



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Αξιολόγηση παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος



Μαρία Ε. Βογιατζή
Αρ. Μητρώου 568

Ξάνθη, Οκτώβριος 2010



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Αξιολόγηση παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος

Μαρία Ε. Βογιατζή

Αρ. Μητρώου 568

Copyright © Μαρία Βογιατζή, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Αφιερώνεται στον αγαπημένο μου
θείο Σάκη.

Εισαγωγή

Συνέπεια της αυτοματοποίησης των κατεργασιών, είναι να μην γίνεται άμεσα η εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων από τον άνθρωπο, αλλά να σχεδιάζονται στρατηγικές συντήρησης, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η αλλαγή κοπτικών εργαλείων, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Η επιβάρυνση του κόστους γίνεται μεγαλύτερη όταν συμβαίνουν τυχαία συμβάντα κατά τη διάρκεια των κατεργασιών. Η θραύση ενός κοπτικού εργαλείου, καθώς και η ραγδαία φθορά πριν από την προγραμματισμένη αλλαγή του, είναι απρόβλεπτα γεγονότα και έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή μη ποιοτικών προϊόντων. Ο χρόνος που απαιτούν τα συστήματα ελέγχου ποιότητας για την εύρεση του πρώτου μη ποιοτικού προϊόντος μέχρι την αντιμετώπιση της αιτίας του, συνήθως είναι μεγάλος. Οι χρόνοι αυτοί επιβαρύνουν σημαντικά τον τελικό χρόνο παραγωγής του προϊόντος, δημιουργώντας πονοκεφάλους στους Μηχανικούς και αυξάνουν σημαντικά το κόστος παραγωγής.

Η λύση βρίσκεται στην εκτίμηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων. Η εκτίμηση της φθοράς γίνεται με έμμεσο τρόπο, παρακολουθώντας τα παραγόμενα σήματα κατά τη διάρκεια των κατεργασιών, τα οποία συσχετίζονται με την ύπαρξη φθοράς στα κοπτικά εργαλεία. Μέσω της ανάλυσης των παραπάνω σημάτων, είναι δυνατή η διάγνωση της φθοράς αλλά και ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Για τη σωστή συλλογή και ανάλυση αυτών των σημάτων χρειάζεται να ακολουθηθεί η μέθοδος των Σχεδιασμένων Πειραμάτων (Design of Experiments). Οι πειραματικές διαδικασίες αποτελούσαν πάντοτε βασικό συστατικό στοιχείο της διαδικασίας ανάπτυξης νέων ή βελτίωσης υφιστάμενων προϊόντων και διαδικασιών. Το σχεδιασμένο πείραμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις δαπάνες

σχεδίου με την επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού, τη μείωση των πρόσφατων αλλαγών σχεδίου εφαρμοσμένης μηχανικής, και τη μείωση υλικών προϊόντων και πολύπλοκων εργασιών. Τα σχεδιασμένα πειράματα είναι επίσης ισχυρά εργαλεία για να επιτύχουν τη μείωση κόστους κατασκευής με την ελαχιστοποίηση της παραλλαγής της διαδικασίας και τη μείωση της επανάληψης, του σφάλματος, και της ανάγκης για την επιθεώρηση ελέγχου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να γίνει η αξιολόγηση των παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων, που αναλύθηκαν σε προηγούμενη διπλωματική εργασία, με την μέθοδο των Σχεδιασμένων Πειραμάτων. Η διαδικασία κατεργασίας που μελετήθηκε, όπως και στην προηγούμενη διπλωματική εργασία, ήταν η κατεργασία της διάτρησης, δεδομένου ότι η διάτρηση είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Ο Σχεδιασμός και η υλοποίηση, έγινε στο χώρο του Εργαστηρίου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (MeDiLab).

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται η γνωριμία με την ιστορία των εργαλειομηχανών, καθώς και οι διάφοροι τύποι φθοράς που συναντώνται στα κοπτικά εργαλεία και πιο συγκεκριμένα στα κοπτικά εργαλεία διάτρησης. Επίσης γίνεται η αναφορά των έμμεσων μεθόδων εκτίμησης φθοράς που μελετήθηκαν στην προηγούμενη διπλωματική εργασία.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία των Σχεδιασμένων Πειραμάτων. Γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα της μεθόδου, αλλά και στους τομείς που χρησιμοποιείται. Επίσης αναλύεται η ανάπτυξη της μεθόδου ώστε να προκύψουν τα μέγιστα σωστά αποτελέσματα με το ελάχιστο κόστος.

Στο τρίτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται περιληπτικά, η ανάλυση του μηχανολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη του συστήματος παρακολούθησης φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Επιπλέον πραγματεύεται την ανάλυση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή και πρόσκτηση, την αποθήκευση, καθώς και την ανάλυση των σημάτων. Ακόμα γίνεται επιλογή των Σχεδιασμένων Μεταβλητών με βάση τη διάταξη του πειράματος.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των σημάτων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με βάση τη μεθοδολογία του Σχεδιασμού Πειραμάτων. Επίσης αξιολογούνται οι παράμετροι εκτίμησης φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Στο πέμπτο και τελευταίο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος διατυπώνονται οι προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη και εμπλουτισμό της διπλωματικής και καθορίζονται τα πεδία μελέτης για την πραγματοποίηση των νέων στόχων.

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

Τον κύριο Παντελή Ν. Μπότσαρη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., για τη συνεργασία του καθ' όλη την διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Την κυρία Σοφία Παναγιωτίδου, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Π.Θ., επιστημονική συνεργάτιδα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την πολύτιμη και καταλυτική βοήθεια.

Τον κύριο Ηρακλή Αμοιρίδη, Απόφοιτο Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης του Δ.Π.Θ. για την μετάδοση των γνώσεων του.

Τον κύριο Ιωάννη Τσανάκα, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Δ.Π.Θ., υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.

Τον κύριο Δημήτριο Χριστοφορίδη, Δρ. Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης, Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Δ.Π.Θ., για τη μετάδοση των γνώσεών του στη λειτουργία των εργαλειομηχανών CNC.

Την οικογένειά μου, για την υποστήριξή της.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες	iii
Πίνακας περιεχομένων	iv
Πίνακας σχημάτων	ix
Κατάλογος πινάκων	xiii
Περίληψη	xiv
Abstract	xv

Κεφάλαιο 1

Φθορά κοπτικών εργαλείων και έλεγχος φθοράς: περίπτωση διάτρησης	1
Περιεχόμενα	1
1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης μεταλλικού υλικού.....	3
1.2.1 Εργαλειομηχανές τόννευσης.....	4
1.2.2 Εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος.....	5
1.2.3 Εργαλειομηχανές διάτρησης.....	7
1.3 Κοπτικά εργαλεία διάτρησης.....	9
1.4 Τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων διάτρησης (τρυπάνια).....	10
1.4.1 Πλευρική φθορά (Flank Wear).....	12
1.4.2 Φθορά κρατήρα (Crater Wear).....	13

1.4.3 Αποκολλήση (Chipping)	13
1.4.4 Φθορά λόγω ψευδοακμής	14
1.5 Διάρκεια ζωής των κοπτικών	15
1.6 Έλεγχος φθοράς κοπτικών εργαλείων	16
1.7 Μέθοδοι Ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων	18
1.7.1 Μηχανικές Δονήσεις	20
1.7.2 Υπέρυθρη θερμογραφία	21
1.8 Σύνοψη	23
1.9 Βιβλιογραφία	24

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία Σχεδιασμού Πειραμάτων (Design of Experiment)...	26
Περιεχόμενα	26
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Σχεδιασμένο Πείραμα- Design of Experiment	29
2.2.1 Βασικές έννοιες και διαδικασίες των σχεδιασμένων πειραμάτων με ένα παράδειγμα	31
2.3 Στρατηγική των Πειραμάτων	34
2.4 Εφαρμογές για τις Σχεδιασμένες Πειραματικές Τεχνικές	36
2.5 Στατιστικά πειράματα με έναν παράγοντα	38
2.5 Στατιστικά πειράματα με πολλούς παράγοντες	38
2.7 Παραγοντικά Πειράματα	39
2.7.1 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^2	40
2.7.1.1 Στατιστική Ανάλυση Αποτελεσμάτων	41
2.7.2 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^3	46
2.7.2.1 Παράδειγμα Παραγοντικού πειράματος 2^3	49
2.7.3 Το γενικευμένο 2^k Παραγοντικό Πείραμα	51
2.8 Ειδικές Στατιστικές Ανάλυσης Παραγοντικών Πειραμάτων	53
2.8.1 Τυπικό Σφάλμα Επίδρασης (Standard Errors of the Effect)	53
2.8.2 Γραμμική Παλινδρόμηση (Regression Analysis)	54
2.9 2^k Παραγοντικό Πείραμα χωρίς δυνατότητα επαναλήψεων (residual analysis)	54
2.10 Κλασματικά Πειράματα	55
2.11 Σύνοψη	55
2.12 Βιβλιογραφία	57

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή Πειραματικής διάταξης και επιλογή Σχεδιασμένων Παραμέτρων.....

Περιεχόμενα	58
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Τεχνολογικός Εξοπλισμός και Λογισμικό Μετρητικού Συστήματος.....	60
3.3 Παράμετροι Πειράματος.....	63
3.4 Επιλογή Σχεδιασμένων Μεταβλητών.....	64
3.5 Σύνοψη.....	69
3.6 Βιβλιογραφία.....	70

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων.....

Περιεχόμενα.....	71
4.1 Εισαγωγή.....	72
4.2 Πειραματικά αποτελέσματα θερμοκρασιών στην περιοχή κοπής.....	73
4.2.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση.....	76
4.2.2 Ανάλυση πειράματος με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα.....	77
4.2.3 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα.....	84
4.3 Πειραματικά αποτελέσματα δονήσεων στην περιοχή κοπής.....	89
4.3.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση.....	93
4.3.2 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα.....	94
4.4 Σύνοψη.....	100
4.5 Βιβλιογραφία.....	101

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προτάσεις.....

Περιεχόμενα	103
5.1 Εισαγωγή	104
5.2 Συμπεράσματα.....	104
5.2.1 Χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων σε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.....	104
5.2.2 Σωστή επιλογή των ανεξάρτητων Σχεδιασμένων Μεταβλητών.....	104
5.2.3 Συμπεράσματα για τις Παραμέτρους εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων.....	105
5.3 Προτάσεις.....	106
5.3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Σχεδιασμού Πειραμάτων και σε άλλες πειραματικές διατάξεις.....	106
5.3.2 Δημιουργία συστήματος μέτρησης χρόνου ζωής κοπτικών εργαλείων.....	106
5.3.3 Αξιολόγηση επιπλέον παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος.....	107
5.3.4 Δημιουργία συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής...	107

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1:	Διάφορες κατεργασίες τόννου.....	4
Σχήμα 1.2:	Παράδειγμα τόννευσης.....	5
Σχήμα 1.3:	Παράδειγμα φρεζαρίσματος.....	5
Σχήμα 1.4:	Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος, περιφερικό, μετωπικό και με κονδύλι.....	6
Σχήμα 1.5:	Αντίρροπο και ομόρροπο φρεζάρισμα.....	6
Σχήμα 1.6:	(α) Σύγχρονο χειροκίνητο δράπανο, (β) κάθετο κέντρο κατεργασίας CNC, (γ) αυτόματος τροφοδότης κοπτικών εργαλείων.....	8
Σχήμα 1.7:	Κατεργασίες διάτρησης γλύφανση, σπειροτόμηση, εμβύθιση, εμβύθιση με γωνία, κεντράρισμα, ισοπέδωση του άκρου οπής.....	8
Σχήμα 1.8:	Τύποι και σχηματική απεικόνιση τρυπανιών.....	9
Σχήμα 1.9:	Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός ελικοειδούς τρυπανιού.....	10
Σχήμα 1.10:	Ανάπτυξη πλευρικής φθοράς στα κοπτικά εργαλεία.....	12
Σχήμα 1.11:	Απεικόνιση πλευρικής φθοράς.....	12
Σχήμα 1.12:	Ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στα κοπτικά εργαλεία.....	13
Σχήμα 1.13:	Απεικόνιση φθοράς κρατήρα.....	13
Σχήμα 1.14:	Απεικόνιση φθοράς λόγω αποκολλήσεων.....	14
Σχήμα 1.15:	Απεικόνιση φθοράς λόγω ψευδοακμής.....	14
Σχήμα 1.16:	Τα πέντε στάδια εξέλιξης της φθοράς στα κοπτικά εργαλεία.....	17
Σχήμα 1.17:	Συνήθης κατανομή θερμότητας στην ζώνη κοπής.....	22
Σχήμα 2.1:	Κύκλος Deming.....	29
Σχήμα 2.2:	Γενική διαδικασία σχεδιασμού πειραμάτων.....	30
Σχήμα 2.3:	Διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος.....	32
Σχήμα 2.4:	Παράδειγμα διαδικασίας Σχεδιασμένου πειράματος.....	32
Σχήμα 2.5:	Πειραματικές Διαδικασίες.....	36
Σχήμα 2.6:	Παραγοντικά και Κλασματικά πειράματα.....	37

Σχήμα 2.7:	Απεικόνιση επιπέδων πειράματος.....	41
Σχήμα 2.8:	Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση.....	42
Σχήμα 2.9:	Υπάρχει αλληλεπίδραση.....	43
Σχήμα 3.1:	Κάθετο κέντρο κατεργασίας Yang Eagle SMV – 1000.....	60
Σχήμα 3.2:	Εγκατεστημένα επιταχυνσιόμετρα.....	61
Σχήμα 3.3:	Εγκατεστημένο υπέρυθρο θερμομέτρο.....	61
Σχήμα 3.4:	Τρυπάνι HSS κοβαλτίου 5%	64
Σχήμα 3.5:	Συντεταγμένες οπών στο κομμάτι κατεργασίας.....	68
Σχήμα 3.6:	Δονήσεις οπής A4 μετά την αρχική επεξεργασία διάσπασης.....	68
Σχήμα 4.1:	Εναλλαγή παραγόντων από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο χαμηλό επίπεδο.....	75
Σχήμα 4.2:	Εναλλαγή παραγόντων από το υψηλό στο χαμηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο υψηλό επίπεδο.....	76
Σχήμα 4.3:	Αρίθμηση οπών και σκίαση των προς ανάλυση οπών.....	77
Σχήμα 4.4:	Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).....	79
Σχήμα 4.5:	Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).....	80
Σχήμα 4.6:	Αλληλεπίδραση (πρόωση*βάθος κοπής).....	80
Σχήμα 4.7:	Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).....	86
Σχήμα 4.8:	Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).....	86
Σχήμα 4.9:	Αλληλεπίδραση (πρόωση*βάθος κοπής).....	87
Σχήμα 4.10:	Εναλλαγή παραγόντων από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο χαμηλό επίπεδο.....	92
Σχήμα 4.11:	Εναλλαγή παραγόντων από το υψηλό στο χαμηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο υψηλό επίπεδο.....	93
Σχήμα 4.12:	Αρίθμηση οπών και σκίαση των προς ανάλυση οπών.....	94
Σχήμα 4.13:	Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).....	95
Σχήμα 4.14:	Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).....	96
Σχήμα 4.15:	Αλληλεπίδραση (πρόωση* βάθος κοπής).....	96
Σχήμα 4.16:	Παράδειγμα γραφικής παράστασης απεικόνισης.....	100
Σχήμα 5.1:	Γραφική απεικόνιση συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής.....	108

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1:	Προτεινόμενοι εκθέτες υπολογισμού διάρκειας ζωής, κατά B. K. Srinivas.....	16
Πίνακας 2.1:	Ορολογίες της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων.....	31
Πίνακας 2.2:	Δομημένος πίνακας από Παραγοντικό Πείραμα.....	40
Πίνακας 2.3:	Ανάλυση Διακύμανσης του παραδείγματος.....	44
Πίνακας 2.4:	Συντελεστές Διαφορών.....	45
Πίνακας 2.5:	Πίνακας Συν και Πλην.....	45
Πίνακας 2.6:	Πειραματικός πίνακας.....	46
Πίνακας 2.7:	Τύποι παραστατικά.....	47
Πίνακας 2.8:	Πίνακας Συν και Πλην.....	49
Πίνακας 2.9:	Απεικόνιση Συνδυασμών πειράματος.....	50
Πίνακας 2.10:	Ανάλυση Διακύμανσης.....	51
Πίνακας 3.1:	Μηχανικές ιδιότητες και χημική σύσταση λαμαρίνας XAR 450.....	63
Πίνακας 3.2:	Παράμετροι πειράματος.....	64
Πίνακας 3.3:	Επίπεδα παράγοντα βάθους κοπής (A).....	66
Πίνακας 3.4:	Επίπεδα παράγοντα πρόωσης (B).....	67
Πίνακας 3.5:	Συνδυασμοί σε κάθε πλάκα.....	67
Πίνακας 4.1:	Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το πρώτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 1).....	73
Πίνακας 4.2:	Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το δεύτερο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 2).....	74
Πίνακας 4.3:	Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το τρίτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 3).....	74
Πίνακας 4.4:	Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το τέταρτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 4).....	74
Πίνακας 4.5:	Συνδυασμοί επιπέδων παραγόντων σε κάθε πλάκα κατεργασίας.....	75

Πίνακας 4.6:	ANOVA.....	78
Πίνακας 4.7:	ANOVA.....	79
Πίνακας 4.8:	Δυνατοί συνδυασμοί παραγόντων.....	81
Πίνακας 4.9:	Εκτίμηση Παραμέτρων.....	82
Πίνακας 4.10:	Σύγκριση εκτιμούμενης με μετρούμενης τιμής της θερμοκρασίας σε °C.....	83
Πίνακας 4.11:	ANOVA.....	83
Πίνακας 4.12:	ANOVA.....	84
Πίνακας 4.13:	ANOVA.....	85
Πίνακας 4.14:	Εκτίμηση Παραμέτρων.....	88
Πίνακας 4.15:	Σύγκριση εκτιμούμενης με μετρούμενης τιμής της θερμοκρασίας σε °C.....	89
Πίνακας 4.16:	Τιμές αριθμητικού μέσου των δονήσεων του πρώτου κομματιού κατεργασίας.....	90
Πίνακας 4.17:	Τιμές RMS των δονήσεων του πρώτου κομματιού κατεργασίας.....	90
Πίνακας 4.18:	Τιμές RMS των δονήσεων του δεύτερου κομματιού κατεργασίας.....	91
Πίνακας 4.19:	Τιμές RMS των δονήσεων του τρίτου κομματιού κατεργασίας.....	91
Πίνακας 4.20:	Τιμές RMS των δονήσεων του τέταρτου κομματιού κατεργασίας.....	91
Πίνακας 4.21:	Συνδυασμοί επιπέδων παραγόντων σε κάθε πλάκα κατεργασίας.....	92
Πίνακας 4.22:	ANOVA.....	95
Πίνακας 4.23:	Εκτίμηση Παραμέτρων.....	97
Πίνακας 4.24:	Σύγκριση εκτιμούμενης με μετρούμενης τιμής των δονήσεων.....	99

Περίληψη

“Αξιολόγηση Παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος”

Η Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ελλάδα, Οκτώβριος 2010 για το Δίπλωμα: *Πτυχίο Παραγωγής και Διοίκησης (Πτυχίο Μηχανικού)*

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Π. Ν. Μπότσαρης

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιολόγηση παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων και πιο συγκεκριμένα τρυπανιών, που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενη διπλωματική εργασία, χρησιμοποιώντας Σχεδιασμένα Πειράματα. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι οι παραγόμενες δονήσεις της διάτρησης και η θερμοκρασία στην περιοχή κοπής. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν, με βάση την πειραματική διάταξη, οι Σχεδιασμένες Μεταβλητές με βάση τις οποίες υλοποιήθηκαν τα Σχεδιασμένα Πειράματα και πιο συγκεκριμένα τα Παραγοντικά Πειράματα, σε εργαλειομηχανή CNC. Στην συνέχεια έγινε η συλλογή και πρόσκτηση σημάτων των παραμέτρων εκτίμησης της φθοράς των κοπτικών και έγινε η στατιστική επεξεργασία τους για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Από την έρευνα προέκυψε πως καταλληλότερη μέθοδος εκτίμησης φθοράς, για τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, αποτελεί η μέτρηση των θερμοκρασιών στην περιοχή κοπής.

Λέξεις – Κλειδιά: Σχεδιασμένα Πειράματα, Παραγοντικά Πειράματα, Δονήσεις διάτρησης, Θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου, Φθορά κοπτικού εργαλείου, Στατιστική Ανάλυση.

Abstract

“Estimation of Tool Wear based on Design of Experiments (DOE) method. Case Study: Drilling”

Thesis submitted to the Department of Production Engineering and Management, Faculty of Materials, Processes and Mechanics, School of Engineering, Democritus University of Thrace, Greece, on October 2010 for the degree of:

Diploma in Production Engineering and Management (Dip. Eng.)

Supervisor: Assoc. Prof. P. N. Botsaris

In this thesis, a previous dissertation of the current research team is investigated using the Design of Experiment (DOE) method. In particular a sensor-based approach for the in-process tool wear monitoring and detection of tool breakage in drilling process was deployed by Botsaris et. al. In the current work the tool-wear monitoring is examined in terms of cutting speed, feed rate, and depth of cut, using the design of experiment (DOE) method. The effects of the main cutting variables (cutting speed, feed, and depth of cut) on tool life have been investigated by the application of the factorial design technique. All of the cutting tests were performed using HSS tools under dry conditions. The factorial parameters effects to tool life have been generated from these tests and are shown in different plots. The results are presented in terms of mean and RMS values. According to the analysis that has been done, the main cutting variables were proved to effect the tool temperature measurement and the vibration measurement.

Keywords: Design of Experiments (DOE) method, Factorial Experiments, Condition monitoring system, Drilling vibrations, Tool temperature, Tool wear, Statistical analysis.

Κεφάλαιο 1

Φθορά κοπτικών εργαλείων και έλεγχος φθοράς: περίπτωση διάτρησης

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης μεταλλικού υλικού.....	3
1.2.1 Εργαλειομηχανές τόνρευσης.....	4
1.2.2 Εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος.....	5
1.2.3 Εργαλειομηχανές διάτρησης.....	7
1.3 Κοπτικά εργαλεία διάτρησης.....	9
1.4 Τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων διάτρησης (τρυπάνια).....	10
1.4.1 Πλευρική φθορά (Flank Wear).....	12
1.4.2 Φθορά κρατήρα (Crater Wear).....	13
1.4.3 Αποκολλήση (Chipping)	13
1.4.4 Φθορά λόγω ψευδοακμής	14
1.5 Διάρκεια ζωής των κοπτικών.....	15
1.6 Έλεγχος φθοράς κοπτικών εργαλείων.....	16
1.7 Μέθοδοι Ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων.....	18
1.7.1 Μηχανικές Δονήσεις.....	20
1.7.2 Υπέρυθρη θερμογραφία.....	21
1.8 Σύνοψη.....	23
1.9 Βιβλιογραφία.....	24

1.1 Εισαγωγή

Η διάνοιξη οπών είναι αναμφισβήτητα η συνηθέστερη και ευρέως χρησιμοποιούμενη κατεργασία αφαίρεσης υλικού στη μηχανουργική παραγωγή, από τη βιομηχανική επανάσταση μέχρι και σήμερα. Η διάτρηση είναι μία από τις πιο περίπλοκες μηχανουργικές κατεργασίες. Το κύριο χαρακτηριστικό που τη διακρίνει από άλλες κατεργασίες είναι η συνδυασμένη κοπή και απότμηση του κατεργαζόμενου υλικού στην ακμή της κόψης στο κέντρο του τρυπανιού. Έχει αναφερθεί ότι η διαδικασία της διάτρησης είναι η πλέον διαδεδομένη μεταξύ της τórνευσης, του φρεζαρίσματος και της λείανσης, φτάνοντας το 40% των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού στην αεροναυπηγική βιομηχανία [1].

Με την εισαγωγή και τη χρήση των αυτόματων εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (Computer Numerical Control, CNC) στη βιομηχανική παραγωγή, η διαδικασία της διάτρησης έγινε αυτόματη όπως και οι υπόλοιπες κατεργασίες. Λόγω των εξελιγμένων συστημάτων που διαθέτουν οι σημερινές εργαλειομηχανές, οι χρόνοι κατεργασίας μειώθηκαν σε μεγάλο βαθμό, αυξάνοντας ταυτόχρονα την προαπαιτούμενη ποιότητα η οποία είναι ο βασικός στόχος των βιομηχανιών.

Συνέπεια της αυτοματοποίησης των κατεργασιών, είναι να μην γίνεται άμεσα η εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων από τον άνθρωπο, αλλά να σχεδιάζονται στρατηγικές συντήρησης, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η αλλαγή κοπτικών εργαλείων, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Καθώς είναι αδύνατη η πρόβλεψη τυχαίων συμβάντων κατά τις κατεργασίες, τα οποία συντελούν στην θραύση των κοπτικών εργαλείων, η παραγωγή πολλές φορές διακόπτεται απρόσμενα με αποτέλεσμα τη σπατάλη χρόνου και αύξηση του κόστους παραγωγής.

Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία προϋπόθεση η χρήση μετρητικών διατάξεων παρακολούθησης των λειτουργικών παραμέτρων των εργαλειομηχανών, κατά τις κατεργασίες. Έτσι με τη χρήση άμεσων ή έμμεσων μεθόδων πρόγνωσης και διάγνωσης της φθοράς, καθίσταται δυνατή η ακριβής χρονική στιγμή αλλαγής των κοπτικών εργαλείων.

Μία μέθοδος που βοηθά για να προκύψουν σωστά συμπεράσματα για την φθορά των κοπτικών εργαλείων είναι ο σχεδιασμός, η εκτέλεση και η ανάλυση αποτελεσμάτων στατιστικών πειραμάτων (designed experiments). Σκοπός των πειραμάτων είναι η επιβεβαίωση υποθέσεων ή η διερεύνηση σχέσεων μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του εξεταζόμενου συστήματος που επηρεάζουν έμμεσα την φθορά του κοπτικού εργαλείου [2].

1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης μεταλλικού υλικού

Οι εργαλειομηχανές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη υπάγονται αυτές που κατεργάζονται ελάσματα, ενώ στη δεύτερη αυτές που διαμορφώνουν τεμάχια. Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται οι τόρνοι, οι φρέζες και οι πλάνες. Οι εργαλειομηχανές αυτές είναι πολύ σημαντικές για τη βιομηχανία και τις κατασκευές γιατί κατορθώνουν να δώσουν μια επιθυμητή μορφή σε μια ακανόνιστη και ακατέργαστη μάζα μετάλλου. Οι τόρνοι και οι φρέζες μάλιστα έχουν συμπεριλάβει στη λειτουργία τους όλες τις «πλούσιες» δυνατότητες που έδωσε στις εργαλειομηχανές η εξέλιξη του αριθμητικού ελέγχου και των συστημάτων CNC.

Για την μηχανουργική κατεργασία αφαίρεσης μεταλλικού υλικού υπάρχει μεγάλη ποικιλία ειδών εργαλειομηχανών και επιπλέον πληθώρα τύπων σε κάθε είδος. Ο διαχωρισμός των εργαλειομηχανών γίνεται σύμφωνα με τη βασική κατεργασία κοπής για την οποία η κάθε μια από αυτές είναι μελετημένη, σχεδιασμένη και κατασκευασμένη. Επομένως, υπάρχουν οι εργαλειομηχανές τόρνου για την τόρνευση, οι εργαλειομηχανές φρέζας για το φρεζάρισμα και οι εργαλειομηχανές δράπανου για τη διάτρηση.

