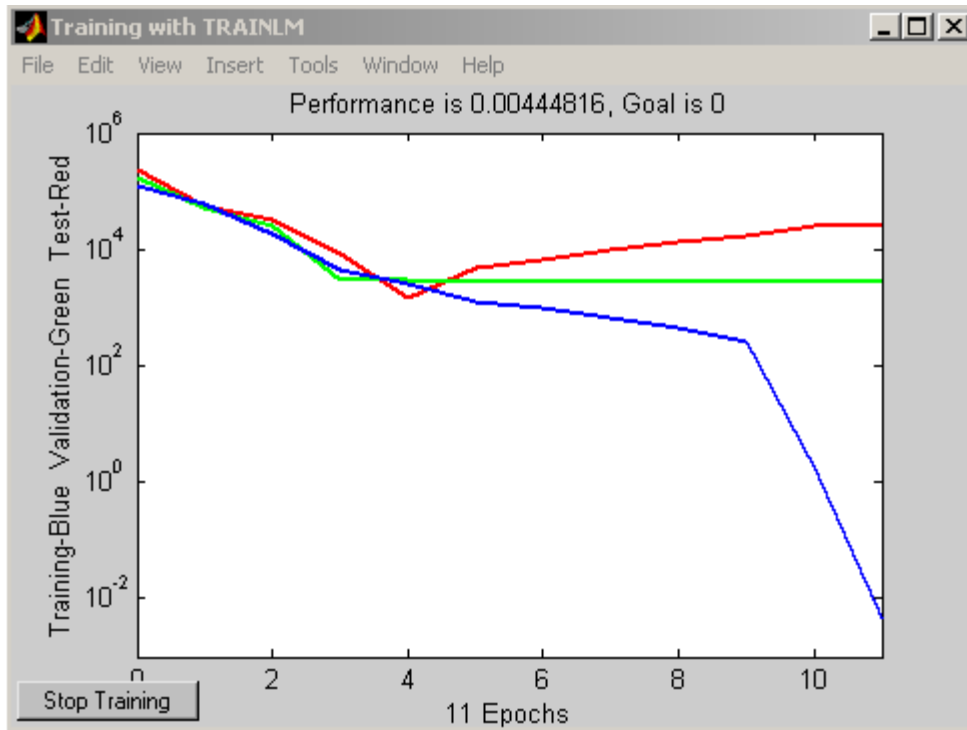
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 1



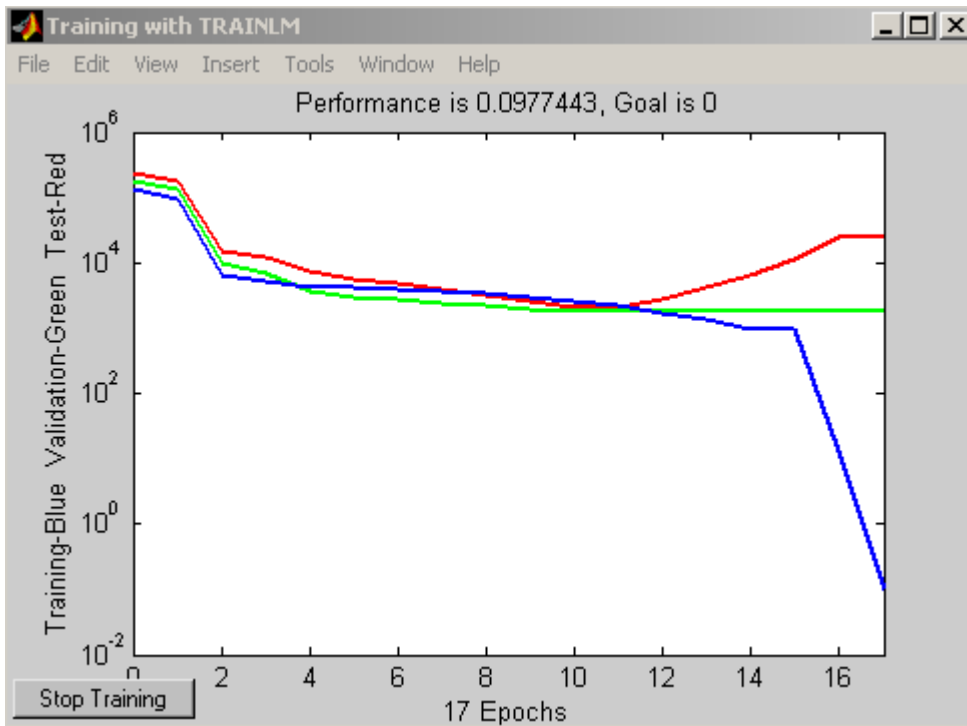
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 2