Μια εργαλειομηχανή αποτελείται από δομικά στοιχεία, από στοιχεία μετάδοσης κίνησης, από εξαρτήματα προσδέσεων των εργαλείων κοπής και του κομματιού και από στοιχεία ελέγχου των λειτουργιών. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί μια εργαλειομηχανή αφαίρεσης μεταλλικού υλικού είναι να παρέχει την απαραίτητη για την κατεργασία ισχύ, να διαθέτει μέσα για την στερεά και ασφαλή συγκράτηση του κοπτικού εργαλείου και του κομματιού, να εκτελεί και να ελέγχει τις απαραίτητες κινήσεις κατά την κοπή, να επιτυγχάνει μεγάλη διαστατική ακρίβεια και να είναι αξιόπιστη και οικονομική.

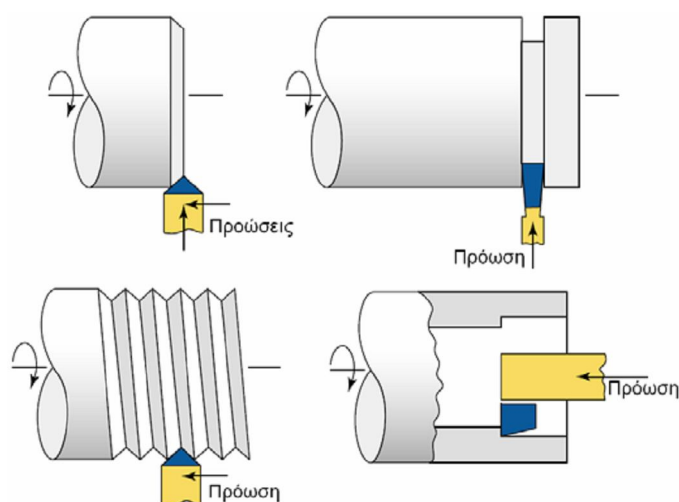
Ο έλεγχος της εργαλειομηχανής έχει εξελιχθεί και εκτελείται πλέον μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αυτές οι εργαλειομηχανές ονομάζονται ψηφιακά καθοδηγούμενες με ηλεκτρονικό υπολογιστή (Computerized Numerical Control - CNC). Οι εργαλειομηχανές CNC περιέχουν λογικά κυκλώματα που μπορούν να πραγματοποιήσουν την κίνηση του εργαλείου κοπής και του κομματιού, σύμφωνα με αριθμητικές εντολές ενός κώδικα. Οι εντολές του κώδικα περιέχουν συντεταγμένες για την κίνηση του εργαλείου και του κομματιού, όπως επίσης και πληροφορίες για τον έλεγχο των συστημάτων της εργαλειομηχανής, όπως είναι η ταχύτητα περιστροφής, η χρήση του ψυκτικού υγρού και η αλλαγή του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή οι κατεργασίες αυτοματοποιούνται, ο

έλεγχος λαμβάνει χώρα από απόσταση, επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων σε πολλές επαναλήψεις, παρέχεται η δυνατότητα διόρθωσης των εντολών του κώδικα, καθώς επίσης μειώνεται ο χρόνος παραγωγής και το κόστος. Επίσης, η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή επιτρέπει την προσομοίωση της κατεργασίας, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα λαθών στην κίνηση και την λειτουργία της εργαλειομηχανής κατά την διάρκεια της πραγματικής κατεργασίας.

Η εξέλιξη των εργαλειομηχανών CNC οδήγησε στην δημιουργία κέντρων κατεργασίας. Τα κέντρα κατεργασίας είναι εργαλειομηχανές CNC, οι οποίες υποστηρίζουν πολλά είδη κατεργασίας, συνήθως φρεζάρισμα, διάτρηση και τόννευση. Η ευελιξία των κέντρων κατεργασίας επιτρέπει την αντικατάσταση ενός αριθμού ξεχωριστών εργαλειομηχανών από μία, παρέχοντας αύξηση της παραγωγικότητας, βελτίωση της ακρίβειας, ταχύτερη κατασκευή και μείωση του κόστους. Έτσι, μπορούν να εκτελεστούν όλες οι απαραίτητες κατεργασίες σε ένα κομμάτι, με μόνο ένα στήσιμο της μηχανής [3,4].

1.2.1 Εργαλειομηχανές τόννευσης

Η τόννευση είναι μια κατεργασία αφαίρεσης μετάλλου για την παραγωγή κυλινδρικών επιφανειών παράλληλα ή κάθετα με τον άξονα του κομματιού. Η πρωτεύουσα κίνηση δίνεται στο κομμάτι, το οποίο συγκρατείται σε ένα περιστρεφόμενο σφιγκτήρα και η κίνηση προώσεως δίνεται στο εργαλείο κοπής, το οποίο προωθείται ακτινωτά, αξονικά ή και με τους δύο τρόπους ταυτόχρονα, για να παράγει την επιθυμητή επιφάνεια. Το κοπτικό εργαλείο έρχεται σε επαφή με το κομμάτι μόνο με ένα σημείο του, για αυτό το λόγο ονομάζεται κοπτικό εργαλείο ενός σημείου.



Σχήμα 1.1: Διάφορες κατεργασίες τόννου.

Η πολυπλοκότερη παράμετρος των συνθηκών κοπής κατά την τόννευση είναι η διατήρηση σταθερής ταχύτητα κοπής. Για να είναι σταθερή η ταχύτητα κοπής κατά

την πρόωση του εργαλείου κάθετα στον άξονα του κομματιού, θα πρέπει να είναι ανάλογη της διαμέτρου, δηλαδή να μειώνεται καθώς η μύτη του εργαλείου πλησιάζει τον άξονα του κομματιού.



Σχήμα 1.2: Παράδειγμα τόννευσης.

1.2.2 Εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος

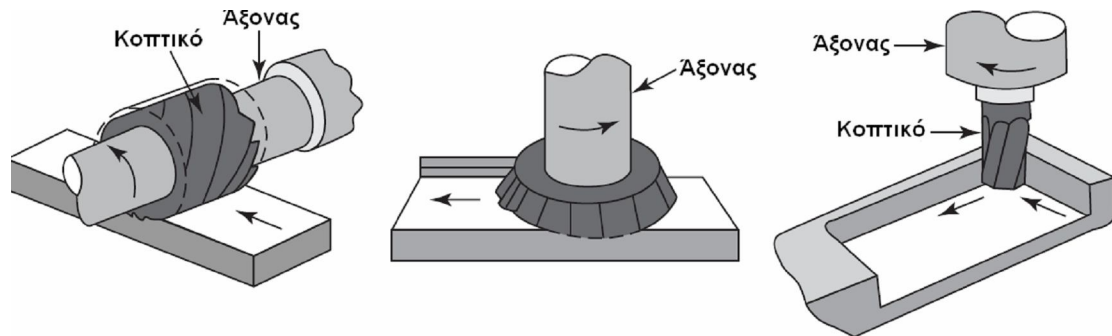
Το φρεζάρισμα είναι μια κατεργασία αφαίρεσης μεταλλικού υλικού όπου, ανάλογα με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής στους άξονες περιστροφής του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου, μπορούν να παραχθούν πολύπλοκες γεωμετρίες. Η πρωτεύουσα κίνηση δίδεται στο κοπτικό εργαλείο, το οποίο διαθέτει πολλές κύριες κόψεις ή δόντια, ενώ στο κομμάτι δίνεται η κίνηση προώσεως. Η διατομή του αποβλήτου μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου κοπής του κάθε δοντιού, καθώς κάθε δόντι δεν κόβει συνεχώς αλλά μόνο όταν έρχεται σε επαφή με το κομμάτι κατά την περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 1.3: Παράδειγμα φρεζαρίσματος.

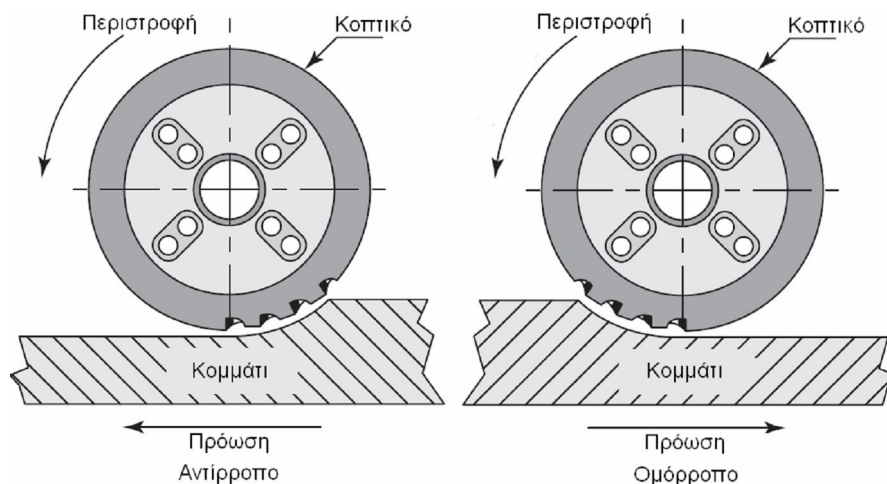
Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος διακρίνονται σε περιφερικό, μετωπικό και στο φρεζάρισμα με κονδύλι. Με το μετωπικό φρεζάρισμα κατεργάζονται επιφάνειες

κάθετες προς τον άξονα του κοπτικού εργαλείου, το οποίο διαθέτει δόντια με κόψεις περιφερειακά και μετωπικά. Με το περιφερικό φρεζάρισμα κατεργάζονται επίπεδες επιφάνειες παράλληλες προς τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, το οποίο διαθέτει δόντια με κόψεις μόνο περιφερειακά. Στο φρεζάρισμα με κονδύλι κατεργάζονται διάφορες επιφάνειες μετωπικές ή περιφερικές, καθώς το κοπτικό εργαλείο διαθέτει τη γεωμετρία του περιφερικού εργαλείου, με κάθετη διεύθυνση προς το κομμάτι, όπως στο μετωπικό φρεζάρισμα (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος, περιφερικό, μετωπικό και με κονδύλι.

Κατά την κατεργασία φρεζαρίσματος η κίνηση προώσεως του κομματιού μπορεί να είναι αντίρροπη ή ομόρροπη προς την πρωτεύουσα περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Αντίρροπο και ομόρροπο φρεζάρισμα.

Στο αντίρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται αντίθετα από την διεύθυνση της πρόωσης καθώς το κομμάτι κινείται προς το εργαλείο από την μεριά όπου τα δόντια κινούνται προς τα πάνω. Το πάχος του απόβλητου στην αρχή της κοπής του ενός δοντιού είναι το μικρότερο δυνατό και σταδιακά αυξάνεται, όπου στο τέλος της κοπής του ενός δοντιού είναι το μεγαλύτερο δυνατό. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται από το κατεργαζόμενο κομμάτι να έχει τραχιά

επιφάνεια, ώστε να αυξάνεται η ζωή του εργαλείου, καθώς τα δόντια έρχονται σε επαφή με το κομμάτι κάτω από την επιφάνεια του κομματιού.

Στο ομόρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται σύμφωνα με την διεύθυνση της πρόωσης του κομματιού προς κατεργασία. Το κομμάτι έρχεται σε επαφή με το εργαλείο από την μεριά που τα δόντια κινούνται προς τα κάτω. Το απόβλητο στην αρχή της κοπής του ενός δοντιού είναι το μεγαλύτερο δυνατό και σταδιακά μειώνεται στο μικρότερο δυνατό στο τέλος της κοπής του ενός δοντιού. Το ομόρροπο φρεζάρισμα χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, γιατί αποδίδει καλύτερες επιφάνειες και μεγαλύτερη ζωή του εργαλείου.

1.2.3 Εργαλειομηχανές διάτρησης

Η διάτρηση είναι μια γρήγορη και οικονομική μέθοδος για την διάνοιξη κυλινδρικών οπών ή τη διεύρυνση και μορφοποίηση υπαρχόντων οπών με ελικοειδές κοπτικό εργαλείο. Η πρωτεύουσα κίνηση και η κίνηση προώσεως δίνεται συνήθως στο κοπτικό εργαλείο. Πάνω στους έλικες του εργαλείου ρέει το απόβλητο, το πάχος του οποίου είναι ίσο με το μήκος της λωρίδας του εργαλείου που εισχωρεί στο αντικείμενο. Οι κατεργασίες δημιουργίας οπών μπορούν να εκτελεστούν και από τις εργαλειομηχανές τόννευσης και φρεζαρίσματος. Η επαφή του εργαλείου στο κομμάτι είναι συνεχής έως ότου τελειώσει η κατεργασία, το οποίο σημαίνει σταθερές δυνάμεις και θερμοκρασίες. Για αυτό το λόγο, η διάτρηση είναι παρόμοια με την τόννευση.

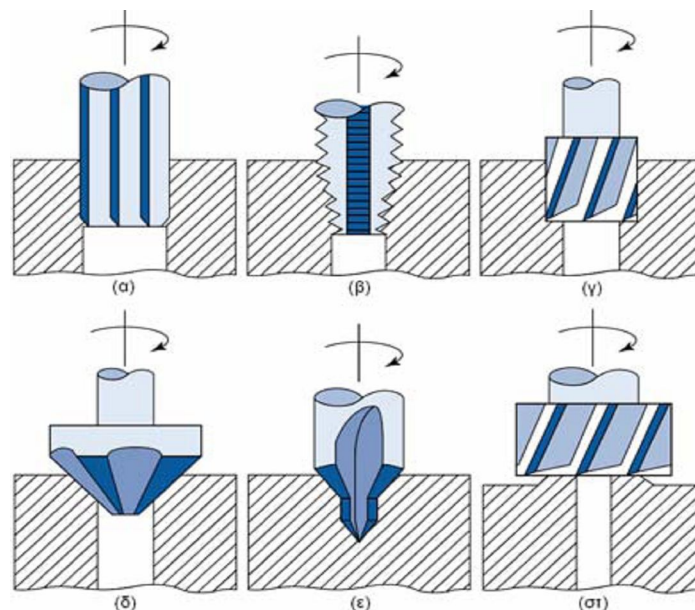
Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή στην κατεργασία της διάτρησης είναι το δράπανο. Στη βασική του μορφή το δράπανο αποτελείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων μεταδίδει περιστροφική κίνηση σε έναν άξονα συνήθως κατακόρυφο. Στο κατώτερο σημείο του άξονα υπάρχει ένα σύστημα πρόσδεσης του κοπτικού εργαλείου, το οποίο ονομάζεται τσοκ. Ο άξονας του δραπάνου εκτός από την περιστροφική κίνηση, έχει επίσης τη δυνατότητα να κινείται κατακόρυφα ρυθμίζοντας το βάθος της οπής που δημιουργείται από την κίνηση του κοπτικού εργαλείου (Σχήμα 1.6α) [5].

Βέβαια για την αυτοματοποιημένη διάτρηση οπών χρησιμοποιούνται στις μέρες μας τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας (Σχήμα 1.6β), τα οποία έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης διαφόρων σύνθετων κατεργασιών. Διαθέτουν εργαλειοφορείς για την αυτόματη τοποθέτηση και αποθήκευση των κοπτικών εργαλείων (Σχήμα 1.6γ), επιταχύνοντας τη διαδικασία μετάβασης από μια κατεργασία στην άλλη.



Σχήμα 1.6: (α) Σύγχρονο χειροκίνητο δρέπανο, (β) κάθετο κέντρο κατεργασίας CNC, (γ) αυτόματος τροφοδότης κοπτικών εργαλείων.

Για την μορφοποίηση υπαρχόντων οπών χρησιμοποιούνται οι κατεργασίες γλύφανσης, εμβάθυνσης, σπειρώματος, κεντραρίσματος και ισοπέδωσης του άκρου οπής. Η γλύφανση χρησιμοποιείται για την αύξηση της διαμέτρου μιας οπής, αποδίδοντας λεία τελική εσωτερική επιφάνεια. Η σπειροτόμηση χρησιμοποιείται για την δημιουργία εσωτερικού σπειρώματος στην οπή. Με την εμβύθιση παράγεται μεγαλύτερη διάμετρος στην αρχή της οπής, για την τοποθέτηση της κεφαλής του κοχλία. Παραλλαγή της κατεργασίας εμβύθισης είναι η εμβύθιση με γωνία, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή απαιτούμενων κλίσεων για την τοποθέτηση γωνιακών κεφαλών κοχλίας. Το κεντράρισμα χρησιμοποιείται πριν την κατασκευή της οπής, δημιουργώντας ένα σημείο ώστε το εργαλείο να κεντραριστεί. Η ισοπέδωση του άκρου της οπής χρησιμοποιείται για την δημιουργία επίπεδης επιφάνειας πάνω από την οπή (Σχήμα 1.7).

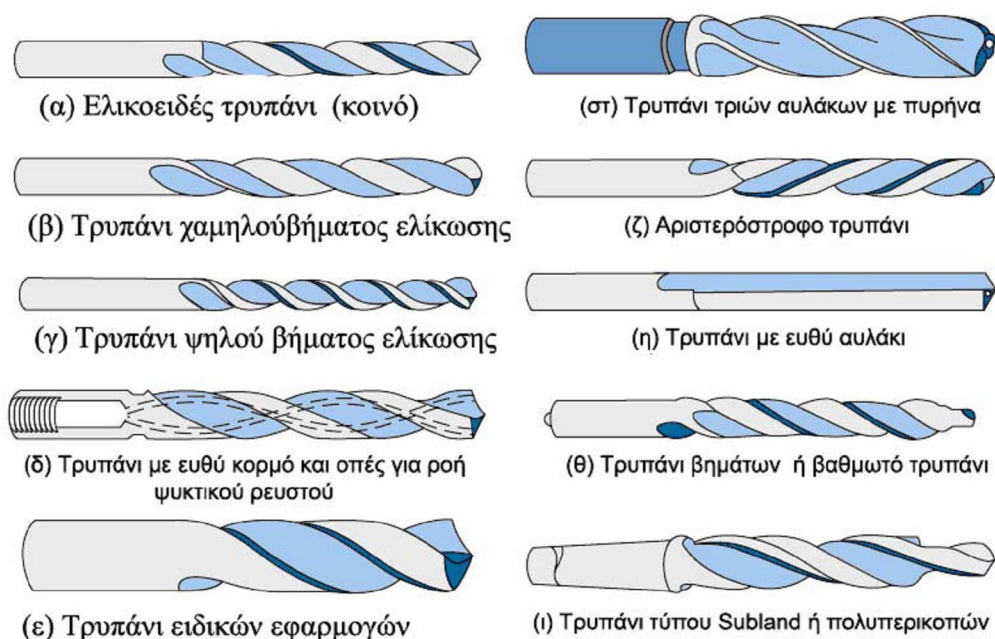


Σχήμα 1.7: Κατεργασίες διάτρησης γλύφανση, σπειροτόμηση, εμβύθιση, εμβύθιση με γωνία, κεντράρισμα, ισοπέδωση του άκρου οπής.

1.3 Κοπτικά εργαλεία διάτρησης

Τρύπανο ή Τρυπάνι (*Drill*): Το τρυπάνι είναι ένα κοπτικό εργαλείο για την δημιουργία οπών. Έχει παραπάνω από μία κοπτικές ακμές (ή κόψεις) και αυλάκια για να επιτρέπουν στα διάφορα κοπτικά υγρά να εισέρχονται στην οπή που δημιουργείται και την απομάκρυνση των αποβλήτων (γρέζια ή τσιπς) που δημιουργούνται κατά την κοπή. Έχει το σχήμα κυλινδρικής ράβδου και αποτελείται κυρίως από το στέλεχος, τον κορμό και τις κοπτικές ακμές.

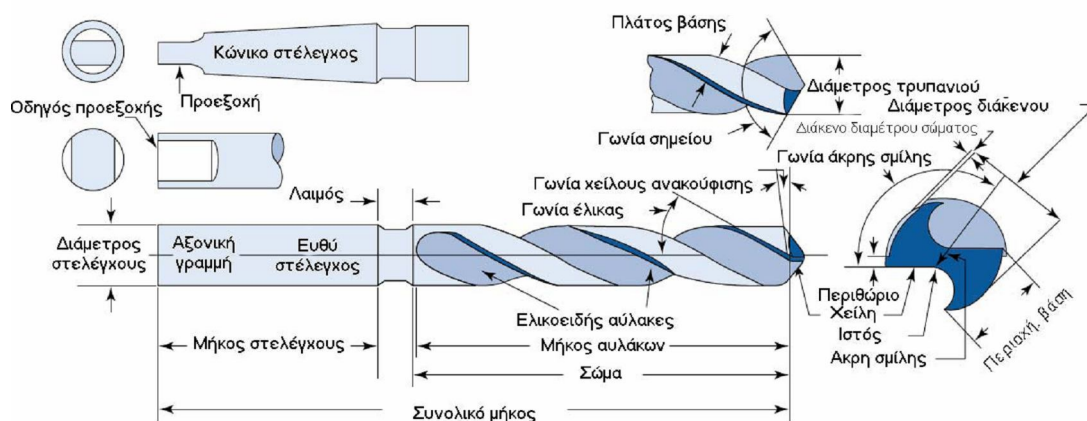
Με την εξέλιξη των κατεργασιών, εξελίχθηκαν ταυτόχρονα και τα κοπτικά εργαλεία. Η διαρκής εξέλιξη που συνεχίζεται ακόμα και σήμερα στις μέρες μας, δημιούργησε αρκετούς τύπους τρυπανιών οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω και φαίνονται στο Σχήμα 1.8. Αξίζει να αναφερθεί ότι πρωτοπόρος στην εξέλιξη των κοπτικών εργαλείων για βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας ήταν ο Χένρι Φόρντ (*Henri Ford*).



Σχήμα 1.8: Τύποι και σχηματική απεικόνιση τρυπανιών.

Το κοινό ελικοειδές τρυπάνι έχει κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία, βάσει των οποίων συγκεκριμενοποιείται η χρήση του. Για παράδειγμα η γωνία κορυφής του (ή αλλιώς η γωνία του σημείου), μεταβάλλεται ανάλογα με το υλικό του εκάστοτε κατεργαζόμενου τεμαχίου που πρόκειται να διατρηθεί. Κατά τη κατεργασία της διάτρησης χρησιμοποιούνται πολλών μορφών τρυπάνια [6] τα οποία συνήθως διαθέτουν δύο κύριες κοπτικές ακμές (περυγία), μια ακμή κορυφής όπου

συναντώνται οι κύριες κοπτικές ακμές, καθώς και δευτερεύουσες ακμές περιφερειακά στον κύλινδρο που είναι συνήθως ελικοειδείς. Διαθέτουν επίσης αύλακες διαμέσου των οποίων απομακρύνεται το απόβλητο της κατεργασίας. Εκτός των γωνιών αποβλήτου και ελευθερίας που μεταβάλλονται κατά μήκος της κύριας κοπτικής ακμής με την απόσταση από τον άξονα του τρυπανιού, μεταβάλλεται επίσης και η ταχύτητα κοπής. Χαρακτηριστικά γεωμετρικά στοιχεία ενός τρυπανιού αποτελούν και οι γωνίες έλικος και ελευθερίας χειλέων, όπως επίσης και η γωνία της ακμής κορυφής (chisel edge angle) (Σχήμα 1.9). Επίσης βασικό ρόλο για την ορθή επιλογή τρυπανιού για κάθε κατεργάσιμο υλικό διαδραματίζει η γωνία κορυφής του τρυπανιού, η οποία για το τυπικό ελικοειδές τρυπάνι είναι ίση με 118° . Πρέπει βέβαια να σημειωθεί η μεγάλη ποικιλία τρυπανιών με αντίστοιχες μεταβολές στα παραπάνω αναφερθέντα γεωμετρικά χαρακτηριστικά: τρυπάνια με ελικοειδή ή ευθεία αυλάκια, με δύο ή τρία πτερύγια, δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα, για διάνοιξη ή διεύρυνση οπών, με αξονική οπή για τροφοδότηση με λιπαντικό (βαθιάς οπής), τύπου «φτυαριού», με μικρό ή μεγάλο βήμα έλικος, με κωνικότητα ή μη, κεντραδόροι, καθώς και πολλοί ειδικοί τύποι τρυπανιών για συγκεκριμένους κλάδους της βιομηχανίας.



Σχήμα 1.9: Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός ελικοειδούς τρυπανιού.

1.4 Τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων διάτρησης (τρυπάνια)

Η διείδυση της κόψης του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο υλικό, που με τις κατάλληλες σχετικές κινήσεις τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου έχει σαν συνέπεια την αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, συνοδεύεται από τοπική ανάπτυξη ισχυρότατων τάσεων και υψηλών θερμοκρασιών, τόσο στην κόψη του εργαλείου όσο και στο υπό κατεργασία τεμάχιο. Φυσικό επόμενο του φαινομένου αυτού είναι το κοπτικό εργαλείο να αστοχήσει. Με τον όρο αστοχία περιγράφεται η

κατάσταση κατά την οποία το κοπτικό δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τον σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούνταν. Στο κοπτικό μπορεί να επέλθει μερική ή ολική αστοχία. Ο όρος μερική αστοχία, έγκειται στην αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός μικρού τμήματος της κόψης. Ενώ ο όρος ολική αστοχία, σημαίνει απότομη και αισθητή αλλαγή των χαρακτηριστικών της κόψης [4,6].

Η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι ένα ομαλά εξελισσόμενο φαινόμενο, το οποίο είναι πάντοτε παρόν σε κάθε κατεργασία κοπής. Πιο συγκεκριμένα η φθορά των τρυπανιών είναι μια προοδευτική διαδικασία η οποία πραγματοποιείται στο εξωτερικό περιθώριο των ραβδώσεων του τρυπανιού. Παρουσιάζεται λόγω της άμεσης επαφής και των υψηλών θερμοκρασιών στην επαφή κοπτικού εργαλείου – προς κατεργασία κομματιών. Εντούτοις, κάτω από σταθερές συνθήκες κοπής, η αστοχία τρυπανιών είναι μια πιθανολογική (στοχαστική) διαδικασία. Αυτό οφείλεται στις ανομοιογένειες των υλικών των προς κατεργασία κομματιών και των τρυπανιών, στη μη ομαλή κοπτική κίνηση και στην αναπόφευκτη ασυμμετρία των τεμνόμενων άκρων κατά τη διάρκεια της λείανσης.

Σε κάθε παραγωγική διαδικασία η απότομη και απροειδοποίητη καταστροφή του κοπτικού εργαλείου, που οδηγεί σε θραύση ή και κατά δεύτερο λόγο σε πλαστική παραμόρφωση, είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί υπερβολικό κόστος κατεργασίας, αδικαιολόγητη μείωση της ποιότητας κατεργασίας και άλλες απρόβλεπτες ζημιές. Έτσι προτιμάται σαν κριτήριο αστοχίας μια μέγιστη αποδεκτή τιμή του μεγέθους της φθοράς του κοπτικού.

Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά κοπτικών εργαλείων είναι πολλοί και διαφέρουν ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες κοπής, καθώς και με το ζεύγος υλικών τεμαχίου-εργαλείου. Παρόλα αυτά, τέσσερις από αυτούς είναι καθοριστικοί:

- Η σκληρότητα του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο και μάλιστα σε υψηλή θερμοκρασία (όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μικρότερη είναι η φθορά του εργαλείου).
- Η τάση που εμφανίζουν τα υλικά τεμαχίου – εργαλείου για «συγκόλληση» με διάφορους φυσικο-χημικούς μηχανισμούς (όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η φθορά του εργαλείου). Με αυτή την τάση συνδέεται και η δημιουργία ψευδο-ακμής (Built-up Edge) που αρχίζει με την προσκόλληση στρώματος υλικού του τεμαχίου στην ακμή κοπής, συνεχίζεται με την απόθεση νέων στρωμάτων (αυξημένης σκληρότητας σε σχέση με το τεμάχιο), τα οποία κάποια στιγμή θραύονται σε κομμάτια, ένα ποσοστό από τα οποία προσκολλώνται στην κατεργασμένη επιφάνεια και την καταστρέφουν. Η ψευδοακμή αλλάζει τη γεωμετρία του εργαλείου. Μειώνεται με την αύξηση

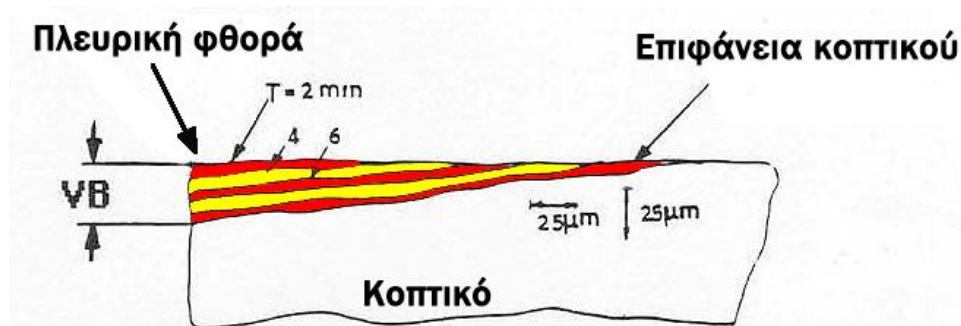
της ταχύτητας, την αύξηση της γωνίας αποβλήτου, τη χρήση υγρού κοπής και την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της κορυφής του εργαλείου.

- Η θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, έτσι ώστε στην ιδανική περίπτωση να απάγεται εύκολα η θερμότητα.
- Οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής) της κατεργασίας.

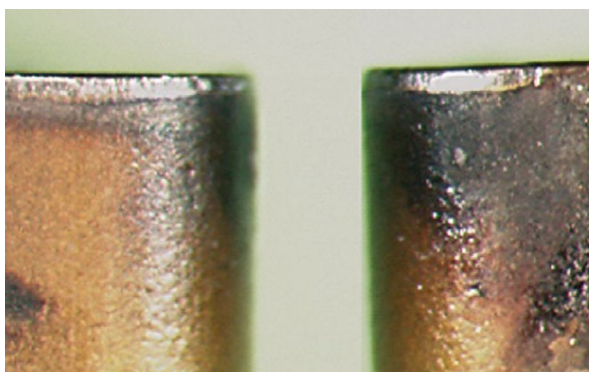
Παρακάτω αναλύονται οι τέσσερις βασικοί τύποι φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

1.4.1 Πλευρική φθορά (Flank Wear)

Η πλευρική φθορά αναπτύσσεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας (Σχήμα 1.10). Οφείλεται στην ολίσθηση / τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης (Adhesion) και διάβρωσης / τριβής (Abrasion), που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής. Η πλευρική φθορά προκαλεί σταδιακή μείωση του βάθους κοπής. Συνήθως η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσης πλευρικής φθοράς VB [6].



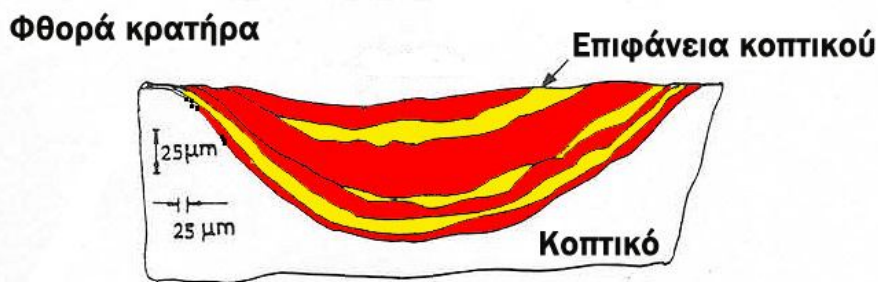
Σχήμα 1.10: Ανάπτυξη πλευρικής φθοράς στα κοπτικά εργαλεία.



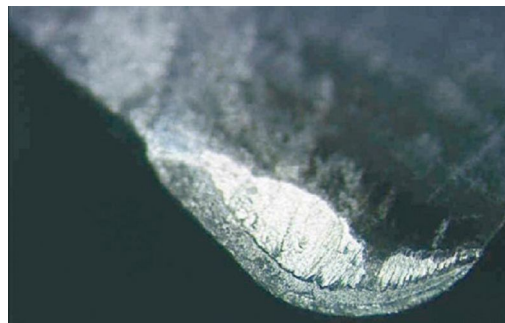
Σχήμα 1.11: Απεικόνιση πλευρικής φθοράς.

1.4.2 Φθορά κρατήρα (Crater Wear)

Η φθορά κρατήρα εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία αποβλήτου [6] (Σχήμα 1.12). Σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως και οι μηχανικές τάσεις κατά την κοπή. Μέγιστη φθορά παρατηρείται μάλιστα στο σημείο όπου η θερμοκρασία κατά την κοπή είναι μέγιστη. Η φθορά κρατήρα μπορεί να αυξήσει τη γωνία εργασίας και να μειώσει τη δύναμη κοπής. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη παράμετρος για να μετρηθεί η φθορά κρατήρα είναι το βάθος κρατήρων.



Σχήμα 1.12: Ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στα κοπτικά εργαλεία.



Σχήμα 1.13: Απεικόνιση φθοράς κρατήρα.

1.4.3 Αποκολλήσεις (Chipping)

Η σμίλευση του εργαλείου περιλαμβάνει την αφαίρεση των σχετικά μεγάλων ιδιαίτερων μορίων του υλικού εργαλείων. Τα εργαλεία που υποβάλλονται σε ασυνεχείς κοπτικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε σμίλευση. Οι αποκολλήσεις κατηγοριοποιούνται περισσότερο στη μικροθραύση του κοπτικού παρά στη συμβατική φθορά. Ο σχηματισμός ψευδοακμής έχει επίσης μια τάση να προκαλεί τη σμίλευση εργαλείων. Μια ψευδοακμή δεν είναι ποτέ απολύτως σταθερή και επομένως κάθε φορά που αφαιρούνται μερικά κομμάτια από το υλικό της, υπάρχει πιθανότητα να παρασύρουν και κομμάτια της άκρης εργαλείων.

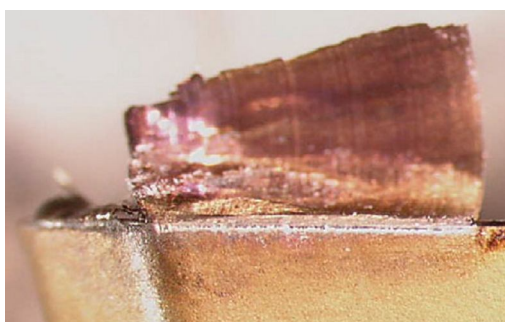
Οι αποκολλήσεις όταν συμβαίνουν μικροσκοπικά emπίπτουν στη φθορά, ενώ όταν συμβαίνουν μακροσκοπικά emπίπτουν στην καταστροφική θραύση του κοπτικού εργαλείου [4].



Σχήμα 1.14: Απεικόνιση φθοράς λόγω αποκολλήσεων.

1.4.4 Φθορά λόγω ψευδοακμής

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλήτου (γρεζιού), υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδοακμή [4,7]. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15. Η ψευδοακμή δημιουργείται από αλεπάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου τα οποία προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 1.15: Απεικόνιση φθοράς λόγω ψευδοακμής.

Η ύπαρξη της ψευδοακμής μειώνει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδοακμής να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, καθώς κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του εργαλείου, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η ψευδοακμή να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλήτου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδοακμής μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Έτσι το μέγεθος της ψευδοακμής μειώνεται αν :

- αυξηθεί η ταχύτητα κοπής,
- χρησιμοποιηθεί εργαλείο με μεγαλύτερη γωνία αποβλήτου,
- μειωθεί η χρησιμοποιούμενη πρόωση,
- χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υγρό κοπής.

1.5 Διάρκεια ζωής των κοπτικών

Παρόλο που θεωρητικά το κοπτικό εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι να αστοχήσει τελείως, είναι σκόπιμο να αντικαθιστάται ή να απομακρύνεται για ανατροχίση πριν ακόμη εμφανιστούν τα πρώτα αποτελέσματα της μερικής αστοχίας.

Με στόχο τον προσδιορισμό του κατάλληλου κατά περίπτωση χρόνου απομάκρυνσης του κοπτικού εργαλείου, έχει καθιερωθεί η έννοια της «διάρκειας ζωής» του κοπτικού εργαλείου. Στην κυριολεξία ο όρος «διάρκεια ζωής» ή απλά «ζωή» του κοπτικού εργαλείου δηλώνει, ή γενικότερα αντιστοιχεί, στον ωφέλιμο χρόνο χρήσης ενός κοπτικού εργαλείου από την έναρξη της χρησιμοποίησής του, μέχρι την στιγμή της επόμενης απομάκρυνσης του με την αιτιολογία της ακαταλληλότητας προς περαιτέρω χρήση [4].

Η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων προσδιορίζεται από την εξίσωση του F. W. Taylor [5,8]:

$$VT^n = \text{Constant} \quad (1.1)$$

όπου V η ταχύτητα κοπής, T η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και Constant μια σταθερά.

Τα τελευταία χρόνια ο B. K. Srinivas μετά από πειράματα που εκτέλεσε, προτείνει τη σχέση:

$$c = kT^n s^a d^b \quad (1.2)$$

όπου k σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό και τη γεωμετρία του, n, a, b εκθέτες προσδιοριζόμενοι κατόπιν πειραμάτων. Οι εκθέτες n, a, b που προτείνει ο B. K. Srinivas, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Προτεινόμενοι εκθέτες υπολογισμού διάρκειας ζωής, κατά B. K. Srinivas.

	a	n	b
Καρβίδιο WC	-0.30	-0.31	-0.15
Καρβίδιο με επικάλυψη TiC	-0.27	-0.43	-0.13
Καρβίδιο Tic	-0.31	-0.41	-0.23
Νιτρίδια	-0.38	-0.40	-0.17
Al ₂ O ₃	-0.38	-0.48	-0.12

1.6 Έλεγχος φθοράς κοπτικών εργαλείων

Σήμερα οι διαδικασίες κοπής διαδραματίζουν έναν τεράστιο ρόλο για την οικονομία των αναπτυσσόμενων χωρών. Η διάτρηση είναι μία κατεργασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των περισσότερων από τα βιομηχανικά αγαθά. Σημαντικοί κατασκευαστές αυτοματοποιούν πολλές διαδικασίες στο περιβάλλον κατεργασίας προκειμένου να μειωθούν οι δαπάνες της παραγωγής.

Η αυτόματη διαδικασία ανίχνευσης της φθοράς εργαλείων είναι πολύ σημαντική στην επίτευξη της βελτίωσης της κατασκευής. Η αποδοτική τεχνική ανίχνευσης της φθοράς απαιτείται για την παρεμπόδιση πιθανής ζημίας στο κατεργαζόμενο κομμάτι αλλά και στην εργαλειομηχανή. Γι' αυτόν τον λόγο τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων παρακολούθησης και συστημάτων. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται στον εντοπισμό των δυνάμεων κοπής (Cutting Forces), των ακουστικών εκπομπών (Acoustic Emissions) και των δονήσεων (Vibrations). Ο στόχος στην εφαρμογή του ελέγχου της φθοράς εργαλείων είναι να αυξηθεί η παραγωγικότητα και να μεγιστοποιηθεί η ζωή των εργαλείων, ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής των μηχανών, και αποτρέποντας έτσι τις ζημιές που μπορεί να προκληθούν [9].

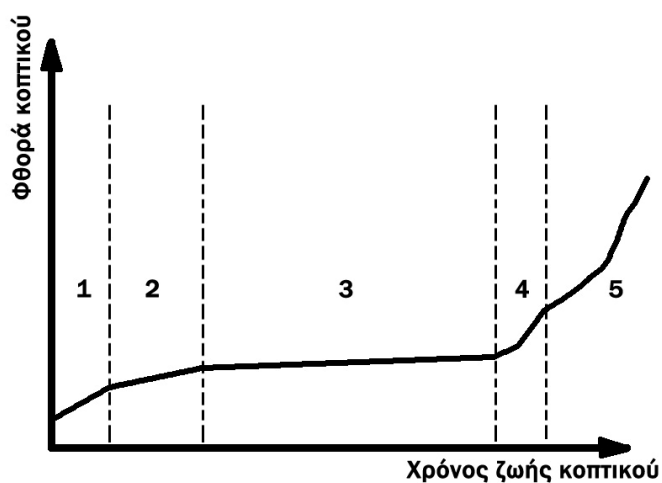
Ο αριθμός των εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων παρακολούθησης είναι πολύ μικρός. Οι τιμές τους συνήθως είναι πολύ υψηλές λόγω της πολυπλοκότητας του υλικού και των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελούνται. Επίσης, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται περιορίζουν την αξιοπιστία τους. Ο στόχος των ερευνών που γίνονται είναι να αναπτυχθεί και να υλοποιηθεί ένα σχετικώς φθινό και συνάμα αξιόπιστο σύστημα παρακολούθησης κατάστασης των κοπτικών εργαλείων για CNC τόνους και φρέζες [10].

Συγκεκριμένα η φθορά των εργαλείων διάτρησης (τρυπάνια) είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Η διαδικασία της διάτρησης διαφέρει σημαντικά από τις κατεργασίες της τόννευσης και του φρεζαρίσματος [11]. Η βασική της διαφορά, σε

σχέση με τις άλλες κατεργασίες, είναι ότι η διάτρηση είναι μια πολύπλοκη τρισδιάστατη διαδικασία αφαίρεσης υλικού, σε αντίθεση με την σχετικά απλή ορθογώνια και κεκλιμένη κοπή. Επίσης τα τρυπάνια έχουν μεγάλες διαφορές στα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, σε σχέση με τα κοπτικά εργαλεία της τόννευσης και του φρεζαρίσματος. Συνήθως έχουν πολύ μεγαλύτερο μήκος από τα κοπτικά της τόννευσης και μικρότερη διατομή από αυτά του φρεζαρίσματος. Μια άλλη βασική διαφορά είναι ότι στα κοπτικά της διάτρησης είναι αναγκαία η εισχώρηση μεγάλου μέρους του κοπτικού στο κατεργαζόμενο κομμάτι, σε αντίθεση με τα κοπτικά της τόννευσης και του φρεζαρίσματος, τα οποία επεξεργάζονται επιφανειακά.

Λόγω των προσκολλημένων υλικών στις κοπτικές ακμές των τρυπανιών κατά τη διαδικασία της διάτρησης, η ανίχνευσή πολλών από τους παραπάνω τύπους φθοράς είναι αρκετά δύσκολη. Επίσης έχει αναγνωριστεί ότι στην αρχή της διάτρησης, η φθορά είναι μία επιταχυνόμενη διαδικασία που πραγματοποιείται στο εξωτερικό περιθώριο των αυλακώσεων του τρυπανιού, λόγω της επαφής του με το κομμάτι καθώς και λόγω της συνεχώς αυξανόμενης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην περιοχή της διάτρησης [12].

Η φθορά εξελίσσεται σε 5 περιόδους (Σχήμα 1.16). Τα περισσότερα τρυπάνια κατά την κατασκευή τους, παράγονται ελαφρώς ασύμμετρα. Έτσι κατά τα πρώτα λεπτά λειτουργίας τους, οι δύο γωνίες τους φθείρονται βαθμιαία μέχρι να προκύψει στη συνέχεια η συμμετρία τους. Στις επόμενες φάσεις η διαδικασία της φθοράς συνεχίζεται μέχρις ότου η απόσταση των δύο κοπτικών ακμών από το περιθώριο μηδενιστεί. Στη συνέχεια το τρυπάνι κολλάει μέσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και σπάει στην περίπτωση που δεν σταματήσει η διαδικασία διάτρησης. Επίσης η ροή των αποβλήτων δημιουργεί σημαντικές τριβές μεταξύ του τρυπανιού και του κομματιού κατεργασίας. Οι τριβές αυτές αλλάζουν την δυναμική του συστήματος, προκαλώντας θραύση του κοπτικού [13].



Σχήμα 1.16: Τα πέντε στάδια εξέλιξης της φθοράς στα κοπτικά εργαλεία.

Αναφέρεται ότι σε τρυπάνια μικρότερης διαμέτρου από 3 mm υπάρχει η τάση της θραύσης, ενώ σε μεγαλύτερης διαμέτρου η αστοχία οφείλεται στην υπερβολική φθορά [12].

1.7 Μέθοδοι ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων

Μετά από πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχει δοκιμασθεί και χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη ποικιλία από μεθόδους ελέγχου, για την παρακολούθηση της φθοράς κοπτικών εργαλείων. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις μεθόδων ελέγχου: i) οι άμεσες και ii) οι έμμεσες μέθοδοι [14].

Οι άμεσες μέθοδοι μετρούν τη φθορά άμεσα (όπως αυτή αναπτύσσεται), βασισμένες στην οπτική επιθεώρηση ή στην όραση με τη χρήση υπολογιστών (Computer Vision). Ωστόσο, λόγω του αυξημένου κόστους τους καθώς και των μη τεχνολογικά προηγμένων μεθόδων, δεν είναι δυνατή η βιομηχανική τους χρήση. Επομένως δεν γίνεται επιμέρους μελέτη αυτών στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Στις έμμεσες μεθόδους μέτρησης φθοράς, η μέτρησή δεν γίνεται απευθείας αλλά μετρώνται μεγέθη που αποτελούν συνάρτηση της φθοράς. Τέτοια μεγέθη είναι :

- Οι δονήσεις του κοπτικού εργαλείου.
- Το ρεύμα κινητήρα περιστροφής και κινητήρα πρόωσης.
- Η θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου.
- Οι δυνάμεις κοπής.
- Οι ακουστικές εκπομπές κ.α.

Υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μεθόδων ελέγχου, ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κατάστασης του κοπτικού. Μερικές από τις τεχνικές ελέγχου είναι αποτελεσματικότερες για την ανίχνευση μιας ξαφνικής αστοχίας, ενώ άλλες είναι καταλληλότερες για έλεγχο σταδιακής φθοράς. Οι δεδομένες βιομηχανικές απαιτήσεις οδηγούν στην εκπόνηση ερευνών για τη χρήση on-line ελέγχου, με αναλύσεις σε ποικίλα σήματα αισθητηρίων, όπως εκείνα της κοπτικής δύναμης, των ακουστικών εκπομπών και των δονήσεων. Ένας άλλος τρόπος on-line ελέγχου είναι η πρόσκτηση του σήματος του ρεύματος της ατράκτου εργαλειομηχανής χρησιμοποιώντας πρόσθετα αισθητήρια.

Στα συστήματα ελέγχου κατάστασης εργαλείων, μετά την πρόσκτηση του σήματος της κοπτικής δύναμης, αυτό αναλύεται στο δυναμικό και στο στατικό του

τμήμα. Το δυναμικό τμήμα του σήματος αναλύεται στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain Analysis), καθώς και στο πεδίο του χρόνου (Time Domain Analysis) για να ανιχνευθούν χαρακτηριστικά που είναι ευαίσθητα στη φθορά κοπτικών. Εντούτοις, καταστροφικότερες αστοχίες κοπτικών, όπως οι θραύσεις, παρατηρούνται καλύτερα με τη δυναμική ανάλυση σήματος. Από την άλλη, το στατικό τμήμα της δύναμης παρουσιάζει ένα καλό συσχετισμό μεταξύ της τριβής και της φθοράς. Ωστόσο, δεν είναι ευαίσθητο μόνο στη φθορά, αλλά και σε άλλες παραμέτρους, όπως στις συνθήκες κατεργασίας. Επομένως, γίνονται έρευνες και με τις δύο αναλύσεις: του δυναμικού σήματος και του στατικού σήματος της κοπτικής δύναμης.

Στην πραγματικότητα, η δόνηση, ο ήχος, οι υπέρηχοι και οι ακουστικές εκπομπές είναι στο σύνολό τους μετρήσεις δόνησης, αν και το φάσμα συχνότητας σε κάθε μια από αυτές διαφέρει. Επιπρόσθετα, ο ήχος είναι αερομεταφερόμενη δόνηση όταν όλες οι άλλες είναι μηχανικές δονήσεις της δομής.

Ο σημαντικότερος ερευνητικός στόχος για τον έλεγχο της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων είναι η ανάπτυξη αυτορρυθμιζόμενων και ενσωματωμένων συστημάτων που θα μπορούν να ελέγχουν κάτω από διάφορες συνθήκες, με ελάχιστη επίβλεψη χειριστών. Ο σκοπός του αυτοματοποιημένου ελέγχου είναι [15]:

- η συσχέτιση του επεξεργασμένου σήματος με την κατάσταση του κοπτικού εργαλείου,
- η ανίχνευση και η πρόβλεψη της αστοχίας του κοπτικού εργαλείου.

Στην περίπτωση των μετρητικών τεχνικών, αρκετές τεχνικές ανάλυσης σημάτων έχουν εξεταστεί για τον έλεγχο της φθοράς. Κατά την κατεργασία υπάρχουν πολλές διαταραχές και η διαδικασία πρέπει να οργανωθεί, χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους. Έτσι, απαιτείται ανάλυση του σήματος για το διαχωρισμό της επιθυμητής πληροφορίας από το υπόλοιπο σήμα, τον «θόρυβο». Τα τελευταία χρόνια, καταγράφηκε αρκετή προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθόδων αυτοματοποιημένης διάγνωσης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και την ένταξη τους στα αυτόματα συστήματα παραγωγής. Ειδικότερα, η χρήση ποικίλων τύπων νευρωνικών δικτύων (Neural Networks, NN) έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον [14].

Ένας σημαντικός λόγος για να μετρηθεί η ταχύτητα κοπής και ο ρυθμός πρόωσης του κοπτικού εργαλείου είναι η χρήση τους –ως παραμέτρων– στα προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου. Ροπή, κλίση και δύναμη πρόωσης μαζί με την μέτρηση μηχανικής τάσης είναι όλα μετρήσεις των κοπτικών δυνάμεων και αντιμετωπίζονται από κοινού σε μελέτες. Τέλος, τα ρεύματα του κινητήρα της ατράκτου και του κινητήρα πρόωσης, συσχετίζονται επίσης έντονα με τις δυνάμεις.

Με χρήση κατάλληλων αισθητηρίων, μπορεί να γίνει πρόσκτηση σημάτων ακουστικών εκπομπών. Εντούτοις, τα σήματα αυτά, όπως το στατικό τμήμα των σημάτων κοπτικής δύναμης, είναι ευαίσθητα και σε άλλες παραμέτρους της εκάστοτε κατεργασίας. Το γεγονός ότι δεν εξαρτώνται μόνο από την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων κάνει την ανάλυση των σημάτων μάλλον δυσκολότερη από την πρόσκτησή τους.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα αναλυθούν εκτενέστερα οι Μηχανικές Δονήσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της διάτρησης και η θερμοκρασία στην περιοχή κοπής με υπέρυθρο πυρόμετρο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτές είναι δύο από τις έμμεσες μεθόδους μέτρησης φθοράς κοπτικών εργαλείων.

1.7.1 Μηχανικές Δονήσεις

Η λεπτομερής ανάλυση του σήματος δόνησης, το οποίο παράγεται κατά τη διάτρηση, παρέχει πολλές πληροφορίες για την κατάστασή του τρυπανιού (και γενικότερα των κοπτικών εργαλείων). Τα σήματα δόνησης περιέχουν πληροφορίες για τις φυσικές συχνότητες [15]:

- του προς κατεργασία αντικειμένου,
- των εξαρτημάτων,
- της ίδιας της μηχανής,
- της ατράκτου.

Οι δονήσεις είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μετρητική μέθοδος στα συστήματα παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων της μηχανολογίας. Βέβαια, δεν είναι τόσο δημοφιλής στην παρακολούθηση φθοράς των κοπτικών εργαλείων της διάτρησης, λόγω του ισχυρού θορύβου που παράγεται κατά την κατεργασία. Οι μετρήσεις των δονήσεων χρησιμοποιούνται περισσότερο, από τη στιγμή που η εγκατάσταση των επιταχυνσιομέτρων έγινε ευκολότερη κοντά στην περιστρεφόμενη άτρακτο, χωρίς να είναι αναγκαίες οι μετατροπές στα μηχανικά της μέρη, στο κομμάτι κατεργασίας ή στα κοπτικά εργαλεία. Το επιταχυνσιόμετρο είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που έχει την ικανότητα να μετρά δυνάμεις επιτάχυνσης. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι στατικές, όπως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, ή δυναμικές όταν προκαλούνται – προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στην διεύθυνση της κίνησης (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, στροφές).

Οι παραγόμενες δονήσεις αλληλεπιδρούν με την ύπαρξη φθοράς, διότι αν σε ένα δυναμικό σύστημα, όπως η διάτρηση του κοπτικού εργαλείου, οι δυνάμεις κοπής

αυξηθούν, τότε και η δυναμική αντίδραση θα αυξηθεί. Βέβαια υπάρχουν αδυναμίες της μεθόδου μέτρησης φθοράς μέσω των δονήσεων, όπως η συσχέτιση των παραγόμενων δονήσεων με το υλικό κατεργασίας του κομματιού, τις συνθήκες κοπής, καθώς και τη δομή της εργαλειομηχανής.

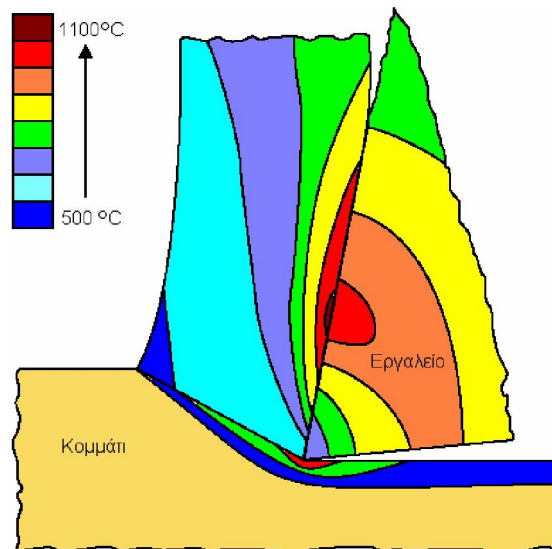
Η πρωτογενής εκτίμηση φθοράς των κοπτικών εργαλείων μέσω των σημάτων των παραγόμενων δονήσεων κατά την κατεργασία, προκύπτει από την αξιοποίηση των στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου. Χρησιμοποιείται συνήθως για τη διάγνωση της γενικής φθοράς που υπάρχει σε ένα κοπτικό εργαλείο.

Η πιο βασική τεχνική ανάλυσης δονήσεων μετασχηματίζει το σήμα, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, με χρήση των μετασχηματισμών Fast Fourier (Fast Fourier Transforms, FFT), προκειμένου να ανιχνευθούν οι ασυνήθιστες αλλαγές στις συχνότητες της δόνησης, πιθανόν λόγω φθοράς ή γρεζιών. Επίσης καθίσταται δυνατή η εύρεση του τύπου φθοράς όπως φθορά κρατήρα, πλευρική φθορά, κοπτικής ακμής και εξωτερικής πλευρικής ακμής [16].

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μέτρησης της δόνησης συνίστανται στην εύκολη εφαρμογή και στο γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία τροποποίηση στο κοπτικό εργαλείο ή στο προς κατεργασία κομμάτι. Εντούτοις, διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τον τρόπο που η μηχανική δόνηση μεταφέρεται και παράγεται στις διαφορετικές συχνότητες.