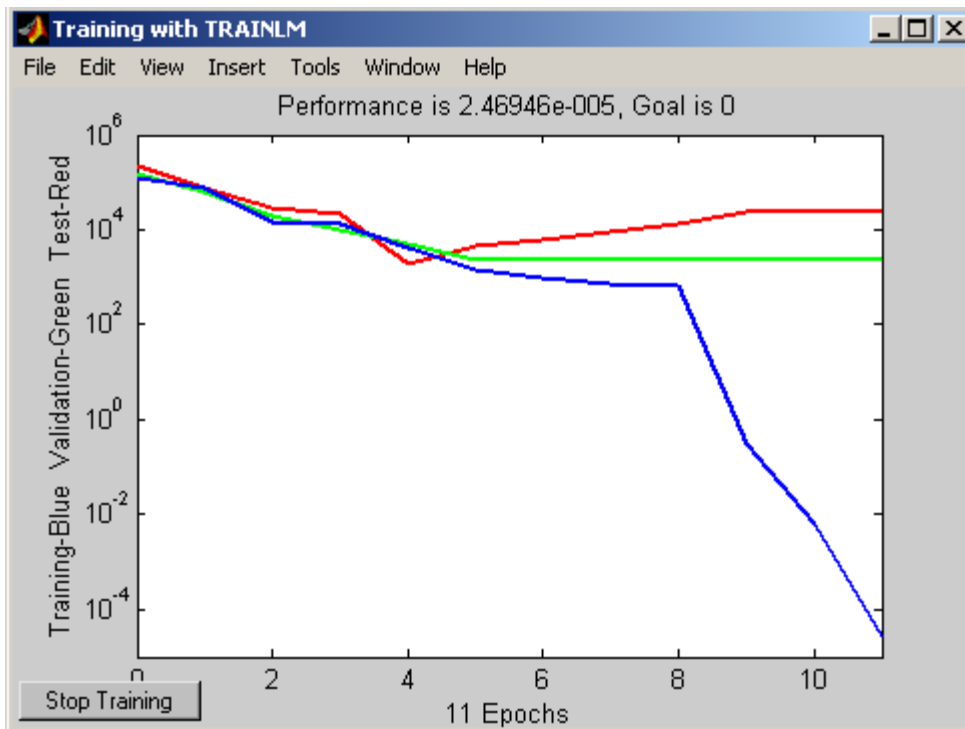
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 3



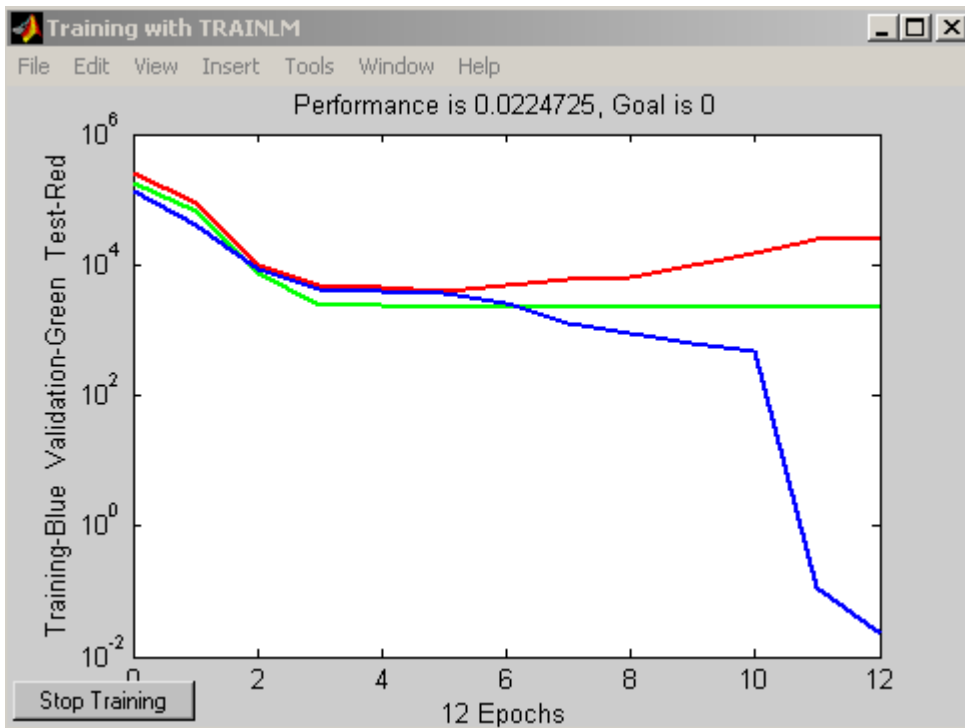
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 4



ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 5



ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 6



Χρησιμοποιώντας ως δείγμα τις παραπάνω τιμές, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Θα είναι :

$$\overline{mse} = \frac{0.10735 + 0.00870 + 0.00444 + 0.09774 + 0.00002 + 0.02247}{6} = 0.04012$$

Από τα παραπάνω βλέπουμε πως προκύπτει μια ικανοποιητική μέση τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκπαίδευσης (mse). Ταυτόχρονα όμως παρατηρούμε από τις γραφικές παραστάσεις πως τα σφάλματα επικύρωσης και ελέγχου είναι της τάξης του 10^3 ή 10^4 . Φυσικά οι τιμές αυτές φαίνονται αρκετά μεγάλες, όμως θα πρέπει εδώ να πούμε πως οι μεγάλες αυτές τιμές προκύπτουν εξαιτίας της συνάρτησης σφάλματος (mse) που χρησιμοποιεί το MATLAB. Η συνάρτηση αυτή μας δίνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προκύπτει υψώνοντας στο τετράγωνο της αποκλίσεις των πραγματικών από τις προβλεπόμενες τιμές. Ως εκ τούτου είναι λογικό να προκύπτουν τόσο μεγάλες τιμές για το σφάλμα, ειδικά στην περίπτωση μας που οι τιμές των μεταβλητών εξόδου είναι αρκετά μεγάλες. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιούσαμε ως συνάρτηση σφάλματος την συχνά χρησιμοποιούμενη rmse (root mean square error), θα προέκυπταν σαφώς μικρότερες τιμές σφαλμάτων εξαιτίας της ρίζας που περιέχεται στην συνάρτηση αυτή. Για τον λόγο αυτό άλλωστε αναφέραμε παραπάνω πως αρχικός μας στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκπαίδευσης, αλλά δεν μας αρκεί μόνο αυτό. Αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι να εξετάσουμε στην πράξη κατά πόσο οι τιμές που προβλέπει το δίκτυο μας είναι κοντά στις πραγματικές τιμές των δυνάμεων. Δηλαδή το κύριο μέλημα μας είναι να επιτύχουμε μικρό πραγματικό σφάλμα τόσο στην εκπαίδευση, όσο και στην επικύρωση και τον έλεγχο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω θα πρέπει να εξετάσουμε και την απόκριση του δικτύου στην περίπτωση που του εισάγουμε κάποιο διάνυσμα εισόδου. Το ερώτημα που τίθεται εδώ είναι εάν όντως οι τιμές των μεταβλητών εξόδου θα είναι κοντά στις πραγματικές (πειραματικά δεδομένα) ή όχι. Για τον σκοπό αυτό επιλέξαμε ορισμένα από τα διανύσματα εισόδου του πίνακα 4-1 και προσπαθήσαμε να ελέγξουμε την απόκριση του δικτύου σε περίπτωση που εισάγουμε τα διανύσματα αυτά. Τα διανύσματα αυτά αποτέλεσαν ένα δείγμα των πειραματικών δεδομένων που είχαμε στην διάθεση μας, με