1.7.2 Υπέρυθρη Θερμογραφία

Η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος η οποία μετρούμενη παρέχει πληροφορίες, σχετικά με τη κατάσταση του κοπτικού εργαλείου. Τα κοπτικά εργαλεία λειτουργούν με αποδοτικό τρόπο σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών. Υπερβολικές μεταβολές της θερμοκρασίας, δημιουργούν προβλήματα. Τα κοπτικά εργαλεία εκπέμπουν θερμότητα, η οποία απορροφάται και επανεκπέμπεται από άλλα αντικείμενα γύρω τους. Η θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα υποδιαιρείται σε ένα αριθμό περιοχών. Η θερμική ακτινοβολία αποτελείται από την υπεριώδη (0,1 μm έως 0,4 μm), την ορατή (0,4 μm έως 0,8 μm) και την υπέρυθρη (0,8 μm έως 100 μm) περιοχή. Στα περισσότερα συστήματα οι επιφανειακές θερμοκρασίες ακτινοβολούν στην υπέρυθρη περιοχή [17].



Σχήμα 1.17: Συνήθης κατανομή θερμότητας στην ζώνη κοπής.

Η θερμογραφία είναι εκείνη η διαδικασία που μετατρέπει την υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία σε ορατή και ικανή για ερμηνεία. Η μέτρηση γίνεται χωρίς επαφή και αποτυπώνει την κατανομή της θερμοκρασίας (θερμική εικόνα) μιας επιφανείας, ασπρόμαυρα ή έγχρωμα, σε πραγματικό χρόνο. Η θερμογραφία χρησιμοποιεί μια κάμερα IR και μια οθόνη για την απεικόνιση. Στην κάμερα το σημαντικότερο κομμάτι είναι ο ανιχνευτής IR, ο οποίος είναι ένας μετατροπέας θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών στον ανιχνευτή αλλά και την μετατροπή της ενέργειας φωτονίων σε ηλεκτρική. Η ενέργεια φωτονίου είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματός του. Εφόσον υπάρχει καλύτερη ψύξη, υπάρχει ταυτόχρονα μείωση του μεγέθους, του βάρους, της ισχύος και του κόστους μιας κάμερας IR. Υψηλή ποιότητα θερμικής εικόνας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πλέγματος ανιχνευτών. Η θερμογραφία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ως διαγνωστικό εργαλείο.

Τα πυρόμετρα ολικής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται για μετρήσεις στην περιοχή θερμοκρασιών από 700 - 2000°C. Το προτέρημά τους είναι ότι δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το θερμό σώμα. Η θερμοκρασία στην περιοχή της διάτρησης χρειάζεται να μετρηθεί από απόσταση, αυτός είναι και ο λόγος που στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε πυρόμετρο. Τα πυρόμετρα συλλαμβάνουν ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας του μετρούμενου σώματος και είναι βαθμονομημένα για συνθήκες μέλανος σώματος (ορισμένα έχουν ειδική ρύθμιση για επιφάνειες με $\epsilon < 1$). Η ακτινοβολία που εκπέμπεται για παράδειγμα από ένα φούρνο, συγκεντρώνεται πάνω στην θερμή επαφή ενός θερμοστοιχείου ή μιας θερμοστήλης ή ενός στοιχείου αντίστασης με πλατίνα, τα οποία είναι μαυρισμένα για να απορροφούν καλύτερα την ακτινοβολία. Η θερμοκρασία που μετράει το πυρόμετρο είναι,

σύμφωνα με τον νόμο των Stefan- Boltzmann, ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας της πηγής.

Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων κατά την χρήση των πυρομέτρων είναι:

1. Η παρεμβολή αερίων, φλόγας, καπνού και ατμών μεταξύ πηγής και πυρομέτρου με αποτέλεσμα την ελάττωση της ποσότητας ακτινοβολίας που προσπίπτει στο όργανο.
2. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας (λόγω του παρεμβαλλόμενου αέρα, σκόνης κλπ.) μεταξύ του σώματος και του οργάνου.
3. Η ελλιπής κάλυψη της πηγής από το οπτικό πεδίο του οργάνου.
4. Υπερθέρμανση του πυρομέτρου.

Τα έλαια ελαχιστοποιούν την τριβή που προκαλεί θερμότητα και υπό κανονικές συνθήκες περιορίζουν τη θερμότητα μέσα σε επιτρεπτά όρια. Η θερμότητα όμως αυξάνεται λόγω ανεπαρκούς λίπανσης, υπερβολικής φθοράς, αυξημένου φορτίου κτλ. Η θερμογραφία μπορεί να εντοπίσει την αύξηση αυτή σε έδρανα, κοπτικά εργαλεία, σφονδύλους, αλυσίδες κλπ. Σε γενικές γραμμές, η εικόνα αποτυπώνεται και αναλύεται από το προσωπικό. Αυτή είναι μια αργή διαδικασία, αλλά έχει χαμηλό αρχικό κόστος. Η on-line θερμογραφία έχει γίνει δημοφιλής με την πρόοδο της πληροφορικής και των καμερών IR, των οπτικών ινών και τη διαθεσιμότητα λογισμικών τεχνητής νοημοσύνης.

1.8 Σύνοψη

Μελετώντας την ιστορική αναδρομή των εργαλειομηχανών, γίνεται κατανοητή η προσπάθεια των ανθρώπων για την εξέλιξή τους. Το μεγάλο βήμα προόδου έγινε κατά την βιομηχανική επανάσταση, καθώς και τη δεκαετία του 50 με την αυτοματοποίησή τους. Αναπόσπαστο κομμάτι των εργαλειομηχανών είναι τα κοπτικά τους εργαλεία, στα οποία γίνεται η προσπάθεια εύρεσης του χρόνου ζωής τους. Η φθορά των κοπτικών εργαλείων και οι μέθοδοι ελέγχου της φθοράς μέσω των ακουστικών εκπομπών, ρεύματος κινητήρα περιστροφής, δονήσεων και θερμοκρασίας κοπτικού εργαλείου, αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο χρειάζεται να υλοποιηθούν τα πειράματα ώστε να συλλεχθούν τα κατάλληλα δεδομένα (δονήσεις, ρεύμα, θερμοκρασία κ.α.) κατά την διάρκεια της κατεργασίας, τα οποία είναι σημαντικά ώστε να ελεγχθεί η φθορά του κοπτικού εργαλείου. Τα σχεδιασμένα πειράματα είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να εκτιμάται η σχέση των παραγόντων με την εξαρτώμενη μεταβλητή (φθορά κοπτικού).

1.9 Βιβλιογραφία

- [1] K. Subramanian, NH. Cook, “*Sensing of drill wear and prediction of drill life.*”, ASME J Eng Ind, Volume 99, Pages 295–301, 1997.
- [2] Gyung- Jin Park, “*Analytic Methods for Design Practice*”, Springer, ISBN: 978-1-84628-472-4, 2007.
- [3] Στ. Γ. Φραγκόπουλος, “*Ιστορία της Τεχνολογίας: Ατμοκίνηση, Βιομηχανική επανάσταση*”, Δρ. Μηχανικός, Καθηγητή TEI Αθήνας.
- [4] Κωνσταντίνος- Διονύσιος Ε. Μπουζάκης, “*Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού*”, Ζήτη, ISBN: 978-960-431-689-, 2001.
- [5] Π. Ν. Μπότσαρης, Π. Δ. Σπάρης, “*Στοιχεία Τεχνολογίας Παραγωγής*”, Ξάνθη, 2008.
- [6] S. Kalpakjan, “*Manufacturing Processes for Engineering Materials*”, Addison-Wesley, 1984.
- [7] R. Ramaswami, “*THE EFFECT OF THE BUILT- UP- EDGE (BUE) ON THE WEAR OF CUTTING TOOLS*”, Elsevier Sequoia SA, 1970.
- [8] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, “*Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)*”, Journal of Materials Processing Technology, Pages 319-326, (1998).
- [9] Ismet Kandilli, Murat Sonmez, Huseyin Metin Ertunc, Bekir Cakir, “*Online Monitoring Of Tool Wear In Drilling and Milling By Multi-Sensor Neural Network Fusion*”, China, 2007.
- [10] Erkki Jantunen, “*A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 42, Pages 997–1010, 2002.

- [11] A. G. Rehorn, J. Jiang, P. E. Orban, “*State-of-the-Art Methods and Results in Tool Condition Monitoring: A Review*”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004.
- [12] A. Thangaraj, P. K. Wright, “*Computer-assisted Prediction of Drill- Failure Using In-Process Measurements of Thrust Force.*” Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME 110, Pages 192-200, 1988.
- [13] M. Z. Zhang, Y. B. Liu, H. Zhou, “*Wear Mechanism Maps of Uncoated HSS Tools Drilling Die-cast Aluminum Alloy.*”, Tribology International, Vol. 34, Pages 727-731, 2001.
- [14] Erkki Jantunen, “*Indirect multisignal monitoring and diagnosis of drill wear*”, VTT Publications 590, 2005.
- [15] Mo A. Elbestawi, Mihaela Dumitrescu, Eu-Gen Ng, “*Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*”, Springer, London, 2006.
- [16] Issam Abu-Mahfouz, “*Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 43, Issue 7, Pages 707-720, May 2003.
- [17] N. Tandon, A. Parey, “*Condition Monitoring of Rotary Machines*”, Indian Institute of Technology, New Delhi.

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία Σχεδιασμού Πειραμάτων (Design of Experiments)

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	26
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Σχεδιασμένο Πείραμα- Design of Experiment.....	29
2.2.1 Βασικές έννοιες και διαδικασίες των σχεδιασμένων πειραμάτων με ένα παράδειγμα.....	31
2.3 Στρατηγική των Πειραμάτων.....	34
2.4 Εφαρμογές για τις Σχεδιασμένες Πειραματικές Τεχνικές.....	36
2.5 Στατιστικά πειράματα με έναν παράγοντα.....	38
2.5 Στατιστικά πειράματα με πολλούς παράγοντες.....	38
2.7 Παραγοντικά Πειράματα.....	39
2.7.1 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^2	40
2.7.1.1 Στατιστική Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	41
2.7.2 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^3	46
2.7.2.1 Παράδειγμα Παραγοντικού πειράματος 2^3	49
2.7.3 Το γενικευμένο 2^k Παραγοντικό Πείραμα.....	51
2.8 Ειδικές Στατιστικές Ανάλυσης Παραγοντικών Πειραμάτων.....	53
2.8.1 Τυπικό Σφάλμα Επίδρασης (Standard Errors of the Effect).....	53
2.8.2 Γραμμική Παλινδρόμηση (Regression Analysis).....	54
2.9 2^k Παραγοντικό Πείραμα χωρίς δυνατότητα επαναλήψεων (residual	54

analysis).....	
2.10 Κλασματικά Πειράματα.....	55
2.11 Σύνοψη.....	55
2.12 Βιβλιογραφία.....	57

2.1 Εισαγωγή

Η ορθολογική σχεδίαση και η βελτίωση προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών επιτυγχάνονται κυρίως μέσω του σχεδιασμού, της εκτέλεσης και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων στατιστικών πειραμάτων (design experiments). Σκοπός των πειραμάτων είναι η επιβεβαίωση υποθέσεων ή η διερεύνηση σχέσεων μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του εξεταζόμενου συστήματος. Ο πειραματισμός αποτελεί πάντοτε βασικό συστατικό στοιχείο της διαδικασίας ανάπτυξης νέων ή βελτίωσης υφιστάμενων προϊόντων και διαδικασιών. Όμως η αποτελεσματική σχεδίαση σύνθετων πειραμάτων και η επιστημονική ανάλυση των αποτελεσμάτων τους χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1920, οπότε ο Sir Ronald Fisher ανέπτυξε και χρησιμοποίησε την ανάλυση μεταβλητότητας για να μελετήσει την επίδραση χρήσης διαφόρων λιπασμάτων στην απόδοση γεωργικών καλλιεργειών. Οι σχετικές τεχνικές, που μελετήθηκαν και εξελίχθηκαν στη συνέχεια από πολλούς ερευνητές, όπως ο Douglas Montgomery, είναι γνωστές υπό τον γενικό όρο **Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments)** και αφορούν την ανάλυση των επιδράσεων μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών στη μέση τιμή μιας εξαρτημένης μεταβλητής [1].

Τα πειράματα γίνονται για να εξετάσουν τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος. Τα αποτελέσματα που αποτιμούνται από τα πειράματα είναι οι απαντήσεις και τα χαρακτηριστικά που κρίνονται χρήσιμα να συλλεχθούν. Ανάλογα με την αντικειμενικότητα των πειραμάτων αναλύονται κατάλληλα οι απαντήσεις. Οι παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν τα πειράματα. Δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν όλοι οι παράγοντες ενός πειράματος και να δώσουν σωστά αποτελέσματα, επειδή μπορεί να επηρεάζονται ποικίλα από το περιβάλλον [2].

Κάθε πείραμα συμπεριλαμβάνει διαδοχικές ενέργειες:

1. **Υπόθεση** (conjecture): η αρχική υπόθεση με την οποία θα ξεκινήσει το πείραμα.
2. **Πείραμα** (experiment): εκτελείται το τεστ ώστε να διερευνηθεί την υπόθεση.
3. **Ανάλυση** (analysis): στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το πείραμα.
4. **Συμπεράσματα** (conclusion): σύγκριση αποτελεσμάτων με αρχική υπόθεση πειράματος, απόφαση για το αν θα υπάρξει επαναλαμβανόμενη υπόθεση, νέο πείραμα και επανάληψη των τεσσάρων βημάτων.

Τα παραπάνω βήματα στηρίζονται στον κύκλο του Deming ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κύκλος Deming.

2.2 Σχεδιασμένο Πείραμα- *Design of Experiment*

Το σχεδιασμένο πείραμα ορίζεται ως η συστηματική διαδικασία που πραγματοποιείται υπό ελεγχόμενες συνθήκες προκειμένου να ανακαλυφθεί μια άγνωστη επίδραση, για να εξετάσει ή να καθιερώσει μια υπόθεση, ή για να επεξηγήσει μία γνωστή επίδραση. Κατά την ανάλυση μιας διαδικασίας, τα πειράματα χρησιμοποιούνται συχνά για να αξιολογήσουν ποιες διαδικασίες εισαγωγής (input) έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις διαδικασίες αποτελέσματος (output), και ποιο είναι το κατάλληλο επίπεδο των εισαγωγών ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα πειράματα μπορούν να σχεδιαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ώστε να συλλέξουν αυτές τις πληροφορίες.

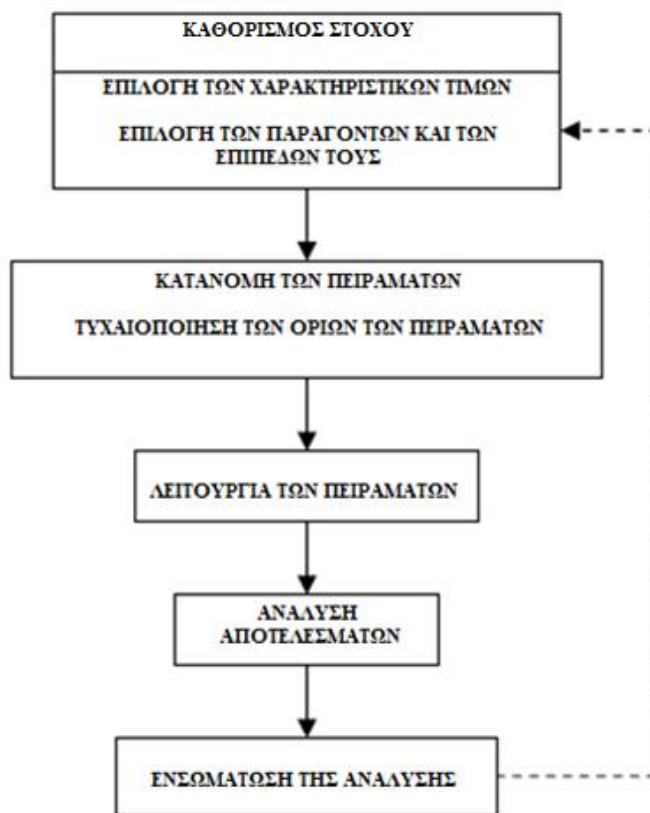
Το σχεδιασμένο πείραμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις δαπάνες σχεδίου με την επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού, τη μείωση των πρόσφατων αλλαγών σχεδίου εφαρμοσμένης μηχανικής, και τη μείωση υλικών προϊόντων και πολύπλοκων εργασιών. Τα σχεδιασμένα πειράματα είναι επίσης ισχυρά εργαλεία για να επιτύχουν τη μείωση κόστους κατασκευής με την ελαχιστοποίηση της παραλλαγής της διαδικασίας και τη μείωση της επανάληψης, του σφάλματος, και της ανάγκης για την επιθεώρηση ελέγχου.

Γενικά οι στόχοι των πειραμάτων αναφέρονται παρακάτω:

1. υπολογισμός ή αποτίμηση χαρακτηριστικών τιμών, χωρίς να αναλυθούν στατιστικά,
2. αναγνώριση από το πείραμα των παραγόντων οι οποίοι είναι σημαντικοί στο αποτέλεσμα και προσδιορισμός της σημαντικότητας της επιρροής τους. Τα αποτελέσματα του πειράματος αναλύονται στατιστικά,
3. στατιστική αναγνώριση παραγόντων με μικρή επιρροή στο αποτέλεσμα,

4. απόφαση από τις τιμές των σημαντικών παραγόντων. Έτσι μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη κατάσταση.

Η μεθοδολογία του Σχεδιασμένου Πειράματος (Design of Experiment- DoE) καθορίζει την κατανομή και την μέθοδο των πειραμάτων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αντικειμενικότητα. Ποικίλοι παράγοντες καθορίζονται με την ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Η ανάπτυξη του DoE φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για αποτελεσματικά πειράματα και αναλύσεις αποτελεσμάτων. Η χαρακτηριστική αξία και οι παράγοντες του DoE ισοδυναμούν με την αντικειμενική λειτουργία και τις μεταβλητές του σχεδιασμού, αντίστοιχα [2].



Σχήμα 2.2: Γενική διαδικασία σχεδιασμού πειραμάτων.

Με την μέθοδο του Σχεδιασμού Πειραμάτων αποφεύγονται τα πολλά λάθη που γίνονται στις πειραματικές διαδικασίες. Οι πειραματικές συνθήκες στη μέθοδο αυτή είναι συστηματικά κατανεμημένες, τα πειράματα εκτελέσιμα και τα αποτελέσματα στατιστικά αναλυμένα. Γενικά χρειάζονται εξοπλισμός και πόροι για ένα πείραμα, επομένως είναι σημαντικό να εκτελείται ένας ελάχιστος αριθμός πειραμάτων και να αποκομίζονται οι μέγιστες πληροφορίες γεγονός το οποίο πετυχαίνει η μέθοδος DoE [3]. Υπάρχουν πολλές επιστημονικές ορολογίες μαθηματικές και στατιστικές για το DoE. Μερικές αναφέρονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ορολογίες της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων.		
ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΟ DoE	ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Πηγές που επηρεάζουν την χαρακτηριστική λειτουργία ή την αντικειμενική λειτουργία. Μπορούν να αλλάξουν για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος.
ΕΠΙΠΕΔΟ	ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	Οι τιμές τις οποίες μπορούν να έχουν οι παράγοντες ή οι σχεδιασμένες μεταβλητές.
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	Τα αποτελέσματα του συστήματος, τα οποία μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν.

Στόχοι των πειραμάτων είναι να βρεθούν οι μεταβλητές που έχουν σημαντική επιρροή στο επιθυμητό αποτέλεσμα και οι κατάλληλες ρυθμίσεις αυτών των μεταβλητών ώστε το αποτέλεσμα να έχει μικρή μεταβλητότητα και οι «θορυβώδεις» (noisy) μεταβλητές να έχουν μικρή επιρροή. Υπάρχουν πολλές τεχνικές πειραμάτων που βασίζονται στη Σχεδίαση Πειραμάτων. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση στατιστικών πακέτων, αφού τα Σχεδιασμένα Πειράματα είναι ευρέως διαδεδομένα.

2.2.1 Βασικές έννοιες και διαδικασίες των σχεδιασμένων πειραμάτων με ένα παράδειγμα

Παρακάτω εξετάζεται το ακόλουθο διάγραμμα μιας διαδικασίας ψησίματος κέικ (Σχήμα 2.4). Υπάρχουν τρεις πτυχές της διαδικασίας που αναλύονται από ένα σχεδιασμένο πείραμα:

Παράγοντες, ή inputs στη διαδικασία. Οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως ελέγξιμες είτε ως ανεξέλεγκτες μεταβλητές. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ελέγξιμοι παράγοντες είναι τα συστατικά για το κέικ και ο φούρνος όπου ψήνεται μέσα το κέικ. Ο κατάλογος συστατικών είναι μικρός για αυτό το παράδειγμα, θα μπορούσαν να υπάρξουν πολλά άλλα συστατικά που έχουν σημαντική σχέση στο τελικό αποτέλεσμα (λάδι, νερό, αρωματική ουσία, κ.λπ.). Επιπλέον, θα μπορούσαν να υπάρξουν άλλοι τύποι παραγόντων, όπως η μέθοδος ή τα εργαλεία μίξης, η ακολουθία μίξης, ή ακόμα και οι άνθρωποι που θα πάρουν μέρος στην διαδικασία παραγωγής. Οι άνθρωποι θεωρούνται γενικά παράγοντας θορύβου (noise factors), όπως όλοι οι παράγοντες οι οποίοι δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν. Οι πιθανοί παράγοντες μπορούν

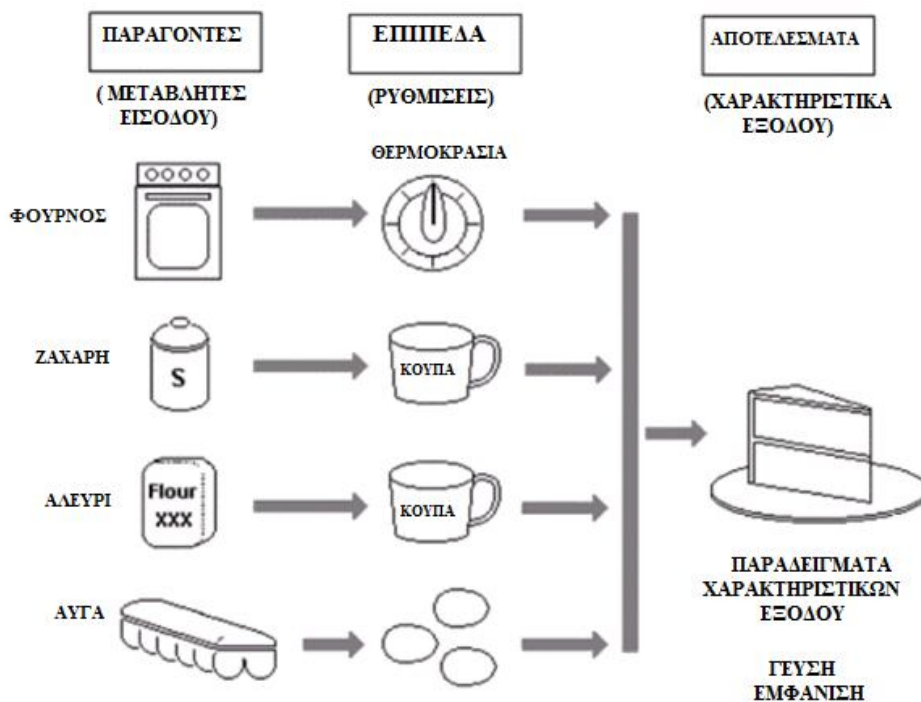
να ταξινομηθούν χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος (Fishbone διάγραμμα).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος

Επίπεδα κάθε παράγοντα. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν τη ρύθμιση θερμοκρασίας φούρνων και τα ποσά ζάχαρης, αλευριού, και αυγών.

Απάντηση (response), ή αποτελέσματα (output) του πειράματος. Στην περίπτωση του ψησίματος κέικ, η γεύση και η εμφάνιση του κέικ είναι μετρήσιμα χαρακτηριστικά που επηρεάζονται ενδεχομένως από τους παράγοντες και τα αντίστοιχα επίπεδά τους.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα διαδικασίας Σχεδιασμένου πειράματος.

Τα Σχεδιασμένα Πειράματα έχουν πολλές πιθανές χρήσεις στη βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων που περιλαμβάνουν:

Σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων. Στην περίπτωση του παραδείγματος ψησίματος κέικ, μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα από δύο διαφορετικούς τύπους αλευριών. Εάν προκύψει ότι το αλεύρι από τους διαφορετικούς προμηθευτές δεν

ήταν σημαντικός παράγοντας στην ποιότητα του κέικ, θα μπορούσε να επιλεγεί ο προμηθευτής με το χαμηλότερο κόστος. Εάν το αλεύρι ήταν σημαντικό, θα επιλεγόταν το καλύτερο αλεύρι.

Προσδιορισμός των σημαντικών παραγόντων (inputs) που έχουν επιπτώσεις σε μια παραγωγή (απάντηση).

Επίτευξη βέλτιστης παραγωγικής διαδικασίας (απάντηση). «Ποιοι είναι οι απαραίτητοι παράγοντες, και ποια είναι τα επίπεδα εκείνων των παραγόντων, για να επιτύχουν την κατάλληλη γεύση και την εμφάνιση του κέικ σοκολάτας;»

Μείωση της μεταβλητότητας. «Πόσο μπορεί η συνταγή να αλλάξει έτσι ώστε η επιτυχία του κέικ να είναι η ίδια;»

Ελαχιστοποίηση, μεγιστοποίηση, ή στοχοποίηση μιας παραγωγής (απάντηση). «Πώς μπορεί το κέικ να γίνει όσο το δυνατόν πιο αφράτο χωρίς να διαλυθεί;»

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο σκοπός είναι να εκτιμηθούν κάποιες παράμετροι της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Οι παράμετροι που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με την φθορά των κοπτικών είναι οι δονήσεις, η θερμοκρασία της περιοχής της κοπής, το ρεύμα του κινητήρα κ.α. Οι παραπάνω παράμετροι είναι ανεξέλεγκτες μεταβλητές του πειράματος καθώς δεν μπορούν να ελεγχθούν από τον μελετητή, επομένως είναι εξαρτημένες μεταβλητές. Οι ανεξάρτητοι παράγοντες σε μία διαδικασία διάτρησης σε εργαλειομηχανή CNC είναι το βάθος κοπής, η πρόωση του κινητήρα, το υλικό του εργαλείου διάτρησης, το υλικό του κομματιού κατεργασίας, η ηλικία του κοπτικού, οι στροφές του κινητήρα, το ψυκτικό υγρό, κ.α. Άλλοι τύποι παραγόντων θα μπορούσαν να είναι η προέλευση της εργαλειομηχανής ή οι ώρες λειτουργίας. Οι παραπάνω είναι ελέγξιμοι παράγοντες, υπάρχουν και ανεξέλεγκτοι όπως οι χειριστές της μηχανής, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ο θόρυβος που προκαλείται λόγω της κατεργασίας ή από παρακείμενες εργαλειομηχανές.

Επομένως για να εκτιμηθούν οι παράμετροι της φθοράς των κοπτικών εργαλείων χρειάζεται να επιλεγθούν κάποιοι παράγοντες και τα επίπεδά τους. Στο πείραμα, επειδή η πειραματική διάταξη και τα υλικά ήταν συγκεκριμένα λόγω συνέχειας προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκαν το βάθος κοπής, ηλικία του κοπτικού και η πρόωση του κινητήρα ως παράγοντες υπό εξέταση. Έγινε επιλογή υψηλού και χαμηλού επιπέδου για τον κάθε παράγοντα. Στόχος είναι να επιτευχθεί εκτίμηση παραμέτρων φθοράς (δονήσεις, θερμοκρασία περιοχής κοπής), δηλαδή προσδιορισμός των σημαντικών παραγόντων που έχουν επιπτώσεις στις παραμέτρους αυτές. Επίσης επίτευξη εκτίμησης φθοράς μέσω της εκτίμησης των παραμέτρων της, εντοπίζοντας ποιοι είναι οι απαραίτητοι παράγοντες, και ποια είναι τα επίπεδα εκείνων των παραγόντων.

2.3 Στρατηγική των Πειραμάτων

Πειραματικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα καθώς επίσης και στο βιομηχανικό περιβάλλον, εντούτοις, μερικές φορές έχουν διαφορετικούς σκοπούς. Ο αρχικός στόχος στη επιστημονική έρευνα είναι συνήθως να παρουσιαστεί η στατιστική σημασία μιας επίδρασης που ασκεί ένας ιδιαίτερος παράγοντας σε μία μεταβλητή που ενδιαφέρει τους επιστήμονες να μελετηθεί και είναι εξαρτώμενη από αυτόν τον παράγοντα.

Στο βιομηχανικό περιβάλλον, συνήθως ο αρχικός στόχος είναι να εξαχθεί ο μέγιστος αριθμός αντικειμενικών πληροφοριών σχετικά με τους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις σε μια παραγωγική διαδικασία, με τις λιγότερες (δαπανηρές) δυνατές παρατηρήσεις [4,5]. Ενώ στην επιστήμη οι τεχνικές ανάλυσης της μεταβλητότητας (ANOVA) χρησιμοποιούνται για να αποκαλύψουν την επίδραση φυσικών φαινομένων στην πραγματικότητα, στο βιομηχανικό περιβάλλον οι αλληλεπιδράσεις υψηλής σημασίας, των παραγόντων θεωρούνται συχνά ως «ενόχληση» (συνήθως θεωρούνται μηδαμινού ενδιαφέροντος, περιπλέκουν τη διαδικασία αναγνώρισης των σοβαρών παραγόντων).

Το Σχεδιασμένο Πείραμα (Designed Experiment) είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση πολλών ευμετάβλητων στοιχείων, επειδή παράγει τους «δομημένους» πίνακες στοιχείων, δηλαδή πίνακες στοιχείων που περιέχουν ένα σημαντικό ποσό δομημένων διακυμάνσεων. Αυτή η σημαντική δομή θα χρησιμοποιηθεί έπειτα σαν βάση για την διαμόρφωση πολλών μεταβλητών, η οποία θα εγγραφεί σταθερά πρότυπα [6].

Γενικότερα, η προσεκτική επιλογή δειγμάτων αυξάνει τις πιθανότητες να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες από τα δεδομένα. Το κρίσιμο σημείο είναι να αποφασιστεί ποιες μεταβλητές θα αλλαχθούν, τα διαστήματα- επίπεδα για αυτές τις αλλαγές και το σχέδιο των πειραματικών σημείων.

Το Σχεδιασμένο Πείραμα είναι μια στρατηγική που βοηθά στην τεκμηρίωση και στη συλλογή της εμπειρικής γνώσης. Δηλαδή γνώση βασισμένη στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και όχι σε θεωρητικά πρότυπα. Μπορεί να εφαρμοστεί κατά την έρευνα ενός φαινομένου προκειμένου να επιτευχθεί η κατανόηση ή να βελτιωθεί η απόδοση αυτού του φαινομένου.

Η οικοδόμηση ενός Σχεδιασμένου Πειράματος σημαίνει προσεκτική επιλογή ενός μικρού αριθμού πειραμάτων που πρόκειται να εκτελεστούν υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Υπάρχουν τέσσερα βήματα στην οικοδόμηση ενός σχεδίου:

1. Καθορισμός του στόχου της έρευνας. Καλύτερη κατανόηση, οργάνωση των σημαντικών μεταβλητών, εύρεση των βέλτιστων όρων.
2. Καθορισμός των μεταβλητών που θα ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος (σχεδιασμένες μεταβλητές- design variables), καθώς και των επιπέδων που θα διακυμανθούν.
3. Καθορισμός των μεταβλητών που θα μετρηθούν για να περιγράψουν την έκβαση των πειραματικών διαδικασιών (μεταβλητές απάντησης- response variables), και να εξεταστεί η ακρίβειά τους.
4. Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων τυποποιημένων σχεδίων, αυτού που είναι συμβατό με το στόχο, τον αριθμό των σχεδιασμένων μεταβλητών και την ακρίβεια των μετρήσεων, με ένα λογικό κόστος

Η διεξαγωγή πειραμάτων για τους μηχανικούς αποτελεί ένα φυσικό κομμάτι της δουλειάς τους. Στατιστικά, τεχνικές βασιζόμενες σε πειραματικό σχεδιασμό είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στον κόσμο των μηχανικών αφού βελτιώνουν την απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας. Έχουν επίσης επεκτείνει την εφαρμογή τους στην ανάπτυξη διαδικασιών νέων προϊόντων αλλά και στην πρόγνωση βλαβών στις διαδικασίες παραγωγής. Πολλές διαδικασίες μπορούν να περιγραφούν στα πλαίσια ποικίλων ελεγχόμενων μεταβλητών, όπως θερμοκρασίας, πίεσης και δύναμης τροφοδοσίας. Με τη χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων, οι μηχανικοί μπορούν να καθορίσουν ποια μεταβλητή, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας (πχ κατεργασία), έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην απόδοση της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα από τέτοια πειράματα περιγράφονται παρακάτω:

1. βελτίωση της διαδικασίας παραγωγής, κατεργασίας κ.α.
2. ελάττωση του παραγωγικού χρόνου,
3. μείωση του κόστους της διαδικασίας.

Τα Σχεδιασμένα Πειράματα συνήθως χρησιμοποιούνται διαδοχικά. Αυτό σημαίνει ότι, το πρώτο πείραμα για ένα πολύπλοκο σύστημα (πχ μία παραγωγική διαδικασία) το οποίο έχει πολλές ελεγχόμενες μεταβλητές, είναι συνήθως ένα αρχικό ή τροχοδεικτικό πείραμα (screening experiment) σχεδιασμένο να προσδιορίζει ποιες μεταβλητές είναι πιο σημαντικές. Τα επόμενα πειράματα χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν και να επεξεργαστούν αυτές τις πληροφορίες και να καθορίσουν ποιες ρυθμίσεις αυτών των κρίσιμων μεταβλητών είναι απαραίτητες για την βελτίωση της διαδικασίας. Τέλος, το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν τα επίπεδα των κρίσιμων μεταβλητών που έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη διαδικασία κατεργασίας [3].

2.4 Εφαρμογές για τις Σχεδιασμένες Πειραματικές Τεχνικές

Οι διαδικασίες έχουν πολλές και διαφορετικές μεταβλητές χωρίς να είναι όλες, απαραίτητα σημαντικές. Η αρχική λίστα των υποψήφιων μεταβλητών, που συμπεριλαμβάνονται στο πείραμα, κατασκευάζεται συνδυάζοντας τις γνώσεις και τις πληροφορίες για την διαδικασία από όλα τα μέλη της επιστημονικής ομάδας που θα διεκπεραιώσει το πείραμα. Αυτή η λίστα μπορεί να συμπληρωθεί με την χρήση του διαγράμματος «προβληματισμού» (**brainstorming diagram**). Γενικά υπάρχουν μεταβλητές οι οποίες είναι ελεγχόμενες (βάθος κοπής και ταχύτητα κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια διάτρησης μεταλλικού αντικειμένου) και άλλες οι οποίες δεν γίνεται να ελεγχθούν (περιβαλλοντικοί παράγοντες). Συχνά οι παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν καλούνται ως θορυβώδεις μεταβλητές (noisy factors). Οι μηχανικοί χρειάζεται να διακρίνουν ανάμεσα σε αυτές τις μεταβλητές, ελεγχόμενες ή μη, ποιες έχουν επιρροή στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η διαδικασία που ακολουθείται καλείται ως αρχικό ή τροχοδεικτικό πείραμα (**screening experiment**).

Το επόμενο βήμα είναι να ξεχωρίσουν τις μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά και βελτιστοποιούν το αποτέλεσμα. Αυτή η διαδικασία καλείται πείραμα βελτιστοποίησης (**optimization experiment**). Στο παρακάτω Σχήμα 2.5 φαίνονται οι διαδικασίες.



Σχήμα 2.5: Πειραματικές Διαδικασίες.

Οι τεχνικές πειραμάτων επιλέγονται με βάση το πλήθος των παραγόντων που θα εξετασθούν για να ελεγχθεί η επιρροή τους στο αποτέλεσμα αλλά και με άλλα στοιχεία. Βασικές τεχνικές παρουσιάζονται ακολούθως:

Παραγοντικά Πειράματα (Full Factorial): είναι στατιστικά πειράματα που μελετάν αποτελέσματα λίγων (συνήθως μέχρι τέσσερις- πέντε) σχεδιασμένων μεταβλητών ανεξάρτητες μεταξύ τους, συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων τους, αυτά θα ελεγχθούν στην παρούσα εργασία. Σχεδιασμένες μεταβλητές είναι αυτές που μπορούν να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος και να μπορούν να μετακινούνται ανάμεσα σε κάποιο αριθμό επιπέδων. Τα παραγοντικά πειράματα είναι τα μοναδικά που μπορούν να υπολογίσουν και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών, οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα αν δεν υπολογισθούν να καταλήξει το πείραμα σε λάθος συμπεράσματα.

Κλασματικά Πειράματα (Fractional Factorial): χρησιμοποιούνται όταν ο αριθμός των σχεδιασμένων μεταβλητών είναι μεγάλος και ο στόχος είναι να ανακαλυφθεί με μικρό αριθμό πειραμάτων ποιες μεταβλητές χρειάζεται να ερευνηθούν περεταίρω.



Σχήμα 2.6: Παραγοντικά και Κλασματικά πειράματα.

Παρακάτω θα εστιάσουμε σε πειράματα τα οποία συμπεριλαμβάνουν δύο ή τρεις παράγοντες οι οποίοι είναι σημαντικοί για τους επιστήμονες που θα εκτελέσουν το πείραμα. Ο σχεδιασμός **παραγοντικών πειραμάτων (factorial experimental design)** μπορεί να αποτελέσει μία δυναμική τεχνική γι' αυτού του είδους τα πειράματα. Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και πιο χρησιμοποιημένες τεχνικές των Σχεδιασμένων Πειραμάτων. Γενικά, στα παραγοντικά πειράματα, οι πειραματικές δοκιμές εκτελούνται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των επιπέδων των παραγόντων.

2.5 Στατιστικά πειράματα με έναν παράγοντα

Ο πιο απλός τύπος στατιστικών πειραμάτων είναι εκείνος που εξετάζει την επίδραση ενός μόνο ελεγχόμενου παράγοντα (factor), και όχι σε παραπάνω παράγοντες όπως τα παραγοντικά, σε συγκεκριμένη μεταβλητή απόκρισης (response variable). Ο παράγοντας αυτός είναι είτε κάποια παράμετρος του προϊόντος, είτε κάποια παράμετρος της παραγωγικής διαδικασίας. Σε σπανιότερες περιπτώσεις, οι τιμές του παράγοντα μπορεί να εκφράζουν συνθήκες λειτουργίας ή χρήσης του προϊόντος (πχ θερμοκρασία περιβάλλοντος ή αποθήκευσης), οπότε δεν είναι πρακτικά ελεγχόμενες, αν και μπορεί να είναι ελεγχόμενες σε εργαστηριακές συνθήκες για τις ανάγκες του πειράματος. Η μεταβλητή απόκρισης είναι το χαρακτηριστικό, του οποίου οι τιμές ενδιαφέρουν τον ερευνητή.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων τέτοιων πειραμάτων γίνεται με την τεχνική της ανάλυσης μεταβλητότητας (Analysis of Variance- ANOVA) [1].

2.6 Στατιστικά πειράματα με πολλούς παράγοντες

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η κατανομή τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής Y , η οποία εκφράζει το χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει, εξαρτάται από δύο ή περισσότερους παράγοντες, οι οποίοι γενικά αλληλεπιδρούν. Κύρια επίδραση (**main effect**) ενός παράγοντα σε μία τυχαία μεταβλητή Y λέγεται η μεταβολή της τυχαίας μεταβλητής που οφείλεται σε αλλαγή της τιμής του παράγοντα, ενώ αλληλεπίδραση (**interaction**) μεταξύ παραγόντων υπάρχει όταν η μεταβολή της Y , μεταξύ δύο τιμών ενός παράγοντα, εξαρτάται από τα επίπεδα τιμών των άλλων παραγόντων.

Ο παραδοσιακός τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων, που εξακολουθεί να εφαρμόζεται σε κάποιο βαθμό ακόμη και σήμερα, χαρακτηρίζεται από τη διαδοχική μεταβολή των τιμών των διαφόρων παραγόντων, διατηρώντας κάθε φορά όλους τους υπόλοιπους παράγοντες σταθερούς (one-factor-at-a-time experimentation). Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αδυνατεί να λάβει υπόψη και να προσδιορίσει τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Προκειμένου να εξεταστούν όχι μόνο οι κύριες επιδράσεις αλλά και οι αλληλεπιδράσεις, τα επίπεδα τιμών των διαφόρων παραγόντων είναι αναγκαίο να **μεταβάλλονται ταυτόχρονα και μάλιστα κατά οργανωμένο και με συγκεκριμένο τρόπο.**

Για να εξεταστούν όλες οι κύριες επιδράσεις και όλες οι δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων, ο πιο απλός και ακριβής τρόπος είναι να αναζητηθούν στοιχεία (τιμές της Y) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών των παραγόντων που εξετάζονται. Τα πειράματα που σχεδιάζονται και εκτελούνται με αυτόν ακριβώς τον τρόπο λέγονται **παραγοντικά πειράματα (factorial experiments)**. Όταν οι παράγοντες είναι πολλοί και τα επίπεδα τιμών κάθε παράγοντα είναι επίσης πολλά, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών γίνεται απαγορευτικά μεγάλος από οικονομική άποψη. Χρησιμοποιούνται τότε τα **κλασματικά παραγοντικά πειράματα (fractional factorial experiments)** [3], που περιλαμβάνουν υποσύνολα του συνόλου των δυνατών συνδυασμών.

2.7 Παραγοντικά Πειράματα (Factorial Experiments)

Ο παραγοντικός σχεδιασμός εμφανίζει πολύ μεγάλη χρησιμότητα στην ανάλυση πειραμάτων, στα οποία εμπλέκονται διαφορετικοί παράγοντες και οι αλληλεπιδράσεις τους. Παραγοντικό πείραμα σημαίνει ότι εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των επιπέδων των παραγόντων του πειράματος. Επομένως εάν υπάρχουν δύο παράγοντες A και B με α επίπεδα για τον παράγοντα A και β επίπεδα για τον παράγοντα B τότε τα πειράματα που χρειάζεται να υλοποιηθούν και να εξετασθούν είναι οι $\alpha \cdot \beta$ συνδυασμοί των επιπέδων των παραγόντων.

Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένες ειδικές περιπτώσεις των παραγοντικών πειραμάτων που παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, διότι χρησιμοποιούνται για ερευνητικά προγράμματα και επίσης αποτελούν τη βάση για άλλους σχεδιασμούς πειραμάτων με μεγάλη πρακτική αξία.

Η πιο σημαντική από αυτές τις ειδικές περιπτώσεις είναι τα 2^k παραγοντικά πειράματα. Το k αναφέρεται στον αριθμό των παραγόντων που μετέχουν στο πρόβλημα που μελετάμε και το 2 στον αριθμό των επιπέδων που έχουν οι παράγοντες αυτοί. Δηλαδή στα 2^k πειράματα υπάρχουν k παράγοντες που έχουν 2 επίπεδα το «χαμηλό» και το «υψηλό». Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι ένα ολοκληρωμένο πείραμα αυτής της μορφής θα πρέπει να έχει τουλάχιστον $2 \cdot k$ παρατηρήσεις.

2.7.1 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^2

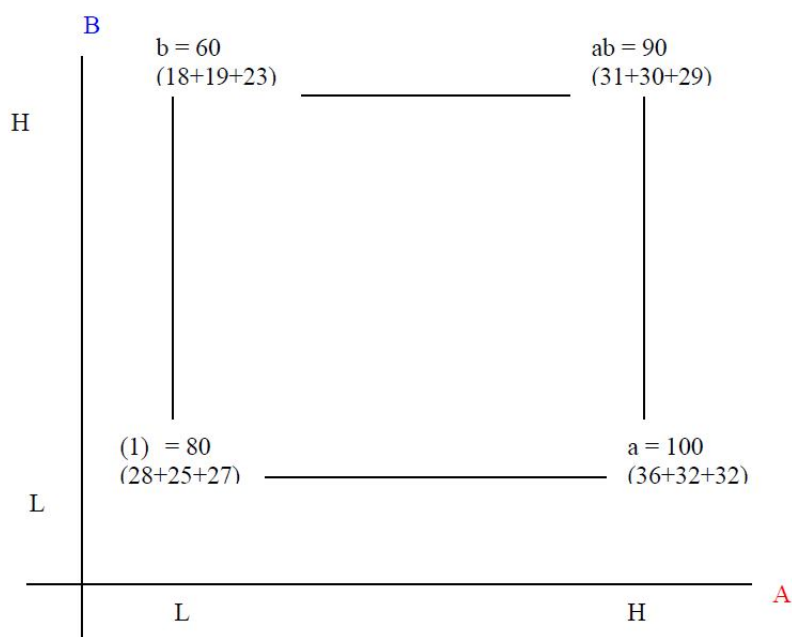
Αφού εξετάζεται 2^2 Παραγοντικό Πείραμα, σημαίνει ότι ελέγχονται 2 παράγοντες οι οποίοι κυμαίνονται σε 2 επίπεδα ο καθένας. Επομένως εξετάζονται 4 δοκιμές στο πείραμα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

Έστω ότι σε μια χημική αντίδραση μελετάται η συγκέντρωση του χημικού αντιδραστηρίου και η ποσότητα του καταλύτη. Ονομάζεται παράγοντας Α η συγκέντρωση του χημικού αντιδραστηρίου με επίπεδα 15% και 25%, και παράγοντας Β η ποσότητα του καταλύτη με επίπεδα 1 Kgr και 2 Kgr. Έστω ότι ο μελετητής επιλέγει το πείραμα να επαναληφθεί τρεις φορές. Η επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων εξαρτάται κυρίως από τον οικονομικό προϋπολογισμό του πειράματος, όσες περισσότερες επαναλήψεις γίνουν τόσο εγκυρότερα θα είναι τα αποτελέσματα. Οι παρατηρήσεις που θα προκύψουν είναι $2^2 * 3$ (επαναλήψεις) = 12 παρατηρήσεις. Ή αλλιώς για κάθε συνδυασμό των παραγόντων ($2^2 = 4$ συνδυασμοί παραγόντων) 3 παρατηρήσεις (διότι 3 επαναλήψεις). Παρακάτω στις στήλες I, II, III που δηλώνουν αντίστοιχα την πρώτη, δεύτερη και τρίτη επανάληψη του πειράματος φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της χημικής αντίδρασης για κάθε δυνατό συνδυασμό παραγόντων, τα οποία προέκυψαν μετά από τις πειραματικές διαδικασίες (πίνακας 2.2):

Πίνακας 2.2: Δομημένος πίνακας από Παραγοντικό Πείραμα.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ		ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ			ΣΥΝΟΛΟ
A	B		I	II	III	
-	-	A χαμηλό, B χαμηλό	28	25	27	80
+	-	A υψηλό, B χαμηλό	36	32	32	100
-	+	A χαμηλό, B υψηλό	18	19	23	60
+	+	A υψηλό, B υψηλό	31	30	29	90

Το πείραμα μπορεί επίσης να παρασταθεί και με τη βοήθεια του Σχήματος 2.7:



Σχήμα 2.7: Απεικόνιση επιπέδων πειράματος.

Συμβολισμός:

(1): Είναι το άθροισμα των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής όταν όλοι οι παράγοντες είναι στο χαμηλό επίπεδο.

a: Είναι το άθροισμα των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής όταν μόνο ο παράγοντας A βρίσκεται στο υψηλό επίπεδο.

b: Είναι το άθροισμα των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής όταν μόνο ο παράγοντας B βρίσκεται στο υψηλό επίπεδο.

ab: Είναι το άθροισμα των παρατηρήσεων της απαντητικής μεταβλητής όταν οι παράγοντες A, B είναι στο υψηλό επίπεδο.

2.7.1.1 Στατιστική Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Τα δεδομένα που θα συλλεχθούν από τα Σχεδιασμένα Πειράματα θα αναλυθούν στην συνέχεια στατιστικά ώστε να αποκτηθούν τα σωστά αποτελέσματα. Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις των κύριων τιμών που χρειάζεται να υπολογισθούν για να προκύψουν τα συμπεράσματα.

1. Υπολογισμός της Κύριας Επίδρασης των Παραγόντων (Main Effect)

Στα παραγοντικά πειράματα 2^k μπορεί να υπολογιστεί η μέση επίδραση ενός παράγοντα μετρώντας την αλλαγή που επέρχεται στην εξαρτημένη μεταβλητή όταν

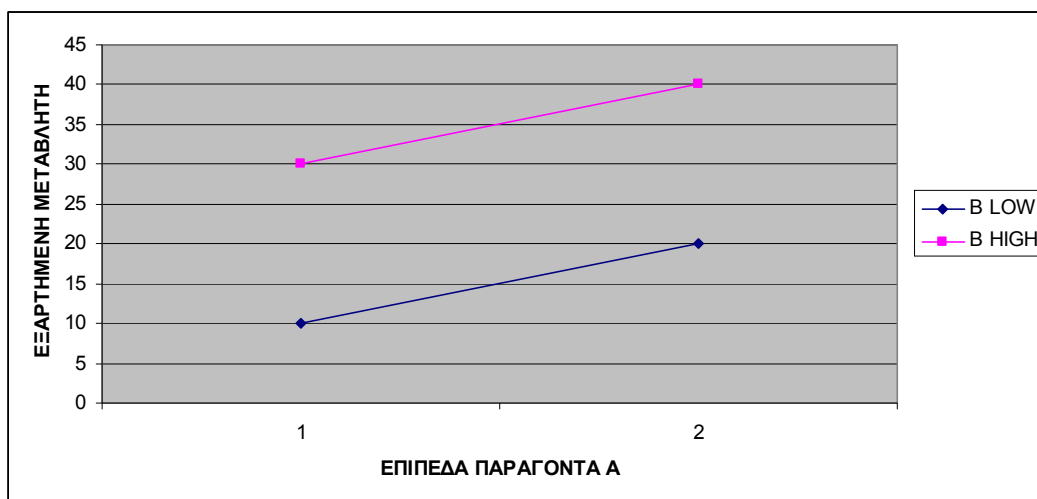
αυτός αλλάζει τιμή από το ένα επίπεδο στο άλλο. Έτσι οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται οι κύριες επιδράσεις φαίνονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα είναι από το παραπάνω παράδειγμα, δηλαδή υπολογίζουν την σημαντικότητα της επίδρασης της συγκέντρωση του χημικού αντιδραστήριου (παράγοντας A) και της ποσότητας του καταλύτη (παράγοντας B) στην χημική αντίδραση (εξαρτημένη μεταβλητή, Y):

$$A = \frac{1}{2n} \{[ab - b] + [a - (1)]\} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] = 8,33$$

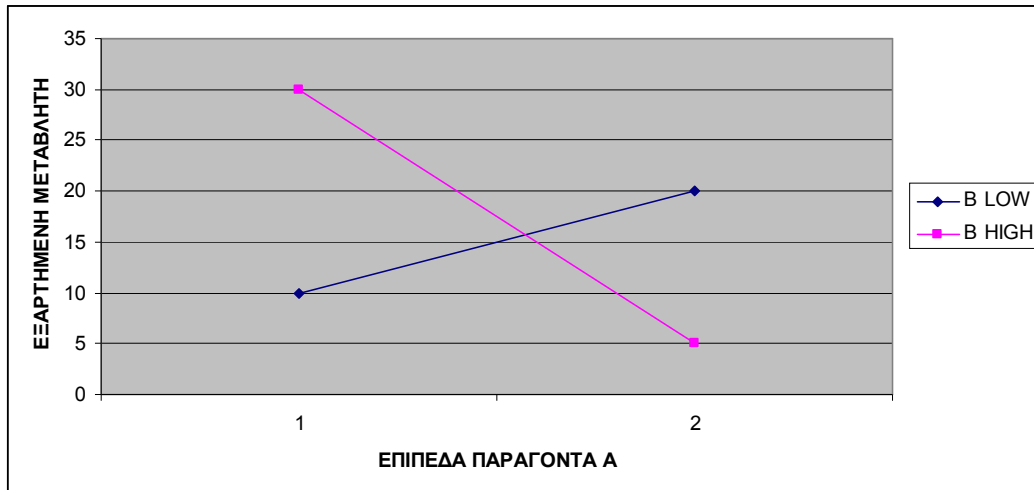
$$B = \frac{1}{2n} \{[ab - a] + [b - (1)]\} = \frac{1}{2n} [ab - a + b - (1)] = -5,00$$

$$AB = \frac{1}{2n} \{[ab - b] - [a - (1)]\} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] = 1,67$$

Ο όρος AB υπολογίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων. Όσο τείνει προς το μηδέν τόσο μικρότερη αλληλεπίδραση έχουν μεταξύ τους οι παράγοντες, επομένως τα αποτελέσματά μας είναι πιο έγκυρα, διαφορετικά όταν η αλληλεπίδραση είναι μεγάλη η κύρια επίδραση των παραγόντων συμπεριλαμβάνει και την αλληλεπίδρασή τους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεις εντοπίζονται μόνο μέσω των παραγοντικών πειραμάτων [1,2,3,6]. Παρακάτω φαίνονται δύο σχεδιαγράμματα που απεικονίζουν τη σχέση, που προέκυψε μετά από το παραγοντικό πείραμα, των δύο παραγόντων με και χωρίς αλληλεπίδραση.



Σχήμα 2.8: Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση.



Σχήμα 2.9: Υπάρχει αλληλεπίδραση.

Επίσης, η επίδραση των A, B και AB μπορεί να υπολογιστεί σαν τη διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής στα δύο επίπεδα του κάθε παράγοντα αντίστοιχα. Έτσι προκύπτει:

$$A = y_{A^+} - y_{A^-} = \frac{ab + a}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \quad (2.1)$$

$$B = y_{B^+} - y_{B^-} = \frac{ab + b}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab - a + b - (1)] \quad (2.2)$$

$$AB = \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \quad (2.3)$$

Ο υπολογισμός της κύριας επίδρασης των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεών τους στην εξαρτημένη μεταβλητή δίνει μια πρώτη αλλά συνάμα σημαντική ιδέα για το ποιοι παράγοντες επιδρούν περισσότερο στην Y. Οι παράγοντες και οι αλληλεπιδράσεις που παρουσιάζουν μεγάλη κύρια επίδραση είναι σχεδόν σίγουρο ότι επιδρούν στην Y ενώ αυτοί που έχουν μικρή επίδραση προκύπτει ότι δεν είναι στατιστικά σημαντικοί. Στο παράδειγμά, οι παράγοντες A, B επιδρούν σημαντικά στην Y ενώ η αλληλεπίδρασή τους δεν είναι σημαντική.

2. Υπολογισμός των Διαφορών (Contrast) και των αθροισμάτων των τετραγώνων

Στα 2^k πειράματα σαν διαφορές ορίζεται η συνολική επίδραση (**total effect**) των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους.

Έτσι προκύπτει:

$$Contrast_A = [ab + a - b - (1)] \quad (2.4)$$

$$Contrast_B = [ab - a + b - (1)] \quad (2.5)$$

$$Contrast_{AB} = [ab + (1) - a - b] \quad (2.6)$$

Τα αθροίσματα τετράγωνων των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους, θα είναι:

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (2.7)$$

$$SS_B = \frac{[ab - a + b - (1)]^2}{4n} \quad (2.8)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (2.9)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \quad (2.10)$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους προκύπτει ο πίνακας 2.3 ANOVA για το πρόβλημα. Όπου P- value είναι το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας ενός στατιστικού ελέγχου υποθέσεων και είναι η πιθανότητα (γι' αυτό κυμαίνεται από 0 έως 1) η οποία δείχνει πόσο σημαντική είναι η επίδραση του παράγοντα στην μετρούμενη μεταβλητή. Η τιμή του κριτηρίου F_0 για κάθε επίδραση υπολογίζεται ως το πηλίκο του μέσου τετραγώνου της επίδρασης προς το μέσο τετράγωνο των σφαλμάτων:

Πίνακας 2.3: Ανάλυση Διακύμανσης του παραδείγματος.