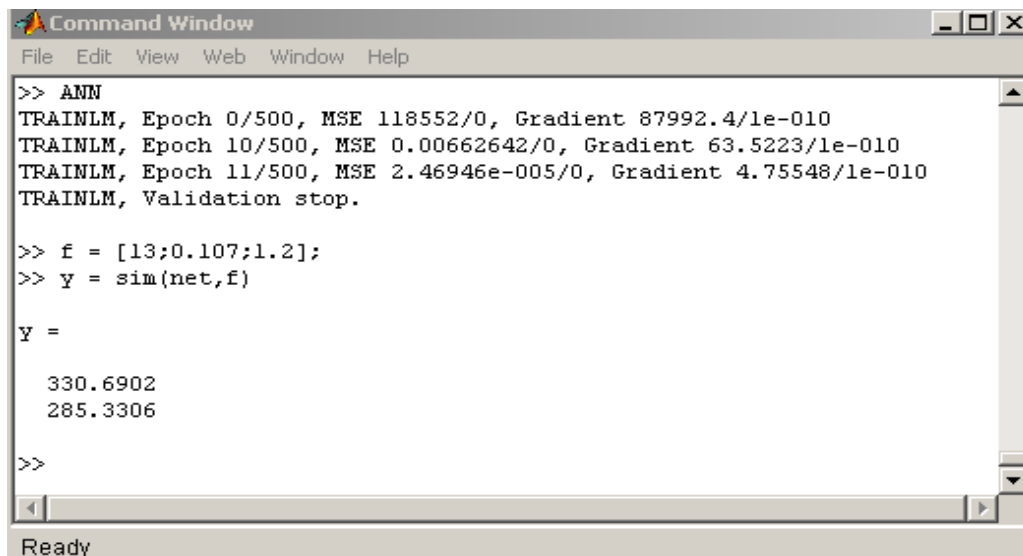
την βοήθεια του οποίου έγιναν δοκιμές σε ένα μεγάλο αριθμό δικτύων για να βρεθεί τελικά πιο είναι αυτό στο οποίο παρατηρούνται οι μικρότερες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Τα διάνυσματα ανήκαν τόσο στην ομάδα εκπαίδευσης όσο και στις ομάδες επικύρωσης και ελέγχου, ώστε να βγάλουμε συνολικά συμπεράσματα. Μάλιστα δοκιμάσαμε και ένα διάνυσμα εισόδου που δεν είχε χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση του δικτύου για να εξετάσουμε την απόκριση του σε νέα δεδομένα.

	Ταχύτητα (m/min)	Πρόωση (mm)	Βάθος κοπής (mm)	Πειραματικές τιμές		Αποτελέσματα ANN (N)		Απόκλιση	Απόκλιση
	v	f	DOC	Fc (N)	Ft (ή Ff)	Fc	Ft (ή Ff)	Fc	Ft (ή Ff)
1	29	0.212	1.0	457.1	361.9	455,3	332,0	0,4%	8,2%
5	29	0.212	1.2	571.4	428.5	528,6	396,4	7,5%	7,5%
6	22	0.212	1.2	457.4	342.9	463,8	365,7	1,4%	6,6%
8	13	0.107	1.2	323.8	280.9	330,7	285,3	2%	1,5%
10	22	0.212	1.5	619.1	523.8	573,7	462,3	7,3%	11,7%
11	17	0.212	1.5	523.8	428.5	527,5	440,3	0,7%	2,7%

Πίνακας 4-2 : Απόκριση δικτύου κατά την εισαγωγή διανυσμάτων εισόδου και απόκλιση από τις πραγματικές τιμές.

Το δίκτυο στο οποίο έχουμε καταλήξει παρουσίασε, όπως αναμενόταν, μικρότερες αποκλίσεις από τα υπόλοιπα δίκτυα που δοκιμάστηκαν (έχουμε ήδη αναφερθεί σε αυτά). Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώθηκε και το ορθό της επιλογής μας όσον αφορά την τελική μορφή του νευρωνικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την εντολή $y = \text{sim}(\text{net}, f)$, όπου f = διάνυσμα εισόδου, βρήκαμε την απόκριση του δικτύου (Πίνακας 4-2) χρησιμοποιώντας : τις γραμμές 8 και 5 από την ομάδα εκπαίδευσης, τις γραμμές 6 και 1 από την ομάδα επικύρωσης, την γραμμή 11 από την ομάδα ελέγχου, καθώς και την γραμμή 10 που δεν είχε συμπεριληφθεί στην εκπαίδευση του δικτύου.