Πηγή μεταβλητότητας	Sum of squares	Βαθμοί ελευθερίας	Mean squares	F_0	P-Value
A	208,33	1	208,33	53,15	0,0001
B	75,00	1	75,00	19,13	0,0024
AB	8,33	1	8,33	2,13	0,1826
Error	31,34	8	3,92		
Total	323,00	11			

Όταν $P\text{-Value} < 0,05$ (διότι επίπεδο σημαντικότητας ίσο με 5%) τότε ο παράγοντας επιδρά σημαντικά στην εξαρτώμενη μεταβλητή. Επίσης όσο μεγαλύτερο F_0 τόσο μεγαλύτερη επίδραση.

Παρατηρείται ότι τα συμπεράσματα που είχαν βγει από τις κύριες επιδράσεις ήταν ορθά, δηλαδή παρατηρείται ότι οι παράγοντες A, B επιδρούν στην εξαρτημένη μεταβλητή ενώ η αλληλεπίδραση AB δεν επιδρά στατιστικά σημαντικά, διότι τα P-Value των A και B είναι μικρότερα από 0,05 σε αντίθεση με αυτό του AB.

Πολλές φορές είναι βολικό να καταγράφονται οι συνδυασμοί με τη σειρά (1), α, b, ab. Αυτή η σειρά είναι γνωστή ως τυπική (standard) σειρά. Έτσι, με αυτή τη σειρά ο πίνακας 2.4 των συντελεστών των διαφορών (contrast coefficients) που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των επιδράσεων παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 2.4: Συντελεστές Διαφορών.				
Επιδράσεις	(1)	α	β	ab
A	-1	+1	-1	+1
B	-1	-1	+1	+1
AB	+1	-1	-1	+1

Αν τώρα παραληφθούν από τον παραπάνω πίνακα οι μονάδες τότε θα προκύψει ο πίνακας 2.5 των πλην και των συν όπως φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 2.5: Πίνακας Συν και Πλην.				
Συνδυασμός Παραγόντων	Παραγοντική επίδραση			
	I	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
α	+	+	-	-
β	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πρόσημου για κάθε συνδυασμό των παραγόντων. Τα A, B, AB παριστάνουν τις κύριες επιδράσεις των αντίστοιχων παραγόντων ενώ το I παριστάνει το μέσο ή το σύνολο ολόκληρου του πειράματος. Παρατηρείται επίσης ότι η στήλη του I έχει μόνο συν. Για να υπολογιστεί οποιαδήποτε επίδραση χρειάζεται απλώς να πολλαπλασιαστεί κάθε συνδυασμός παραγόντων με το αντίστοιχο πρόσημο που βρίσκεται στη στήλη των παραγοντικών

επιδράσεων και να προσθέτει. Για παράδειγμα για να εκτιμηθεί η επίδραση του παράγοντα A στο πείραμα, από το πίνακα βγαίνει $-(1) + a - b + ab$.

Οι παραπάνω πίνακες συντελούν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των Παραγοντικών Πειραμάτων. Σήμερα υπάρχουν διάφορα στατιστικά πακέτα τα οποία με το πάτημα ενός κουμπιού βγάζουν αυτόματα τις κύριες επιδράσεις των παραγόντων ακόμα και στα πιο πολύπλοκα πειράματα, με πολλούς περισσότερους παράγοντες.

2.7.2 Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^3

Αν χρειάζεται να ελεγχθούν τρεις παράγοντες, έστω A, B, C, και ο καθένας κινείται σε δύο επίπεδα το πείραμα καλείται 2^3 παραγοντικό πείραμα.

Χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς “+” και “-” για να παρασταθεί το υψηλό και το χαμηλό επίπεδο ενός παράγοντα κατασκευάζεται ένας πίνακας με τους οκτώ συνδυασμούς ο οποίος καλείται και πειραματικός πίνακας (design matrix).

Πίνακας 2.6: Πειραματικός πίνακας.

Συνδυασμός	A	B	C	Ετικέτες	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Υπάρχουν επτά βαθμοί ελευθερίας μεταξύ των οκτώ συνδυασμών στο 2^3 παραγοντικό πείραμα. Οι τρεις από αυτούς αφορούν τις κύριες επιδράσεις των A, B, C και οι υπόλοιποι τέσσερις βαθμοί σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις AB, AC, BC και ABC.

Για να εκτιμηθεί η κύρια επίδραση του παράγοντα A, δηλαδή όταν οι παράγοντες B και C είναι στο χαμηλό επίπεδο είναι $\frac{a-(1)}{n}$ όπου n είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του πειράματος. Παρομοίως όταν ο παράγοντας B είναι σε υψηλό και ο C σε χαμηλό επίπεδο η επίδραση του A είναι $\frac{a b - b}{n}$. Όταν ο B είναι σε χαμηλό και ο C

σε υψηλό επίπεδο τότε η επίδραση του A είναι $\frac{[ac-c]}{n}$. Τελικά, η επίδραση του A όταν και οι δύο άλλοι κύριοι παράγοντες είναι σε υψηλό επίπεδο είναι $\frac{[abc-bc]}{n}$.

Έτσι, η μέση επίδραση του A είναι ο μέσος αυτών των τεσσάρων δηλαδή

$$A = \frac{1}{4n} [a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc] \quad (2.11)$$

Επομένως, η επίδραση του A είναι απλώς ο μέσος των τεσσάρων συνδυασμών όπου το A είναι στο υψηλό επίπεδο (y_{A+}) μείον το μέσο των τεσσάρων συνδυασμών όπου το A είναι στο χαμηλό επίπεδο (y_{A-}) δηλαδή

$$A = y_{A+} - y_{A-} = \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n} \quad (2.12)$$

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (2.13)$$

το οποίο είναι το ίδιο με την εξίσωση 2.11.

Με εντελώς ανάλογο τρόπο η επίδραση του B υπολογίζεται ως

$$B = y_{B+} - y_{B-} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (2.14)$$

Για τον παράγοντα C έχουμε

$$C = y_{C+} - y_{C-} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (2.15)$$

Η αλληλεπίδραση δύο παραγόντων υπολογίζεται το ίδιο εύκολα. Παραστατικά αυτό γίνεται ως εξής:

Πίνακας 2.7: Τύποι παραστατικά.	
B	Μέση επίδραση του A
Υψηλό (+)	$\frac{[(abc - bc) + (ab - b)]}{2n}$
Χαμηλό (-)	$\frac{[(ac - c) + (a - (1))]}{2n}$
Διαφορά	$\frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{2n}$

Όμως η επίδραση του AB ισούται με

$$AB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n} \quad (2.16)$$

Αν τώρα γραφεί το δεξί μέλος της παραπάνω ισότητας σαν τη διαφορά δύο άλλων παραγόντων δηλαδή:

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} - \frac{bc + b + ac + a}{4n} \quad (2.17)$$

τότε η αλληλεπίδραση AB είναι γραμμένη με τη μορφή της διαφοράς των μέσων μεταξύ των επαναλήψεων. Με την ίδια λογική προκύπτουν οι αλληλεπιδράσεις AC και BC:

$$AC = \frac{[(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]}{4n} \quad (2.18)$$

$$BC = \frac{[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]}{4n} \quad (2.19)$$

Τέλος η αλληλεπίδραση ABC είναι:

$$ABC = \frac{[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]}{4n} \quad (2.20)$$

Για τον ευκολότερο υπολογισμό των πρόσημων των a , b , c κτλ. στην επίδραση ενός παράγοντα κατασκευάζεται ο πίνακας των συν και πλην. Υπενθυμίζεται ότι με συν συμβολίζεται ο εκάστοτε παράγοντας της στήλης όταν είναι σε υψηλό επίπεδο ενώ με πλην ο παράγοντας της στήλης όταν βρίσκεται στο χαμηλό επίπεδο. Τα πρόσημα για τις στήλες A, B, C προκύπτουν με τον παραπάνω τρόπο. Τα πρόσημα στις στήλες με τις αλληλεπιδράσεις προκύπτουν από το γινόμενο των πρόσημων της ίδιας γραμμής των παραγόντων της αλληλεπίδρασης. Έτσι για παράδειγμα αν χρειάζεται το πρόσημο του

παράγοντα AB πολλαπλασιάζονται τα πρόσημα της στήλης του παράγοντα A με τα αντίστοιχα πρόσημα (γραμμή με γραμμή) της στήλης του παράγοντα B.

Πίνακας 2.8: Πίνακας Συν και Πλην.

Συνδυασμός Παραγόντων	Παραγοντική Επίδραση							
	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

Ο παραπάνω πίνακας έχει ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Πρώτον, εκτός από τη στήλη I όλες οι υπόλοιπες στήλες έχουν τον ίδιο αριθμό συν και πλην. Δεύτερον, το άθροισμα των γινομένων των πρόσημων δύο οποιονδήποτε στηλών είναι πάντα μηδέν. Τρίτον, οποιαδήποτε στήλη πολλαπλασιαστεί με το I μένει η ίδια ενώ το τετράγωνο οποιουδήποτε παράγοντα κάνει πάντα I. Έτσι, η στήλη I λέγεται ταυτοτικό στοιχείο. Τέλος, το γινόμενο οποιονδήποτε δύο στηλών υπάρχει στον πίνακα. Για παράδειγμα $A * B = AB$ ενώ $AB * B = AB^2 = A$

Τα αθροίσματα τετραγώνων υπολογίζονται εύκολα αν κάθε επίδραση έχει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας. Στο 2^3 παραγοντικό πείραμα με n επαναλήψεις το άθροισμα τετραγώνων για κάθε επίδραση είναι:

$$SS = \frac{(\text{Διαφορά})^2}{8n} \quad (2.21)$$

2.7.2.1 Παράδειγμα Παραγοντικού Πειράματος 2^3

Αναλύεται μια διαδικασία παραγωγής ενός αεριούχου ποτού και εξετάζονται τρεις παράγοντες που εικάζεται ότι επηρεάζουν τη στάθμη του ποτού μέσα στο μπουκάλι. Οι παράγοντες είναι το επί τοις εκατό (%) ποσοστό σε ανθρακικό, η πίεση που ασκείται και η ταχύτητα μεταφοράς του μπουκαλιού πάνω στη γραμμή παραγωγής. Αν υποθεθεί πως χρησιμοποιούνται μόνο δύο επίπεδα για το ποσοστό σε ανθρακικό θα αντιστοιχιστεί ένα 2^3 παραγοντικό πείραμα με δύο επαναλήψεις. Τα δεδομένα, δηλαδή οι αποκλίσεις από το επιθυμητό επίπεδο στάθμης δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.9: Απεικόνιση Συνδυασμών πειράματος .

Ποσοστό ανθρακικού (A)	Πίεση (B)			
	25 psi		30 psi	
	Ταχύτητα γραμμής (C)		Ταχύτητα γραμμής (C)	
	200	250	200	250
10	-3	-1	-1	1
	-1	0	0	1
	-4 = (1)	-1 = c	-1 = b	2 = b
12	0	2	2	6
	1	1	3	5
	1 = a	3 = ac	5 = ab	11 = abc

Χρησιμοποιώντας τους τύπους 2.1- 2.21 εκτιμούνται οι επιδράσεις των παραγόντων:

$$A = \frac{1}{4n} [a - (1) + ab - b + ac - c + abc]_{bc} = \frac{1}{8} [24] = 3,00$$

$$B = 2,25$$

$$C = 1,75$$

$$AB = 0,75$$

$$AC = 0,25$$

$$BC = 0,50$$

$$ABC = 0,50$$

Τις μεγαλύτερες επιδράσεις φαίνεται να τις έχουν οι παράγοντες του ανθρακικού (A = 3,00), πίεση (B = 2,25), ταχύτητα (C = 1,75) και οριακά η αλληλεπίδραση του ανθρακικού και της πίεσης (AB = 0,75).

Υπολογίζονται το ίδιο εύκολα και τα αθροίσματα τετραγώνων:

$$SS_A = \frac{(24)^2}{16} = 36,00$$

$$SS_B = 20,25$$

$$SS_C = 12,25$$

$$SS_{AB} = 2,25$$

$$SS_{AC} = 0,25$$

$$SS_{BC} = 1,00$$

$$SS_{ABC} = 1,00$$

Το συνολικό άθροισμα τετραγώνων είναι $SST = 78,00$ και με αφαίρεση προκύπτει $SSE = 5,00$. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας ανάλυσης διακύμανσης:

Πίνακας 2.10: Ανάλυση Διακύμανσης.

Πηγή	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F ₀	P-Value
Ποσοστό ανθρακικού (A)	36,00	1	36,00	57,60	<0,0001
Πίεση (B)	20,25	1	20,25	32,40	0,0005
Ταχύτητα γραμμής (C)	12,25	1	12,25	19,60	0,0022
AB	2,25	1	2,25	3,60	0,0943
AC	0,25	1	0,25	0,40	0,5447
BC	1,00	1	1,00	1,60	0,2415
ABC	1,00	1	1,00	1,60	0,2415
Σφάλμα	5,00	8	0,625		
Σύνολο	78,00	15			

Παρατηρώντας τις τιμές P- Value από τον παραπάνω πίνακα το ποσοστό του ανθρακικού, η πίεση και η ταχύτητα της γραμμής είναι στατιστικά σημαντικοί παράγοντες σε επίπεδο 5%, αφού οι τιμές P- Value είναι μικρότερες από 0,05, ενώ η αλληλεπίδραση AB είναι και αυτή σημαντική σε επίπεδο 10% περίπου (9,43%), αφού η τιμή P- Value είναι μικρότερη από 0,10.

2.7.3 Το γενικευμένο 2^k παραγοντικό πείραμα

Όλα τα παραπάνω που ισχύουν για τα πειράματα με παράγοντες που κινούνται σε δύο επίπεδα μπορούν να γενικευθούν στο 2^k παραγοντικό πείραμα. Αυτό είναι ένα πείραμα με k παράγοντες οι οποίοι κινούνται σε δύο επίπεδα. Για ένα 2^k πείραμα το πλήρες μοντέλο θα περιέχει 2k - 1 επιδράσεις. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως για τους συνδυασμούς των παραγόντων συνεχίζει να

ισχύει. Βέβαια, καλό θα ήταν οι συνδυασμοί που θα αναφέρονται να αναγράφονται με την τυπική τους σειρά δηλαδή την standard σειρά. Για ένα 2^4 πείραμα, δηλαδή πείραμα με 4 παράγοντες οι οποίοι κινούνται σε 2 επίπεδα, η standard σειρά είναι (1), α, b, αb, c, αc, bc, αbc, d, αd, bd, αbd, cd, αcd, bcd και αbcd.

Για την επίλυση και πλήρη διερεύνηση ενός πειράματος 2^k ακολουθούνται κάποια βήματα [1]. Αυτά είναι:

1. Εκτίμηση των παραγοντικών επιδράσεων και εύρεση του πρόσημου τους. Αντιμετωπίζονται έτσι όλοι οι παράγοντες αρχικά δίχως να υπάρχει πρότερη γνώση για τη σημαντικότητα αυτών.
2. Κατασκευή αρχικού μοντέλου. Συνήθως για την επιλογή του αρχικού μοντέλου επιλέγεται το πλήρες μοντέλο με όλες τις κύριες επιδράσεις και όλες τις αλληλεπιδράσεις.
3. Κατασκευή του πίνακα ανάλυσης διακύμανσης και έλεγχοι της στατιστικής σημαντικότητας των διάφορων κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.
4. Απορρίπτοντας από το νέο μοντέλο τους στατιστικά μη σημαντικούς παράγοντες μπορεί να επαναπροσδιοριστεί το μοντέλο.
5. Ανάλυση και εξέταση καταλοίπων. Ελέγχεται, με τα κατάλοιπα, η επάρκεια του μοντέλου όσον αφορά την ικανότητα

του διεξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων καθώς επίσης επιβεβαιώνονται οι αρχικές υποθέσεις που έγιναν για την περαιτέρω ανάλυση. Πολλές φορές συμβαίνει να επαναπροσδιορίζεται το μοντέλο μετά από παραβίαση των συνθηκών για τα κατάλοιπα και τέλος,

6. ερμηνεία αποτελεσμάτων. Η διεξαγωγή συμπερασμάτων και αποφάσεων από το πείραμα ολοκληρώνεται με την γραφική ανάλυση δηλαδή την ανάλυση με γραφικές παραστάσεις είτε των κύριων επιδράσεων είτε των αλληλεπιδράσεων.

Σε πειράματα με μεγάλο αριθμό παραγόντων (μεγάλο k) είναι σχετική δύσκολη η γραφική απεικόνιση όλων των συνδυασμών των επιπέδων των παραγόντων επομένως προτιμάται εδωξένως ευκολότερος και ευκολομνημόνευτος τρόπος. Αν χρειάζεται να προσδιοριστεί η διαφορά (contrast) για την επίδραση των $AB \dots K$ αποδεικνύεται πως ισούται με το παρακάτω γινόμενο [1]:

$$\text{Contrast}_{AB \dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (2.22)$$

Το πρόσημο μέσα σε κάθε παρένθεση εξαρτάται από το αν ο εν λόγω παράγοντας περιέχει στην επιθυμητή διαφορά. Για παράδειγμα για ένα 2^3 πείραμα η διαφορά AB είναι [1]:

$$\text{Contrast}_{AB} = (a - 1)(b - 1)(c - 1) = abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b$$

Έτσι κατά τα γνωστά η κύρια επίδραση του παράγοντα ΑΒ...Κ είναι [1]:

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K}) \quad (2.23)$$

$$SS_{AB \dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K})^2 \quad (2.24)$$

όπου η ο αριθμός των επαναλήψεων του πειράματος.

2.8 Ειδικές Στατιστικές Ανάλυσης παραγοντικών πειραμάτων

Παρακάτω αναλύονται δύο συγγενικές μέθοδοι για να προσδιορίσουν ποιες επιδράσεις έχουν σημαντική διαφορά από το μηδέν. Στην πρώτη μέθοδο η σημασία της επίδρασης συγκρίνεται με το εκτιμώμενο σφάλμα (estimated standard error). Στην δεύτερη μέθοδο, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο παλινδρόμησης στο οποίο αυτές οι επιδράσεις συσχετίζονται με διάφορους συντελεστές [3]. Γενικά όλα τα αποτελέσματα που χρειάζονται, ώστε να γίνει η εκτίμηση των παραγόντων στην εξαρτημένη μεταβλητή, αναλύονται σε στατιστικά πακέτα που βγάζουν αυτόματα πίνακες Ανάλυσης Μεταβλητότητας αλλά και άλλα χρήσιμα στοιχεία.

2.8.1 Τυπικό Σφάλμα Επίδρασης (Standard Errors of the Effects)

Η σημασία των επιδράσεων μπορεί να υπολογιστεί με την σύγκριση της κάθε επίδρασης με το κάθε εκτιμώμενο σφάλμα. Σε ένα 2^k παραγοντικό πείραμα με επαναλήψεις, υπάρχει ένα σύνολο από $N = n2^k$ μετρήσεις. Η εκτιμώμενη επίδραση είναι η διαφορά μεταξύ δύο μέσων και κάθε μέσον υπολογίζεται από τις μισές μετρήσεις. Έτσι, η απόκλιση από την εκτιμώμενη επίδραση είναι [3]:

$$V(\text{Effect}) = \frac{\sigma^2}{N/2} + \frac{\sigma^2}{N/2} = \frac{\sigma^2}{n2^{k-2}} \quad (2.25)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i)^2}{(n-1)}, i = 1, 2, \dots, 2^k \quad (2.26)$$

2.8.2 Γραμμική Παλινδρόμηση (Regression Analysis)

Είναι μία διαδικασία που ενισχύει το DoE. Στις προηγούμενες διαδικασίες αναγνωρίστηκαν οι ελεγχόμενοι παράγοντες των παραγωγικών διαδικασιών που επηρέαζαν σημαντικά τις τιμές της απάντησης που ενδιέφερε τον μελετητή. Μετά τον εντοπισμό των παραμέτρων αυτών, το επόμενο λογικό βήμα είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών τους ώστε η εξαρτημένη μεταβλητή να

προσεγγίζει όσο περισσότερο γίνεται την επιθυμητή τιμή με τη μικρότερη δυνατή μεταβλητότητα.

Η πιο απλή μεταβλητή είναι όταν η μεταβλητή απόκρισης εκφράζεται ως γραμμική συνάρτηση των ελεγχόμενων μεταβλητών, για ένα 2^2 παραγοντικό πρόβλημα είναι [1, 3, 6]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (2.27)$$

Όπου β_0 είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων του πειράματος και είναι η σταθερά του πειράματος,

X_1, X_2 είναι -1 ή $+1$ ανάλογα με ποιο επίπεδο χρειάζεται να υπολογισθεί η μεταβλητή απόκρισης,

β_1, β_2 είναι η επίδραση του Α και του Β αντίστοιχα στην εξαρτημένη μεταβλητή διαιρεμένη με το 2.

Για 2^3 παραγοντικό πρόβλημα η εξίσωση είναι [5]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.28)$$

Πιο εξειδικευμένα αυτή η ανάλυση γίνεται με την Response Surface Methodology[1-4].

2.9 2^k Παραγοντικό Πείραμα χωρίς δυνατότητα επαναλήψεων (residual analysis)

Ας υποθέσει ότι οι συνθήκες του 2^k παραγοντικού πειράματος επιτρέπουν μία μόνο επανάληψη (unreplicated factorial). Μία μέθοδος ανάλυσης του παραπάνω πειράματος στηρίζεται στην υπόθεση ότι συγκεκριμένες υφηλού βαθμού αλληλεπιδράσεις (τρίτου βαθμού και πάνω, συνήθως οι μεγαλύτερου βαθμού στο πείραμα) είναι αμελητέες οπότε και απομακρύνονται από το μοντέλο κάνοντας την ανάλυση ευκολότερη. Ο Daniel (1959) απέδειξε ότι για να βρεθεί ποιοι παράγοντες έχουν αμελητέα επίδραση στο μοντέλο αρκεί να κατασκευαστεί ένα **διάγραμμα Κανονικής Κατανομής** (Normal Probability Plot) με τις επιδράσεις (effects) όλων των παραγόντων. Τότε, δεδομένου (αποδεικνύεται) ότι οι αμελητέες επιδράσεις κατανομούνται κανονικά, παραμένουν στο μοντέλο μόνο οι παράγοντες εκείνοι που οι επιδράσεις τους απέχουν σημαντικά από την κεντρική γραμμή [3].

2.10 Κλασματικά Πειράματα

Όταν ο αριθμός των συνδυασμών τιμών των ελεγχόμενων παραγόντων σε παραγοντικό πείραμα αυξηθεί απαγορευτικά, τότε εκτελείται το πείραμα που περιλαμβάνει κλάσμα μόνο των συνδυασμών του αρχικού παραγοντικού πειράματος. Τα πειράματα αυτού του είδους αποκαλούνται κλασματικά παραγοντικά πειράματα και ο σχεδιασμός τους ονομάζεται κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (fractional factorial design). Με τον κατάλληλο κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό είναι δυνατό να εκτιμηθούν όλες οι κύριες επιδράσεις των παραγόντων και ενδεχομένως ορισμένες αλληλεπιδράσεις χαμηλής τάξης, αλλά οπωσδήποτε όχι όλες οι δυνατές

αλληλεπιδράσεις. Σημειώνεται ότι τα κλασματικά παραγοντικά πειράματα διαφέρουν από τα παραγοντικά πειράματα με $n=1$ κατά το ότι στα πρώτα δεν πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς επιπέδων τιμών των παραγόντων.

Στα κλασματικά πειράματα οι αλληλεπιδράσεις που δεν εξετάζονται άμεσα συγχωνεύονται με κύριες επιδράσεις ή αλληλεπιδράσεις χαμηλότερης ή και ίδιας τάξης, τις οποίες επιδιώκει να εκτιμήσει το πείραμα. Αυτό σημαίνει ότι η εκτίμηση των τελευταίων δεν είναι αμιγής, αλλά εμπεριέχει και κάποιες αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης. Το γεγονός αυτό δεν προβληματίζει ιδιαίτερα εφόσον μπορεί να γίνει αποδεκτό ότι οι αλληλεπιδράσεις υψηλής τάξης είναι αμελητέες. Καθιστά όμως αναγκαίο τον προσεκτικό σχεδιασμό του πειράματος, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα με τον αποτελεσματικότερο τρόπο.

2.11 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε η μεθοδολογία των Σχεδιασμένων Πειραμάτων και πιο εκτενής αναφορά έγινε στα Παραγοντικά Πειράματα, αφού αυτά είναι και τα πιο συνηθέστερα στην βιομηχανική παραγωγή. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο απαραίτητος τεχνολογικός εξοπλισμός για το πείραμα, καθώς και το απαραίτητο λογισμικό του μετρητικού συστήματος, ώστε να γίνει κατανοητή η συλλογή των δεδομένων αλλά και οι συνθήκες του πειράματος. Επιπλέον γίνεται αναφορά στην πειραματική διάταξη και στις αρχικές συνθήκες του πειράματος. Επίσης στο επόμενο κεφάλαιο εκτελείται το βασικότερο από τα βήματα των Σχεδιασμένων Πειραμάτων, που είναι επιλογή των εξαρτημένων μεταβλητών με βάση τον σκοπό του πειράματος, εντοπισμός των παραγόντων και καθορισμός των επιπέδων τους.

2.12 Βιβλιογραφία

- [1] Γιώργος Ν. Ταγαράς, “Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας”, Καθηγητής Α.Π.Θ., Ζήτη, ISBN:960-431-706-7, 2001.
- [2] Gyung- Jin Park, “*Analytic Methods for Design Practice*”, Springer, ISBN: 978-1-84628-472-4, 2007.
- [3] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, Norma F. Hubele, “*Engineering Statistics*”, Wiley, ISBN: 0-471-17026-7.
- [4] S.K. Choudhury, G. Bartarya, “*Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pages 747–753, 2003.
- [5] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, “*Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)*”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 77, pages 319–326, 1998.
- [6] Christopher Chatfield, “*Statistics for technology*”, Chapman and Hall, third edition, 1983.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή Πειραματικής διάταξης και επιλογή Σχεδιασμένων Παραμέτρων

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	58
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Τεχνολογικός Εξοπλισμός και Λογισμικό Μετρητικού Συστήματος.....	60
3.3 Παράμετροι Πειράματος.....	63
3.4 Επιλογή Σχεδιασμένων Μεταβλητών.....	64
3.5 Σύνοψη.....	69
3.6 Βιβλιογραφία.....	70

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 2 υπάρχουν πολλές παράμετροι (εξαρτημένες και ανεξάρτητες) που επηρεάζουν τη φθορά των κοπτικών εργαλείων. Από το πλήθος αυτών των παραμέτρων επιλέχθηκαν ορισμένες, όπως οι δονήσεις και η θερμοκρασία κοπής, σε προηγούμενη διπλωματική εργασία που σκοπό είχε την εκτίμηση φθοράς κοπτικών εργαλείων [1]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνείται με βάση τον Σχεδιασμό Πειραμάτων το ενδεχόμενο οι παράμετροι αυτές που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη διπλωματική εργασία να είναι κατάλληλες για τη διακρίβωση της φθοράς σε κέντρο κατεργασίας.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής των φυσικών μεγεθών προς παρακολούθηση ήταν όμοια με αυτά σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [1]. Αυτά είναι η ευαισθησία των αισθητήριων οργάνων στις μεταβολές των φυσικών μεγεθών κατά τη φθορά του κοπτικού, η συσχέτιση μεταξύ του παραγόμενου σήματος κατά τη διαδικασία διάτρησης και της φθοράς, το επίπεδο της απόκλισης, η λειτουργικότητα των μεγεθών, καθώς και το οικονομικό κόστος του εξοπλισμού που είναι αναγκαίος για τη μέτρηση των μεγεθών[2]. Τα φυσικά μεγέθη και οι τεχνικές ελέγχου τους οι οποίες επιλέχθηκαν, είναι:

- Δονήσεις κοπτικού εργαλείου.
- Θερμοκρασία περιοχής κοπής.

Επομένως σκοπός της έρευνας είναι η εκτίμηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με τη θερμοκρασία και τη δόνηση στηριζόμενη στη μεθοδολογία του Σχεδιασμού Πειράματος που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και πιο συγκεκριμένα στην πραγματοποίηση παραγοντικών πειραμάτων. Παρακάτω περιγράφεται περιληπτικά ο απαραίτητος εξοπλισμός των μετρητικών συστημάτων και εξαρτημάτων καθώς και ο υπόλοιπος τεχνικός εξοπλισμός αλλά και το λογισμικό του μετρητικού συστήματος. Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές παράμετροι του πειράματος αλλά και η διαδικασία των πειραμάτων καθώς γίνεται ανάλυση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων και συγκεκριμένα των Παραγοντικών Πειραμάτων.

Η κυριότερη ενότητα αυτού του κεφαλαίου είναι η επιλογή των Σχεδιασμένων Μεταβλητών, όπου περιλαμβάνεται η επιλογή των εξαρτημένων μεταβλητών, των ανεξάρτητων παραγόντων και των κατάλληλων επιπέδων τους. Επίσης γίνεται αναφορά στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια του Σχεδιασμού Πειραμάτων για το λόγο ότι το πείραμα είναι συνέχεια με προηγούμενη διπλωματική εργασία και

εξανάγκασε στη χρήση πλακών ίδιας σύστασης από τις οποίες είχε απομείνει συγκεκριμένος αριθμός.

3.2 Τεχνολογικός Εξοπλισμός και Λογισμικό Μετρητικού Συστήματος

Η ανάπτυξη του μετρητικού συστήματος για την παρακολούθηση των λειτουργικών παραμέτρων έγινε στο **κάθετο κέντρο κατεργασίας** (CNC φρέζα) Yang Eagle SMV – 1000 (Σχήμα 3.1), το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρία «Yang Iron Works Company». Το κάθετο κέντρο κατεργασίας βρίσκεται στο μηχανουργείο της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου.

Το κάθετο κέντρο κατεργασίας Yang Eagle SMV – 1000 έχει τη δυνατότητα να κατεργάζεται στους τρεις άξονες X, Y και Z. Το τραπέζι εργασίας του μπορεί να κινείται στους άξονες X και Y, ενώ η κεφαλή του στον άξονα Z, κάνοντας το κατάλληλο για την περάτωση των πειραμάτων στην περίπτωση της διάτρησης.



Σχήμα 3.1: Κάθετο κέντρο κατεργασίας Yang Eagle SMV – 1000.

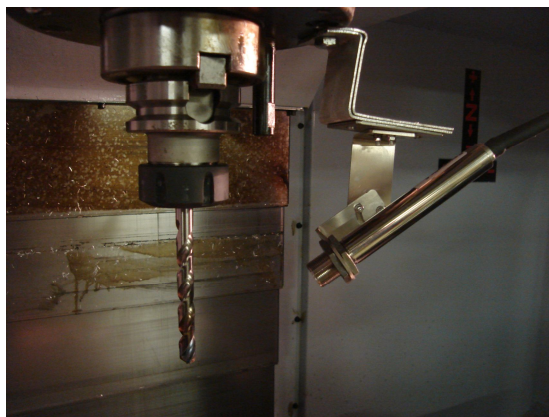
Επίσης χρησιμοποιήθηκαν **επιταχυνσιόμετρα**, δηλαδή ηλεκτρομηχανικές συσκευές που έχουν την ικανότητα να μετρούν δυνάμεις επιτάχυνσης και η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Για την διεκπεραίωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο ολοκληρωμένα σετ επιταχυνσιομέτρων της εταιρίας

Kistler, τύπου 8702/4B25. Η τοποθέτηση των επιταχυνσιομέτρων ήταν όμοια με αυτή σε προηγούμενη πειραματική διάταξη και φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η τροφοδοσία των επιταχυνσιομέτρων έγινε με το τροφοδοτικό τύπου 5134B0E της εταιρίας KISTLER.



Σχήμα 3.2: Εγκατεστημένα επιταχυνσιόμετρα.

Το εγχείρημα της λήψης και καταγραφής της θερμοκρασίας του κοπτικού εργαλείου, υλοποιήθηκε με τη χρήση **υπέρυθρου θερμομέτρου** μη – επαφής (infrared thermometer). Στοχεύοντας στο υλικό, το υπέρυθρο θερμοόμετρο συλλέγει την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ενέργεια που περνά στην ατμόσφαιρα και μέσω του οπτικού του συστήματος και του ηλεκτρονικού του κυκλώματος, τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα που απεικονίζεται ως θερμοκρασιακό μέγεθος. Η τοποθέτηση του θερμομέτρου, όπως και αυτής των επιταχυνσιομέτρων, ήταν όμοια προηγούμενη πειραματική διάταξη και φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Και για τα δύο εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα τροφοδοτικά.



Σχήμα 3.3: Εγκατεστημένο υπέρυθρο θερμοόμετρο.

Η συλλογή των δεδομένων από τα περιφερειακά αισθητήρια όργανα που εγκαταστάθηκαν με σκοπό την πρόγνωση φθοράς κοπτικών εργαλείων, έγινε από το **Data Acquisition** (μονάδα συλλογής και πρόσκτησης δεδομένων) CompactDAQ – 9172 της εταιρίας National Instruments.

Η περαιτέρω συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση αρκετών λογισμικών (software) πακέτων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το **TopSolid**, το οποίο είναι ένα πλήρως παραμετρικό και ολοκληρωμένο CAD/CAM λογισμικό, που παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού αντικειμένων τριών διαστάσεων, καθώς και την ολοκληρωμένη εικονική κατεργασίας τους για την εξαγωγή του G και M κώδικα. Με τη χρήση αυτού του προγράμματος είχε σχεδιαστεί η κατεργασία του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε στην εκτέλεση των πειραμάτων[1].

Στη συνέχεια, κατά τη σύνδεση της μονάδας συλλογής και πρόσκτησης δεδομένων (Data Acquisition DAQ) με τον υπολογιστή, γίνεται η λήψη των ακατέργαστων σημάτων. Μέσω του λογισμικού **LabVIEW** 8.0 ελέγχεται η λειτουργία του DAQ για την απόκτηση αυτών των σημάτων, καθώς και η παρουσίασή τους σε μορφή που μπορεί να κατανοήσει και να επεξεργαστεί ο χρήστης. Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν 2 εικονόργανα (Virtual Instruments) με τη χρήση του λογισμικού LabView 8.0 τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτήν την μελέτη. Το πρώτο εικονόργανο προγραμματίστηκε για τη λήψη, την απεικόνιση και την αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται από το Data Acquisition. Το δεύτερο εικονόργανο που αναπτύχθηκε παρείχε την δυνατότητα της επεξεργασίας των δεδομένων, πραγματοποιώντας τη στατιστική ανάλυσή τους.

Λόγω της πολυπλοκότητας κατά τον προγραμματισμό σε LabView 8.0 καθώς και της χρονοβόρας διαδικασίας κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης, επιλέχθηκε το λογισμικό **Matlab** R2008a σαν εφεδρικό λογισμικό για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων. Με τη χρήση του ευρέως διαδεδομένου λογιστικού πακέτου **Microsoft EXCEL**, έγινε η τελική επεξεργασία των στατιστικών μεγεθών.

Για την περαιτέρω ανάλυση σχετικά με τον εξοπλισμό των μετρητικών συστημάτων και εξαρτημάτων καθώς και τον υπόλοιπο τεχνικό εξοπλισμό αλλά και το λογισμικό του μετρητικού συστήματος υπάρχει λεπτομερής αναφορά στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας του κ. Αμοιρίδη Ηρακλή με θέμα: Παρακολούθηση λειτουργικών παραμέτρων κέντρου κατεργασίας και εκτίμηση φθοράς κοπτικών εργαλείων: περίπτωση διάτρησης [1].

3.3 Παράμετροι Πειράματος

Στην αρχή κάθε πειράματος χρειάζεται να υπολογιστούν και διάφοροι παράμετροι ώστε να δημιουργήσουν τα όρια της πειραματικής διαδικασίας αλλά και να δώσουν τα βασικά χαρακτηριστικά της.

Η κατεργασία της διάτρησης των οπών στα πλαίσια των πειραμάτων, επιλέχθηκε να γίνει σε υλικό λαμαρίνα αντιτριβής XAR 450 υψηλής σκληρότητας. Οι διαστάσεις του υλικού ήταν 170mm X 170mm και 20mm πάχος. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες και η χημική σύσταση της λαμαρίνας.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες και χημική σύσταση λαμαρίνας XAR 450.

Σκληρότητα (Hb)	410-490
Όρια διαρροής - Yield Point $R_{p0.2}$ (N/mm²)	1200
Αντοχή εφελκυσμού Tensile strength R_m (N/mm²)	1350
Επιμήκυνση - Elongation A5 (%)	10
Χημική Σύσταση	0,95 C 1,10 Mn 0,60 Cr 0,10 V 0,60 W

Μια πολύ σημαντική παράμετρος των πειραμάτων, ήταν η επιλογή του ιδανικού κοπτικού εργαλείου (τρυπάνι), για την διάτρηση των οπών και την εκτίμηση της φθοράς του. Λόγω της υψηλής σκληρότητας του προς κατεργασία υλικού, επιλέχθηκε τρυπάνι με γωνία ακίδος (Point Angle) 135° [3] και γωνία έλικα (Helix Angle) 35° με 42°. Επίσης για μεγαλύτερη ακαμψία του τρυπανιού, το μήκος του παρέμεινε σε κανονικό επίπεδο των 133 mm και με διάμετρο 10mm. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται το επιλεγμένο τρυπάνι σύμφωνα με τα πρότυπα DIN 338.



Σχήμα 3.4: Τρυπάνι HSS κοβαλτίου 5%.

Ο ρυθμός με τον οποίο δειγματοληπτεί η μονάδα συλλογής και πρόσκτησης δεδομένων της μετρητικής διάταξης, είναι μια κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει τη σωστή παρακολούθηση των αισθητήριων οργάνων. Καθώς τα επιταχυνσιόμετρα έχουν τη δυνατότητα δειγματοληψίας 8KHz, ο ρυθμός δειγματοληψίας του συλλέκτη δεδομένων παραμετροποιείται στα 8 KHz για όλα τα κανάλια εισόδου δεδομένων. Σύμφωνα με το θεώρημα του Nyquist η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας για την αποφυγή της ψεύδισης (aliasing), πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της συχνότητας του φαινομένου προς παρακολούθηση και ονομάζεται συχνότητα ή ρυθμός δειγματοληψίας Nyquist [4].

Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται συνοπτικά όλες οι παράμετροι διάτρησης των οπών κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι πειράματος.

Υλικό κατεργασίας	Λαμαρίνα XAR 450
Εργαλείο διάτρησης	Τρυπάνι HSS με 5% Co
Διάμετρος τρυπανιού	10 mm
Στροφές ατράκτου	600 rpm
Ρυθμός δειγματοληψίας	8 KHz
Ροπή σύσφιξης δεστρών	22 Nm
Χρήση ψυκτικού υγρού	Όχι

3.4 Επιλογή Σχεδιασμένων Μεταβλητών

Ο αρχικός στόχος του πειράματος ήταν, με τις συγκεκριμένες πειραματικές παραμέτρους, να σχεδιαστεί το πείραμα και να μπορεί να εκτιμηθεί η κατάσταση του κοπτικού σε σχέση με τη δόνηση και την θερμοκρασία. Η δόνηση και η θερμοκρασία όμως είναι μεταβλητές μη ελεγχόμενες κατά τη διάρκεια της διάτρησης όπως και η

φθορά του κοπτικού. Επομένως η εκτίμησή τους θα μπορούσε να γίνει με Σχεδιασμένα Πειράματα τα οποία θα περιελάμβαναν αυτές τις μεταβλητές ως απαντητικές (response variables) και τα πειράματα θα πραγματοποιούνταν με σταθερές κοπτικές συνθήκες και με κάποιες Σχεδιασμένες Μεταβλητές (designed variables) σε επίπεδα. Τέτοιες μεταβλητές, ελέγξιμες από τον μελετητή, στο συγκεκριμένο πείραμα με τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη είναι: το βάθος κοπής, η πρόωση του κινητήρα, οι στροφές της ατράκτου, η χρήση ψυκτικού, η ηλικία του κοπτικού, το υλικό κατεργασίας κα. [5].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου, η ευαισθησία των αισθητήριων οργάνων στις μεταβολές των φυσικών μεγεθών κατά τη φθορά του κοπτικού, η συσχέτιση μεταξύ του παραγόμενου σήματος κατά τη διαδικασία διάτρησης και της φθοράς, το επίπεδο της απόκλισης, η λειτουργικότητα των μεγεθών, καθώς και το οικονομικό κόστος του εξοπλισμού που είναι αναγκαίος για τη μέτρηση των μεγεθών, είχαν ελεγχθεί σε προηγούμενη έρευνα. Επομένως η χρήση ψυκτικού υγρού για παράδειγμα, θα μπορούσε να διαταράξει την πειραματική διαδικασία και τα παραγόμενα σήματα να είχαν μεγάλες αποκλίσεις ή η λειτουργία του θερμομέτρου να περιελάμβανε αστοχίες. Επίσης για το συγκεκριμένο υλικό κατεργασίας είχαν πραγματοποιηθεί δοκιμές για το στήσιμο των επιταχυνσιομέτρων και έλεγχοι των τιμών τους, καθώς επίσης και ολόκληρος ο λογισμικός εξοπλισμός ήταν βασισμένος στις διαστάσεις του συγκεκριμένου κομματιού κατεργασίας. Έτσι από τις ελεγχόμενες μεταβλητές που θα μπορούσαν να συμμετάσχουν στην πειραματική διαδικασία απέμειναν το βάθος κοπής, η πρόωση του κινητήρα και οι στροφές της ατράκτου και η ηλικία του κοπτικού.

Οι τρεις πρώτες μεταβλητές μπορούν να κυμανθούν σε δύο επίπεδα. Η μεταβλητή ηλικία του κοπτικού θεωρείται ότι μπορεί να αυξάνεται ανά οπή. Έτσι τα επίπεδα που θα μπορούσε να κυμαίνεται είναι όσα οι οπές σε κάθε πλάκα, ή και λιγότερα, ανάλογα με την επιλογή του μελετητή. Επομένως ο παράγοντας ηλικία του κοπτικού δεν επηρεάζει τον απαραίτητο αριθμό των κομματιών κατεργασίας, γιατί τα επίπεδά του δεν αλλάζουν ανά κομμάτι, αλλά σε κάθε κομμάτι. Δηλαδή σε κάθε πλάκα η ηλικία του κοπτικού εναλλάσσεται σε όλα τα επίπεδα, ενώ οι άλλες τρεις μεταβλητές παραμένουν στα ίδια επίπεδα σταθερές. Η αλλαγή των τριών μεταβλητών στα υπόλοιπα επίπεδα γίνεται σε κάθε εναλλαγή της πλάκας.

Επομένως για να εφαρμοστεί η μεθοδολογία του Σχεδιασμένου Πειράματος και πιο συγκεκριμένα να εκτελεστεί Παραγοντικό Πείραμα χρειάζεται να υπολογισθούν οι απαραίτητοι συνδυασμοί των επιπέδων των παραγόντων, ώστε να υπολογισθεί ο απαραίτητος αριθμός πλακών (αφού σε κάθε συνδυασμό οι υπόλοιποι παράμετροι του πειράματος πρέπει να είναι σταθεροί, δηλαδή σε κάθε συνδυασμό καινούριο-α κομμάτι-α κατεργασίας). Οι απαραίτητοι συνδυασμοί είναι ίσοι με το γινόμενο των επιπέδων των

σχεδιασμένων μεταβλητών. Επειδή ο παράγοντας ηλικία δεν αλλάζει επίπεδο ανά πλάκα δεν συμπεριλαμβάνεται στους συνδυασμούς από τους οποίους θα προκύψει ο αναγκαίος αριθμός των κομματιών κατεργασίας. Επομένως υπάρχουν τρεις ελεγχόμενες μεταβλητές και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να κυμαίνονται σε δύο επίπεδα (υψηλό και χαμηλό επίπεδο), άρα οι συνδυασμοί των επιπέδων είναι 8. Επομένως χρειάζονται 8 πλάκες κατεργασίας για να ελεγχθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των μεταβλητών και των επιπέδων τους.

Προκειμένου το πείραμα να ελέγξει και να εκτιμήσει τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν για την εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων σε προηγούμενη διπλωματική εργασία, χρειάστηκε οι πλάκες κατεργασίας να είναι όμοιας σύστασης με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη διπλωματική εργασία. Από αυτές τις πλάκες διαθέσιμες ήταν 5, επομένως χρειαζόταν να απορριφθεί ένας ακόμη παράγοντας λόγω υλικού περιορισμού και έτσι οι συνδυασμοί να κατέληγαν στους 4. Επιλέχθηκαν να μην εξετασθούν οι στροφές της ατράκτου, οι οποίες κρατήθηκαν σταθερές στα 600rpm. Έτσι το πείραμα μετατράπηκε σε παραγοντικό πείραμα με ελεγχόμενες μεταβλητές το βάθος κοπής (χιλιοστά), την πρόωση του κινητήρα (mm/m) και την ηλικία του κοπτικού εργαλείου (αριθμός οπής). Με βάση τις διαστάσεις του κομματιού κατεργασίας αλλά και σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή των τρυπανιών, τα επίπεδα του βάθους κοπής επιλέχθηκαν να είναι από 7,5 χιλιοστά έως 15 χιλιοστά και η πρόωση από 60 mm/m έως 120mm/m, με σκοπό τη δημιουργία συνθηκών ομοίων με αυτών των μηχανουργιών και όχι ακραίων συνθηκών. Τελικά το Παραγοντικό πείραμα που θα εξετασθεί, αποτελείται από δύο παράγοντες, το βάθος κοπής και την πρόωση του κινητήρα, που κυμαίνονται σε 2 επίπεδα και από ένα τρίτο παράγοντα, την ηλικία του κοπτικού εργαλείου, που έχει παραπάνω από 2 επίπεδα.

Σε κάθε πλάκα το κοπτικό εργαλείο χρειάζεται να είναι καινούριο έτσι ώστε και οι τέσσερις πλάκες να έχουν τις ίδιες αρχικές συνθήκες κατεργασίας και οι μόνες αλλαγές στις εξαρτημένες μεταβλητές να επέρχονται από την εναλλαγή των δύο, σχεδιασμένων πλέον, μεταβλητών στα επίπεδά τους και την ηλικία του κοπτικού. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα επίπεδα των δύο ελεγχόμενων μεταβλητών καθώς και όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των μεταβλητών αλλά και η σειρά με την οποία έγιναν τα πειράματα.

Πίνακας 3.3: Επίπεδα παράγοντα βάθους κοπής (A).		
Βάθος κοπής (A)	Χαμηλό	7,5 χιλ.
	Υψηλό	15 χιλ.

Πίνακας 3.4: Επίπεδα παράγοντα πρόωσης (B).		
Πρόωση (B)	Χαμηλό	60 mm/m
	Υψηλό	120mm/m

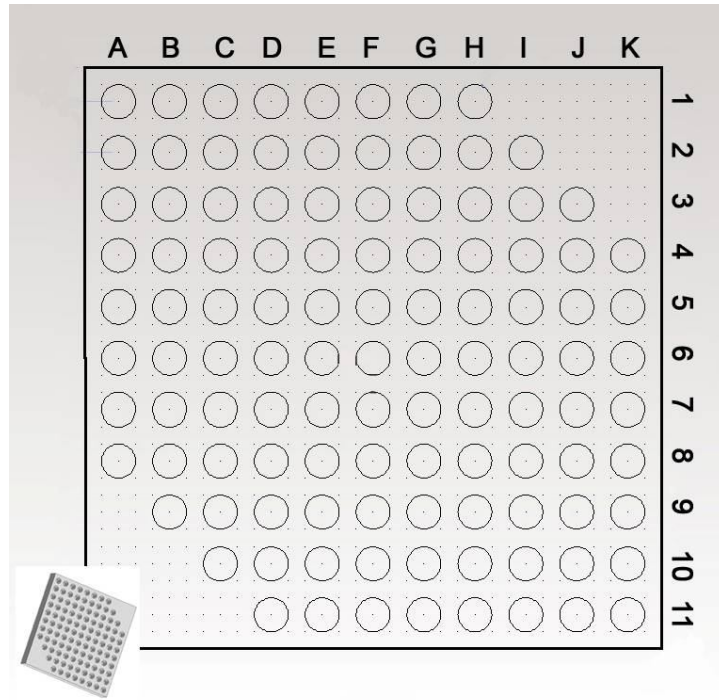
Πίνακας 3.5: Συνδυασμοί σε κάθε πλάκα.		
	B χαμηλό	B υψηλό
A χαμηλό	1^η πλάκα	2^η πλάκα
A υψηλό	3^η πλάκα	4^η πλάκα

Σε κάθε πλάκα κατεργασίας επομένως συλλέγονται μετρήσεις κατά τη διάρκεια της κοπτικής διαδικασίας για δύο μεταβλητές: την δόνηση και την θερμοκρασία. Λόγω του περιορισμένου αριθμού κομματιών κατεργασίας η μέτρηση της φθοράς ήταν αδύνατη με αυτόν τον τρόπο αφού για να μετρηθεί χρειαζόταν το κάθε κοπτικό να δημιουργεί οπές μέχρι την θραύση του, πράγμα αδύνατο να συμβεί σε μία πλάκα ανά κοπτικό εργαλείο με αυτές τις κοπτικές συνθήκες. Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας έγινε προσπάθεια μέτρησης της φθοράς με μικροσκόπιο, αλλά ήταν αδύνατον να βρεθεί σε χιλιοστά η φθορά του κοπτικού αφού δεν υπήρχε αναλογική κλίμακα στο μικροσκόπιο.

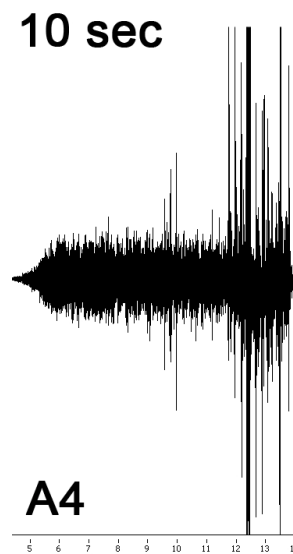
Κατά την διάρκεια του πειράματος, έγινε η αποθήκευση των συλλεγόμενων σημάτων των αισθητήριων οργάνων, στο σκληρό δίσκο του φορητού υπολογιστή. Σύμφωνα με την τοπολογία των οπών στο κομμάτι κατεργασίας (Σχήμα 3.5), η αποθήκευση των δεδομένων έγινε κατά γραμμές, συμπεριλαμβάνοντας και τις χρονικές περιόδους μη διάτρησης μεταξύ των οπών. Οι οπές που πραγματοποιήθηκαν ανά κομμάτι κατεργασίας ήταν 109. Επομένως ο παράγοντας ηλικία έχει τη δυνατότητα να κυμαίνεται σε 109 επίπεδα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι επιλογές των επιπέδων αυτού του παράγοντα αλλά και οι δυνατοί συνδυασμοί με τους υπόλοιπους παράγοντες.

Για την ανάλυση των παραπάνω δεδομένων, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των σημάτων κατά την οποία το κοπτικό εργαλείο (τρυπάνι) βρισκόταν σε διαδικασία διάτρησης, δηλαδή κατά την διάρκεια δημιουργίας των 109 οπών σε κάθε πλάκα. Η χρονική διάρκεια της διάτρησης κάθε οπής όπως και ο ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ των οπών υπολογίστηκαν σε κάθε πλάκα ξεχωριστά αφού άλλαζε η πρόωση και το βάθος κοπής. Η χρονική διάρκεια της διάτρησης κάθε οπής υπολογίστηκε στα 10 δευτερόλεπτα, με αρχή την επαφή των κοπτικών ακμών στην επιφάνεια του υλικού κατεργασίας και τέλος την εξαγωγή του τρυπανιού από την οπή. Με βάση τη συχνότητα

δειγματοληψίας του πειράματος 8KHz, κάθε οπή περιείχε 83330 τιμές. Τα παραπάνω δεδομένα κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με το είδος μέτρησής τους (δονήσεις, θερμοκρασία) και αποθηκεύτηκαν με βάση τη θέση τους στο κομμάτι κατεργασίας. Στο Σχήμα 3.6 φαίνονται τα δεδομένα των δονήσεων μιας οπής μετά την αρχική επεξεργασία διάσπασης τους από το αρχικό αρχείο.



Σχήμα 3.5: Συντεταγμένες οπών στο κομμάτι κατεργασίας.



Σχήμα 3.6: Δονήσεις οπής A4 μετά την αρχική επεξεργασία διάσπασης.

3.5 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο απαραίτητος εξοπλισμός των μετρητικών συστημάτων και εξαρτημάτων καθώς και ο υπόλοιπος τεχνικός εξοπλισμός αλλά και το λογισμικό του μετρητικού συστήματος, ώστε να κατανοηθεί η διαδικασία πρόσκτησης των δεδομένων από τις μετρήσεις. Επίσης πραγματοποιήθηκε με τη Μεθοδολογία του Σχεδιασμένου Πειράματος η επιλογή των ελεγχόμενων μεταβλητών και των επιπέδων τους ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο επηρεάζουν τις εξαρτημένες μεταβλητές. Έτσι σε αυτό το στάδιο οριοθετήθηκαν και παρουσιάστηκαν οι βασικές παράμετροι του πειράματος.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυση των μετρήσεων με τη χρήση της μεθοδολογίας των Σχεδιασμένων Πειραμάτων με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS.

3.6 Βιβλιογραφία

- [1] Αμοιρίδης Ηρακλής, “ Παρακολούθηση λειτουργικών παραμέτρων κέντρου κατεργασίας και εκτίμηση φθοράς κοπτικών εργαλείων, περίπτωση διάτρησης”, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Διπλωματική εργασία, Ιούλιος 2009.
- [2] Erkki Jantunen & Harri Jokinen, “Automated On-Line Diagnosis of Cutting Tool Condition”, International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing, 4(3&4) 273-287, 1996.
- [3] Παντελής Ν. Μπότσαρης, Παναγιώτης Δ. Σπάρης, “Τεχνολογία Παραγωγής Ι”, Εταιρία Αξιοποίησης και Διαχειρίσεις Περιουσίας Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, Ξαnthi, 2008.
- [4] Ευάγγελος Ζέρβας, “Δειγματοληψία - Θεώρημα του Nyquist”, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004
http://gallagher.di.uoa.gr/eap/plh22_node13.html (24/5/2009).
- [5] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, Norma F Hubele, “Engineering Statistics”, Wiley, ISBN 0-471-17026-7.