Στο σημείο αυτό παραθέτουμε και ένα παράδειγμα (σχ. 4.8) για τον τρόπο με τον οποίο έγινε ο έλεγχος της απόκρισης του δικτύου με την βοήθεια της εντολής $y = \text{sim}(\text{net}, f)$. Στο παράδειγμα αυτό ως διάνυσμα εισόδου χρησιμοποιείται η στήλη 8 του πίνακα 4-2.



```
Command Window
File Edit View Web Window Help
>> ANN
TRAINLM, Epoch 0/500, MSE 118552/0, Gradient 87992.4/1e-010
TRAINLM, Epoch 10/500, MSE 0.00662642/0, Gradient 63.5223/1e-010
TRAINLM, Epoch 11/500, MSE 2.46946e-005/0, Gradient 4.75548/1e-010
TRAINLM, Validation stop.

>> f = [13;0.107;1.2];
>> y = sim(net,f)

y =

    330.6902
    285.3306

>>

Ready
```

Σχήμα 4.8 : Έλεγχος απόκρισης δικτύου.

Να πούμε εδώ ότι απλά χρησιμοποιήσαμε ένα δείγμα τιμών για να βρούμε την απόκριση του δικτύου, αφού οι δοκιμές της απόκρισης που έγιναν τόσο σε αυτό αλλά και στα υπόλοιπα δίκτυα που δοκιμάστηκαν ήταν τόσες πολλές που δεν θα ήταν εύκολο και ίσως χρήσιμο να παρατεθούν. Βλέπουμε επίσης από τον πίνακα 4-2 πως η μέση τιμή της απόκλισης των πραγματικών τιμών από αυτές που προβλέπει το δίκτυο δεν υπερβαίνει το 5 % και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις η απόκλιση είναι κάτω από 1% γεγονός που μας δείχνει ότι τα αποτελέσματα του δικτύου είναι αρκετά ικανοποιητικά. Έτσι από όλα τα παραπάνω προκύπτει πως έχουν ικανοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό οι στόχοι που αρχικά είχαμε θέσει, δηλαδή η μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος αλλά και η ικανοποιητική απόκριση του δικτύου κατά την εισαγωγή διανυσμάτων εισόδου.

4.3.6 Συμπεράσματα

Ξεκινώντας την εργασία αυτή αναφερθήκαμε εκτενώς στην έννοια της κατεργασίας και φυσικά επιμείναμε στην παρουσίαση όλων των απαραίτητων συνιστωσών που αφορούν την κατεργασία της κοπής των μετάλλων, η οποία μας ενδιαφέρει άμεσα. Αφού αναλύσαμε, όσο το δυνατό καλύτερα, όλες εκείνες τις έννοιες που σχετίζονται με την

κοπή των μετάλλων, προσπαθήσαμε στην συνέχεια να εισάγουμε την τεχνική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Κατόπιν χρησιμοποιήσαμε την τεχνική αυτή ώστε να μοντελοποιήσουμε και τελικά να προβλέψουμε τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της κατεργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος μας ήταν να καταφέρουμε να εκπαιδύσουμε το νευρωνικό δίκτυο ώστε αυτό να επιτυγχάνει ακριβή εκτίμηση των δυνάμεων κοπής, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη την επίδραση της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης και του βάθους κοπής στις δυνάμεις αυτές. Ως εκ τούτου δημιουργήσαμε ένα δίκτυο που να έχει ως μεταβλητές εισόδου τις τρεις αυτές μεταβλητές (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής) και μεταβλητές εξόδου τις δυνάμεις κοπής. Μελετήσαμε σημαντικές έννοιες όπως το σφάλμα εκπαίδευσης, ο αριθμός των νευρώνων στα κρυμμένα επίπεδα, ο ρυθμός εκμάθησης και ο παράγοντας ορμής. Κατά την κατασκευή του δικτύου δώσαμε έμφαση σε παράγοντες όπως ο διαχωρισμός των πειραματικών δεδομένων σε τρεις διαφορετικές ομάδες (εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου), η σωστή επιλογή του αριθμού των κρυμμένων επιπέδων και του αριθμού των νευρώνων σε αυτά, ενώ ταυτόχρονα προσπαθήσαμε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα εκπαίδευσης και την απόκλιση των εκτιμώμενων από τις πραγματικές δυνάμεις. Έγιναν δοκιμές σε ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών δικτύων, στα οποία μεταβάλλαμε συνεχώς τις παραπάνω παραμέτρους έτσι ώστε να βγάλουμε ένα τελικό συμπέρασμα για το ποια θα πρέπει να είναι η τελική μορφή του δικτύου μας.

Από τις δοκιμές αυτές βγάλαμε διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα για την κατασκευή των νευρωνικών δικτύων. Πρώτα απ' όλα παρατηρήθηκε ότι η συνύπαρξη αντικρουόμενων πειραματικών δεδομένων μέσα σε μια ομάδα (εκπαίδευσης, επικύρωσης ή ελέγχου), οδηγεί στην σύγκλιση τους σφάλματος εκπαίδευσης σε πολύ υψηλές τιμές και κατά συνέπεια δυσκολεύει την εκπαίδευση του δικτύου. Η απομάκρυνση των αντικρουόμενων δεδομένων (ειδικότερα στην ομάδα ελέγχου) έχει σαν αποτέλεσμα την άμεση μείωση του σφάλματος και φυσικά την βελτίωση του δικτύου. Όσον αφορά τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων που θα πρέπει να έχει το δίκτυο, είδαμε πως η αύξηση του αριθμού αυτού οδηγούσε αρχικά σε μικρότερα σφάλματα, όμως καθώς αύξανε ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων είχαμε μεγάλη αστάθεια στις τιμές του σφάλματος κάθε φορά που τρέχαμε το πρόγραμμα, ενώ φυσικά αύξανε ταυτόχρονα και η

πολυπλοκότητα του δικτύου. Συμπεράναμε έτσι πως για ένα δίκτυο με λίγες μεταβλητές εισόδου και εξόδου η αύξηση των κρυμμένων επιπέδων περισσότερο βλάπτει παρά ωφελεί την σωστή κατασκευή του δικτύου. Κάτι ανάλογο παρατηρήθηκε και με τον αριθμό των νευρώνων στα κρυμμένα επίπεδα. Ύστερα από αρκετές δοκιμές είδαμε πως όταν ο αριθμός των νευρώνων ξεπερνά τους 11 με 12 παρατηρείται επίσης μεγάλη αστάθεια στο δίκτυο όσον αφορά το σφάλμα. Έτσι παρότι είχαμε πολλές φορές άμεση σύγκλιση του σφάλματος σε μια χαμηλή τιμή, δεν μπορούσαμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Άλλωστε ακόμη και στην πράξη είχαμε μεγάλες αποκλίσεις των πραγματικών από τις εκτιμώμενες τιμές των δυνάμεων. Βλέπουμε λοιπόν πως ενώ η χρήση μεγάλου αριθμού νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων μπορεί πολλές φορές να βοηθήσει στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων, στην περίπτωση μας είχαμε αύξηση της πολυπλοκότητας του δικτύου χωρίς κανένα ουσιαστικό κέρδος. Για τους λόγους αυτούς άλλωστε επιλέξαμε ένα δίκτυο με ένα κρυμμένο επίπεδο και 7 νευρώνες στο επίπεδο αυτό. Με οδηγό όλα αυτά τα συμπεράσματα καταλήξαμε τελικά στην μορφή του νευρωνικού δικτύου που παρουσιάσαμε παραπάνω αναλυτικά.

Πρέπει τέλος να αναφέρουμε πως για το δίκτυο μας επιλέξαμε ως αλγόριθμο εκπαίδευσης τον Levenberg – Marquardt (L-M) διότι αυτός οδηγεί σε αισθητά μικρότερο σφάλμα σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους. Επιπλέον επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση τους σφάλματος ενώ η διάρκεια της εκπαίδευσης είναι πολύ μικρή. Το μικρό σφάλμα που μας δίνει ο αλγόριθμος αυτός οφείλεται στην τεχνική της πρόωρης διακοπής. Με την τεχνική αυτή η εκπαίδευση σταματά πολύ νωρίτερα από τον μέγιστο αριθμό εποχών, οπότε αλγόριθμοι όπως αυτός της οπισθόδρομης διάδοσης δεν προλαβαίνουν να συγκλίνουν στην σωστή τιμή τους σφάλματος και γι' αυτό άλλωστε δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μας.

Είδαμε στην αρχή του κεφαλαίου πως για την προσομοίωση κατεργασιών όπως αυτής της κοπής, αρκετές φορές είναι απαραίτητη η εξαγωγή μιας σχέσης που να συνδέει τις διάφορες παραμέτρους της κατεργασίας (ταχύτητας κοπής, πρόωσης, βάθους κοπής και γεωμετρίας εργαλείων). Επειδή όμως αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό και τα προβλήματα που έχουμε συνήθως να αντιμετωπίσουμε έχουν υψηλό δείκτη πολυπλοκότητας, παρουσιάσαμε την τεχνική των νευρωνικών δικτύων. Επιπλέον η δημιουργία αναλυτικών μοντέλων θεωρείται δύσκολη και χρονοβόρα ενώ συνήθως απαιτούνται και παραδοχές

που συχνά δεν είναι ρεαλιστικές. Ταυτόχρονα τα εμπειρικά μοντέλα που μπορεί να αναπτυχθούν, εφαρμόζονται με ακρίβεια μόνο για το εύρος των τιμών στο οποίο αναπτύχθηκαν. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, στα νευρωνικά δίκτυα δεν υπάρχουν τέτοιοι περιορισμοί καθώς αυτά δεν βασίζονται σε παραδοχές αλλά αντιθέτως χρησιμοποιούν την εμπειρία και τα πειραματικά δεδομένα με τα οποία εκπαιδεύθηκαν. Έτσι εκτελούν σωστούς υπολογισμούς για ένα εύρος τιμών μεγαλύτερο από αυτές που περιέχονται στα πειραματικά δεδομένα. Όπως είδαμε άλλωστε από όλα τα παραπάνω, παρά το γεγονός ότι δεν είχαμε στην διάθεση μας μεγάλο πλήθος πειραματικών δεδομένων, καταφέραμε να δημιουργήσουμε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με χαμηλό σφάλμα και μικρή απόκλιση των εκτιμώμενων από τις πραγματικές τιμές. Το γεγονός αυτό και μόνο μας δείχνει την χρησιμότητα των νευρωνικών δικτύων τα οποία μπορούν, υπό συνθήκες, να αποτελέσουν έναν άκρως αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού των δυνάμεων κοπής αλλά και άλλων πιθανών μεταβλητών εξόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανάσιος Γ.Μάμαλης, *Κατεργασίες των Υλικών II*, 1999.
2. Αθανάσιος Γ.Μάμαλης, *Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών : Πειραματικές Ασκήσεις Εργαστήριο*, Εκδόσεις Φοίβος, 1996.
3. Αθανάσιος Γ.Μάμαλης, *Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών : Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, Εκδόσεις Φοίβος, 1996.
4. Δημήτρης Ι.Παντελής και Γιάννης Δ.Χρυσουλάκης, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, 1996.
5. Serope Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Illinois Institute of Technology, Third Edition, 1997.
6. John A.Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, Third Edition, 2000.
7. Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*, Illinois Institute of technology, Third Edition, 1995.
8. Sheriffs D.El.Wakil, *Processes and Design for Manufacturing*, Prentice-Hall, 1989.
9. J.S.Campbell, *Principles of Manufacturing Materials and Processes*, University of California, 1974.
10. Phillip F.Ostwald and Jairo Munoz, Iowa Precision Industries Inc., *Manufacturing Processes and Systems*, Ninth Edition, 1997.
11. Kevin Swingler, *Applying Neural Networks*, Center for Cognitive and Computational Neuroscience, University of Stirling, 2001.
12. S.Haykin, *Neural Networks : A Comprehensive Foundation*, Prentice-Hall, 1999.
13. Edward B.Magrab, *An engineer's guide to Matlab*, University of Maryland, Mechanical Engineering Department, 2000.

14. K.Hans Raj, Rahul Swarup Sharma, Sanjay Srivastava, C.Patvardhan, *Modeling of manufacturing processes with ANNs for intelligent manufacturing*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp.851-868, 2000.
15. Tamas Szecsi, *Cutting force modeling using artificial neural networks*, Journal of Materials Processing Technology 92-93, pp.344-349, 1999.
16. Wuyi Chen, *Cutting force and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp.455-466, 2000.
17. Laszlo Monostori, *AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 16, pp. 277-291, 2003.
18. D.Barschdorff and L.Monostori, *Neural Networks-Their applications and perspectives in intelligent machining-*, Computers in Industry, Volume 17, pp. 101-119, 1991.