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	71
4.1 Εισαγωγή.....	72
4.2 Πειραματικά αποτελέσματα θερμοκρασιών στην περιοχή κοπής.....	73
4.2.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση.....	76
4.2.2 Ανάλυση πειράματος με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα.....	77
4.2.3 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα.....	84
4.3 Πειραματικά αποτελέσματα δονήσεων στην περιοχή κοπής.....	89
4.3.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση.....	93
4.3.2 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα.....	94
4.4 Σύνοψη.....	100
4.5 Βιβλιογραφία.....	101

4.1 Εισαγωγή

Μετά την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού μετρήσεων καθώς και τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων μέσω ειδικού λογισμικού, αλλά και την διάκριση των Σχεδιασμένων μεταβλητών ξεκίνησε η διαδικασία διεξαγωγής των Σχεδιασμένων Πειραμάτων. Το σύνολο των πειραμάτων διεξήχθη στο χώρο του μηχανουργείου της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, σε 2 φάσεις.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με την διαδικασία που εξηγήθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο, σε πίνακες του Excel ανά κατηγορία και παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Μετά την επεξεργασία τους υπολογίστηκαν για κάθε οπή τέσσερις στατιστικές παράμετροι: Μέγιστο (Maximum), Διακύμανση (Variance), Αριθμητικός μέσος (Mean) και Μέση τετραγωνική τιμή (Root Mean Square RMS) των συχνοτήτων των δονήσεων και της θερμοκρασίας του κοπτικού κατά τη διάρκεια της διάτρησης, ως οι πιο συνηθέστερες στην στατιστική. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα Σχεδιασμένα Πειράματα, δηλαδή θα υπολογιστούν οι κύριες επιδράσεις των παραγόντων, οι αλληλεπιδράσεις τους και θα εφαρμοστεί Γραμμική Παλινδρόμηση ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση των τιμών της θερμοκρασίας της περιοχής κοπής και των δονήσεων. Τους συντελεστές της Γραμμικής Παλινδρόμησης τους βγάζει αυτόματα το SPSS.

Τα Σχεδιασμένα Πειράματα και κυρίως τα Παραγοντικά Πειράματα είναι ευρέως διαδεδομένα στις πειραματικές διεργασίες της βιομηχανίας. Αφού το βιομηχανικό περιβάλλον είναι ανταγωνιστικό και εξελισσόμενο, οι επιστήμονες-ερευνητές είναι αναγκασμένοι να καταφεύγουν στη διεξαγωγή πειραμάτων για την πλήρη κατανόηση σύνθετων φαινομένων. Τα πειράματα αυτά χρειάζεται λόγω κόστους να είναι τα απαραίτητα αναγκαία και να αποκομίζονται οι μέγιστες πληροφορίες, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω των Σχεδιασμένων Πειραμάτων. Γι' αυτόν τον λόγο υπάρχουν αρκετά Στατιστικά Πακέτα, τα οποία είναι έτοιμα για την ανάλυση αποτελεσμάτων Σχεδιασμένων Πειραμάτων και είναι αρκετά κατανοητά και εύχρηστα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων το Στατιστικό Πακέτο SPSS Statistics (Version 17), το οποίο είναι ένα ισχυρό σύστημα ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων και κυριαρχεί τα τελευταία χρόνια στην παγκόσμια αγορά του στατιστικού λογισμικού [1].

4.2 Πειραματικά αποτελέσματα Θερμοκρασιών στην περιοχή κοπής

Κατά την ανάλυση και εξαγωγή των αριθμητικών μέσων θερμοκρασίας περιοχής κοπής στη διάρκεια διάτρησης κάθε οπής, παρουσιάζεται μια αυξητική τάση των τιμών. Η μέση τιμή \bar{x} , των τιμών $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ ενός δείγματος N είναι ο αριθμητικός μέσος όρος τους και υπολογίζεται από τη σχέση [2]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (4.1)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες του Excel, στους οποίους έγινε η καταγραφή των δεδομένων ανά οπή. Σε κάθε κελί υπάρχει η μετρούμενη θερμοκρασία της αντίστοιχης οπής. Για παράδειγμα στο κελί 1Α είναι η μετρούμενη θερμοκρασία (30,24 °C) για την πρώτη οπή που πραγματοποιήθηκε. Οι οπές δημιουργήθηκαν κατά σειρά, δηλαδή πρώτα 1Α,1Β,...,1Η και στην συνέχεια 2Α,2Β,...,2Ι.

Πίνακας 4.1 : Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το πρώτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 1).

Μέσος όρος (Mean) Θερμοκρασίας °C												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	30,24	39,84	46,92	49,77	53,49	57,03	60,40	62,46				50,02
2	65,07	64,79	66,72	67,47	68,73	69,24	69,51	69,02	68,59			67,68
3	70,96	71,15	69,50	69,75	69,92	70,05	70,11	73,25	68,43	69,84		70,29
4	68,72	69,73	67,63	67,73	67,43	68,53	67,46	66,37	74,58	69,08	70,29	68,87
5	69,85	69,33	67,48	68,62	67,27	68,28	71,00	68,96	69,08	71,62	68,80	69,12
6	67,53	63,89	64,80	64,62	68,27	65,73	66,72	66,38	66,41	65,55	65,78	65,97
7	68,42	66,65	66,43	66,87	67,63	67,94	69,44	67,75	69,15	69,15	70,28	68,16
8	78,92	77,28	80,48	83,61	81,70	80,15	82,05	81,27	80,73	79,96	86,81	81,18
9		81,26	83,87	85,40	85,21	88,02	89,04	89,67	92,89	90,01	91,80	87,72
10			89,20	92,44	91,42	96,19	102,28	103,28	106,67	99,56	108,35	98,82
11				95,31	99,91	102,54	104,09	105,04	105,21	106,24	102,81	102,64
Workpiece Average											75,50	

Πίνακας 4.2 : Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το δεύτερο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 2).

Μέσος όρος (Mean) Θερμοκρασίας °C												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	24,10	28,09	36,84	46,38	55,85	61,22	63,92	67,01				47,92
2	69,89	72,68	75,97	79,56	82,51	84,10	84,60	85,22	86,39			80,10
3	85,60	87,82	90,10	90,35	93,77	92,75	93,57	92,30	91,49	91,59		90,93
4	88,16	90,50	91,85	93,79	97,15	96,28	96,13	99,67	96,81	92,83	88,36	93,78
5	90,07	92,57	95,70	96,67	97,60	97,29	95,77	95,19	94,65	95,27	94,60	95,03
6	91,04	94,62	96,84	97,98	101,08	103,48	101,72	100,10	97,57	96,54	95,71	97,88
7	93,28	94,79	97,64	99,08	101,57	100,61	102,03	100,85	100,08	97,82	96,38	98,56
8	93,64	96,74	97,96	101,54	101,60	101,40	100,67	100,41	99,66	99,21	98,05	99,17
9		95,99	99,23	100,24	101,90	100,96	97,52	94,88	93,83	92,16	91,68	96,84
10			92,38	90,15	88,74	89,19	88,90	88,52	88,84	89,46	89,88	89,56
11				92,06	93,50	93,92	94,71	94,50	94,43	94,02	94,03	93,90
Workpiece Average												89,43

Πίνακας 4.3: Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το τρίτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 3).

Μέσος όρος (Mean) Θερμοκρασίας °C												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	31,70	48,97	62,15	70,12	78,47	82,36	86,25	88,41				68,55
2	86,61	86,42	91,04	91,26	92,68	92,65	96,28	96,11	94,15			91,91
3	89,52	94,28	96,09	98,43	92,43	97,12	97,86	97,70	96,54	95,06		95,50
4	92,07	94,09	93,79	96,66	92,54	92,78	96,35	96,86	94,94	91,64	92,07	93,98
5	90,19	94,12	93,75	96,27	95,32	94,21	97,05	96,75	97,15	96,08	98,03	95,36
6	95,39	92,72	93,18	96,11	91,75	96,00	95,19	97,02	99,11	95,26	95,47	95,20
7	90,06	96,10	97,72	97,79	97,02	95,99	96,13	96,95	94,65	93,65	96,61	95,70
8	92,33	95,64	96,80	96,32	98,09	96,22	99,20	96,82	96,07	94,22	92,70	95,85
9		92,39	93,64	92,80	94,46	95,53	93,12	95,23	94,41	94,26	94,27	94,01
10			93,79	94,00	93,73	92,17	95,80	89,67	93,19	91,83	90,26	92,71
11				87,83	88,65	90,67	95,84	95,29	92,69	89,44	90,14	91,32
Workpiece Average												91,83

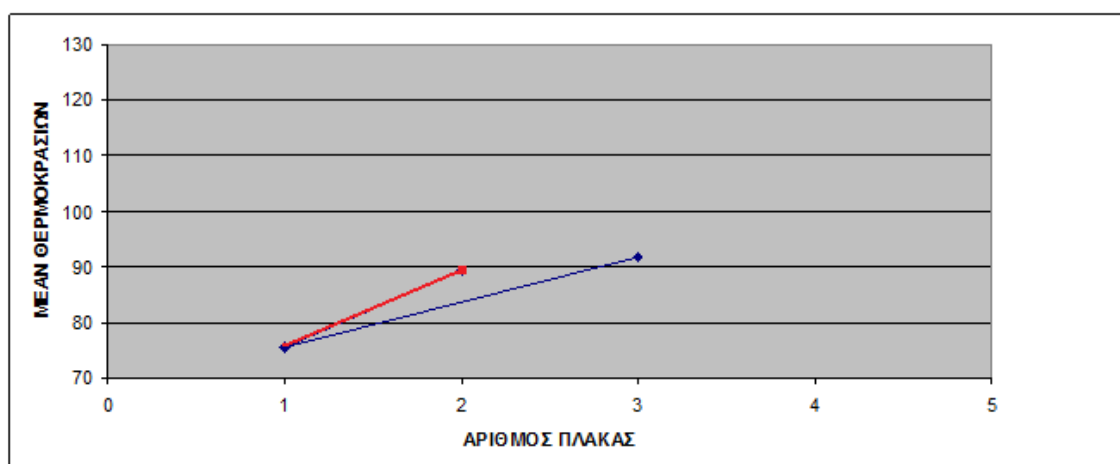
Πίνακας 4.4 : Μέσος όρος θερμοκρασιών περιοχής κοπής για το τέταρτο κομμάτι κατεργασίας (Workpiece 4).

Μέσος όρος (Mean) Θερμοκρασίας °C												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	31,15	42,76	52,31	62,21	69,66	76,17	85,25	95,50				64,38
2	97,26	97,88	100,15	102,08	105,84	121,75	131,74	125,03	115,47			110,80
3	111,73	110,26	109,21	111,95	115,58	130,70	141,41	128,11	121,79	116,31		119,71
4	111,96	111,83	112,48	112,80	116,64	136,63	143,63	138,83	125,05	120,26	116,64	122,43
5	116,13	113,80	113,20	114,90	119,83	139,66	160,16	144,01	129,69	123,62	118,93	126,72
6	116,24	114,09	113,37	115,25	120,53	141,39	153,32	147,45	135,50	126,49	120,78	127,67
7	116,77	115,98	115,41	117,30	120,91	142,32	154,96	153,63	136,41	128,59	123,51	129,62
8	120,54	119,27	119,49	119,45	125,00	148,56	165,59	153,58	137,05	129,46	124,48	132,95
9		127,88	124,90	120,80	117,13	121,36	138,27	154,31	147,55	133,58	123,41	130,92
10			120,56	117,63	114,56	114,89	114,37	133,07	135,62	133,31	120,49	122,72
11				118,72	119,34	137,50	195,21	159,02	201,76	201,60	191,29	165,56
Workpiece Average												123,04

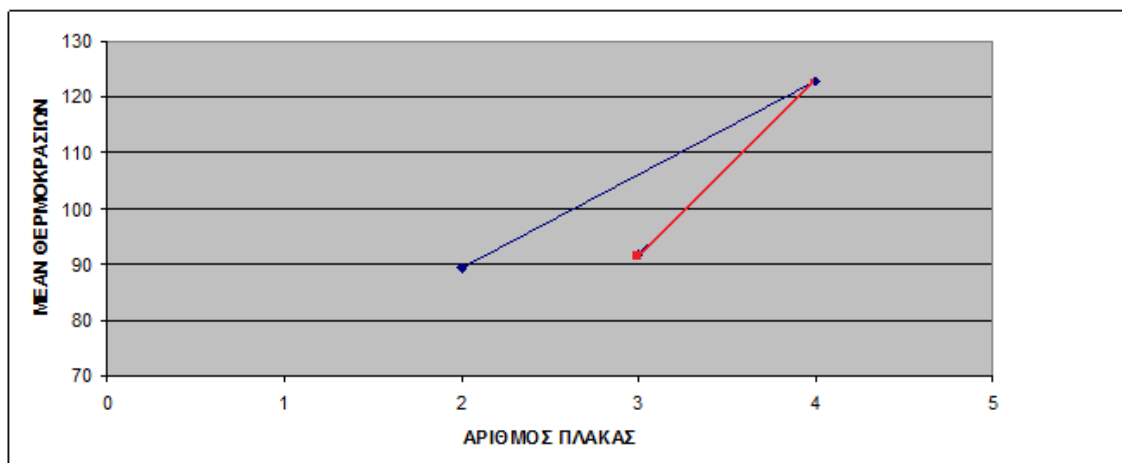
Μια πρώτη εκτίμηση για το αν και πώς επηρεάζουν οι παράγοντες (βάθος κοπής και πρόωση) την εξαρτημένη μεταβλητή (θερμοκρασία στην περιοχή κοπής), μπορεί να γίνει με ένα απλό σχεδιάγραμμα όπου θα απεικονίζονται οι αλλαγές των παραγόντων στα δύο επίπεδα. Τα Σχήματα 4.1 και 4.2 δείχνουν την αντίδραση της θερμοκρασίας στην εναλλαγή του ενός παράγοντα από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο (ή το αντίθετο) όταν ο άλλος παραμένει σταθερός (είτε στο χαμηλό, είτε στο υψηλό επίπεδο). Παρακάτω δίνεται και ο πίνακας 4.5 των συνδυασμών των επιπέδων των παραγόντων, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η επιλογή των εξεταζόμενων πλακών ανά ζεύγη στα σχήματα. Οι συμβολισμοί του πίνακα εξηγούνται αναλυτικά στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 4.5: Συνδυασμοί επιπέδων παραγόντων σε κάθε πλάκα κατεργασίας.

	βάθος κοπής	πρόωση
1^η πλάκα	-	-
2^η πλάκα	-	+
3^η πλάκα	+	-
4^η πλάκα	+	+



Σχήμα 4.1: Εναλλαγή παραγόντων από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο χαμηλό επίπεδο.



Σχήμα 4.2: Εναλλαγή παραγόντων από το υψηλό στο χαμηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο υψηλό επίπεδο.

Η εναλλαγή του παράγοντα πρόωση όταν το βάθος κοπής παραμένει στο χαμηλό επίπεδο, γίνεται από την πλάκα 1 στην πλάκα 2, αντίστοιχα η εναλλαγή του βάθους κοπής όταν η πρόωση παραμένει στο χαμηλό επίπεδο γίνεται από την πλάκα 1 στην πλάκα 3. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1, όπου παρατηρείται ότι και το βάθος κοπής και η πρόωση επιδρούν στην θερμοκρασία της περιοχής κοπής και μάλιστα με θετική επίδραση. Δηλαδή καθώς αυξάνονται τα επίπεδα των παραγόντων αυξάνεται και η θερμοκρασία. Φαίνεται επίσης ότι το βάθος κοπής έχει ελάχιστα σημαντικότερη επίδραση στις θερμοκρασίες καθώς η κλίση της καμπύλης είναι μεγαλύτερη. Η φυσική εξήγηση είναι ότι το βάθος κοπής καθώς μετράται σε χιλιοστά επηρεάζει περισσότερο τη θερμοκρασία της περιοχής κοπής, απ' ό,τι η πρόωση η οποία μετράται σε χιλιοστά ανά περιστροφή. Δηλαδή η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω πρόωσης είναι επιφανειακή (πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού) σε αντίθεση με αυτή που αναπτύσσεται λόγω βάθους κοπής.

Όμοιες εκτιμήσεις βγαίνουν και από το Σχήμα 4.2, όπου φαίνεται η εναλλαγή του παράγοντα πρόωση όταν το βάθος κοπής παραμένει στο υψηλό επίπεδο (από την 3 πλάκα στην 4 πλάκα) και αντίστοιχα η εναλλαγή του βάθους κοπής όταν η πρόωση παραμένει στο υψηλό επίπεδο (από την 2 πλάκα στην 4 πλάκα).

4.2.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση

Τα αισθητήρια μέτρησης του θερμομέτρου υπερύθρων, δεν επηρεάζονται από την γεωμετρία του υλικού προς διάτρηση, σε αντίθεση με αυτά των δονήσεων. Η αλλαγή θέσης της διάτρησης πάνω στο υλικό, δεν μεταβάλλει τις μετρήσεις του κρατώντας τις συνθήκες μέτρησης σταθερές. Επομένως οι οπές που θα ελεγχθούν

μπορεί να είναι οποιεσδήποτε. Ο αριθμός των οπών που θα εξετασθούν στην ανάλυση, αυτόματα δηλώνει και τον αριθμό των επιπέδων του παράγοντα ηλικία του κοπτικού. Η επιλογή των οπών ήταν τυχαία, όμως για κάθε οπή επιλεγόταν και η συμμετρική της ώστε να εξαλειφθούν τυχόν αποκλίσεις λόγω θέσης.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η πλάκα κατεργασίας με τις 109 οπές. Μέσα στα κελιά αναγράφεται ο αριθμός της οπής ο οποίος δηλώνει την σειρά με την οποία δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια της διάτρησης.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	2	3	4	5	6	7	8			
2	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
3	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
4	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
5	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
6	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
7	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
8	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
9		83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
10			93	94	95	96	97	98	99	100	101
11				102	103	104	105	106	107	108	109

Σχήμα 4.3: Αρίθμηση οπών και σκίαση των προς ανάλυση οπών.

Παρακάτω θα παρουσιασθούν δύο αναλύσεις των δεδομένων θερμοκρασίας. Στην πρώτη το κριτήριο επιλογής των προς ανάλυση οπών ήταν να γίνει το πείραμα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα, ενώ στην δεύτερη επιλέχθηκαν τυχαία 7 οπές και οι συμμετρικές τους. Στο παραπάνω Σχήμα με κίτρινο χρώμα είναι οι οπές που επιλέχθηκαν για την δεύτερη ανάλυση.

4.2.2 Ανάλυση πειράματος με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα

Για να προκύψει Σχεδιασμένο Πείραμα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα χρειάζεται ο παράγοντας ηλικία να κυμαίνεται σε δύο επίπεδα. Έτσι επιλέχθηκαν δύο οπές σε κάθε κομμάτι κατεργασίας. Οι οπές που επιλέχθηκαν είναι η 10 και η 100, οι οποίες είναι συμμετρικές προς την πλάκα και απέχουν αρκετά μεταξύ τους, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφορά στην ηλικία του κοπτικού.

Στην ανάλυση αυτή, επομένως ελέγχθηκαν $2 \times 2 \times 2 = 8$ μετρήσεις, το πείραμα είναι ένα 2^3 Παραγοντικό Πείραμα. Παρακάτω γίνεται η ανάλυση με το στατιστικό πακέτο.

Όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο, λόγω σύνδεσης του πειράματος με προηγούμενη διπλωματική εργασία, οι διαθέσιμες πλάκες προς κατεργασία ήταν

πέντε. Γι' αυτό τον λόγο το πείραμα εκτελέστηκε μία μόνο φορά, διότι ο υλικός περιορισμός κατέστησε αδύνατες τις επαναλήψεις. Το πρόβλημα που δημιουργήθηκε είναι ότι δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός των σφαλμάτων αφού οι βαθμοί ελευθερίας είναι μηδενικοί. Επομένως σύμφωνα με την ανάλυση των παραγοντικών πειραμάτων που δεν έχουν την δυνατότητα να επαναληφθούν (**residual analysis**) που περιγράφεται στην σελίδα 54 του 2^{ου} κεφαλαίου οι αλληλεπιδράσεις υψηλών τάξεων θεωρούνται ως σφάλματα διότι είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις υπόλοιπες [2].

Παρακάτω γίνεται η στατιστική ανάλυση με την 3^{ου} βαθμού αλληλεπίδραση συμπεριλαμβανόμενη στο σφάλμα. Ο πίνακας 4.6 έχει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.6 : ANOVA						
Tests of Between-Subjects Effects						
Dependent Variable: Θερμοκρασία						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	2661,791 ^a	6	443,632	1,540	,549	,902
Intercept	67700,486	1	67700,486	234,962	,041	,996
βάθοςκοπής	860,343	1	860,343	2,986	,334	,749
πρώωση	321,799	1	321,799	1,117	,482	,528
ηλικία	1067,200	1	1067,200	3,704	,305	,787
βάθοςκοπής * ηλικία	14,345	1	14,345	,050	,860	,047
βάθοςκοπής * πρώωση	380,002	1	380,002	1,319	,456	,569
πρώωση * ηλικία	18,103	1	18,103	,063	,844	,059
Error	288,133	1	288,133			
Total	70650,411	8				
Corrected Total	2949,925	7				

a. R Squared = ,902 (Adjusted R Squared = ,316)

Στην δεύτερη στήλη του πίνακα παρουσιάζεται το άθροισμα τετραγώνων των παραγόντων, στην τρίτη στήλη εμφανίζονται οι βαθμοί ελευθερίας για κάθε παράγοντα, στην τέταρτη στήλη φαίνονται οι μέσες τιμές των τετραγώνων. Η στήλη του κριτηρίου F για κάθε επίδραση υπολογίζεται ως το πηλίκο του μέσου τετραγώνου της επίδρασης προς το μέσο τετράγωνο των σφαλμάτων. Όταν οι παράγοντες έχουν ίδια πιθανότητα επίδρασης (P-Value) όσο μεγαλύτερο είναι το F τόσο σημαντικότερη είναι η επίδραση του παράγοντα. Στην στήλη του Sig. εκφράζεται η πιθανότητα να επιδρά σημαντικά στην εξαρτημένη μεταβλητή ο παράγοντας, με ποσοστό σημαντικότητας 0,05 [1]. Παρατηρείται ότι όλες οι επιδράσεις έχουν βγει ότι δεν επιδρούν σημαντικά στην εξαρτημένη μεταβλητή, διότι Sig.>0,05. Αυτό έγινε διότι παρατηρείται ότι η 3^{ου} βαθμού αλληλεπίδραση έχει μεγάλο άθροισμα τετραγώνων και οι βαθμοί ελευθερίας ισούνται με ένα. Επομένως χρειάζεται να επαναληφθεί η ανάλυση συμπεριλαμβάνοντας στο σφάλμα και τις αλληλεπιδράσεις (βάθοςκοπής*ηλικία) και (πρώωση*ηλικία), οι οποίες έχουν πολύ μικρό άθροισμα τετραγώνων και επιπλέον θα αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας. Έτσι προκύπτει ο νέος πίνακας ανάλυσης διακύμανσης (πίνακας 4.7).

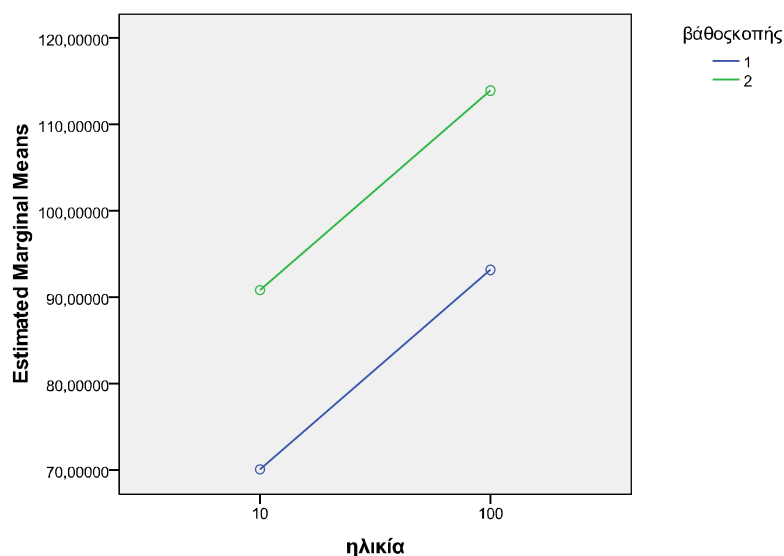
Πίνακας 4.7: ANOVA

Tests of Between-Subjects Effects						
Dependent Variable: θερμοκρασία						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	2629,344 ^a	4	657,336	6,151	,084	,891
Intercept	67700,486	1	67700,486	633,543	,000	,995
βάθος κοπής	860,343	1	860,343	8,051	,066	,729
πρόωση	321,799	1	321,799	3,011	,181	,501
ηλικία	1067,200	1	1067,200	9,987	,051	,769
βάθος κοπής * πρόωση	380,002	1	380,002	3,556	,156	,542
Error	320,581	3	106,860			
Total	70650,411	8				
Corrected Total	2949,925	7				

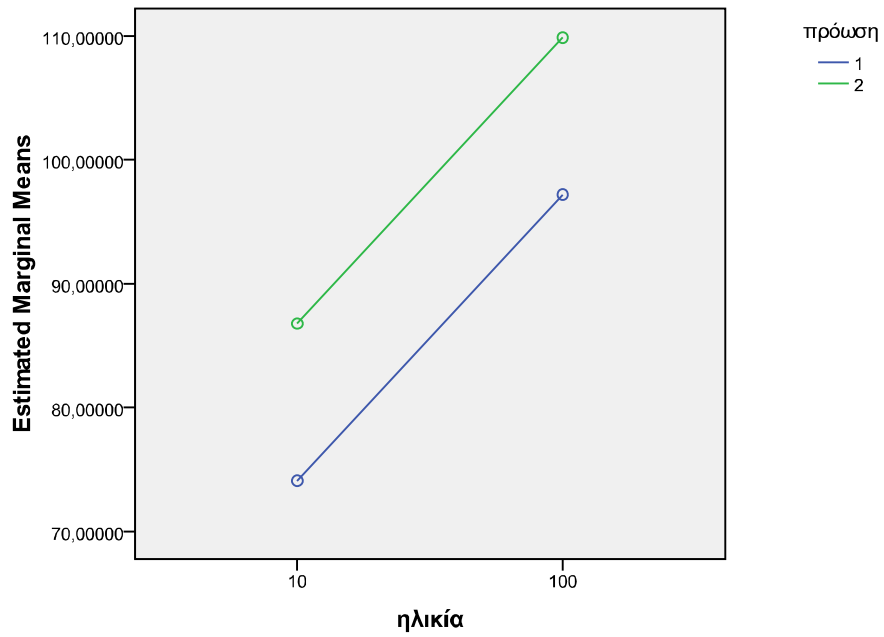
a. R Squared = ,891 (Adjusted R Squared = ,746)

Από τον πίνακα 4.7 μπορούν να βγουν τα συμπεράσματα από την στήλη του Sig. Παρατηρείται ότι η ηλικία και το βάθος κοπής επιδρούν οριακά σημαντικά στην εξαρτημένη μεταβλητή, διότι $Sig(\text{βάθος κοπής}) = 0,066$ είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από το επίπεδο σημαντικότητας που είναι ίσο με 0,05 και ομοίως $Sig(\text{ηλικία}) = 0,51$. Μάλιστα η επίδραση της ηλικίας του κοπτικού στην θερμοκρασία είναι ελάχιστα πιο σημαντική απ' ότι είναι η επίδραση από το βάθος κοπής. Η πρόωση και η αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*πρόωση) δεν έχουν σημαντική επιρροή στην θερμοκρασία αλλά δεν μπορεί και κανείς να ισχυριστεί ότι δεν επιδρούν καθόλου, καθώς δεν υπερβαίνουν κατά πολύ το επίπεδο σημαντικότητας ($=0,05$).

Από τον πίνακα 4.7 προκύπτει ότι οι αλληλεπιδράσεις (βάθος κοπής*ηλικία) και (πρόωση*ηλικία) είναι ασήμαντες, ενώ η αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*πρόωση) δεν είναι ασήμαντη στον ίδιο βαθμό. Τα Σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6 δείχνουν τις αλληλεπιδράσεις 2^{ου} βαθμού του πειράματος.

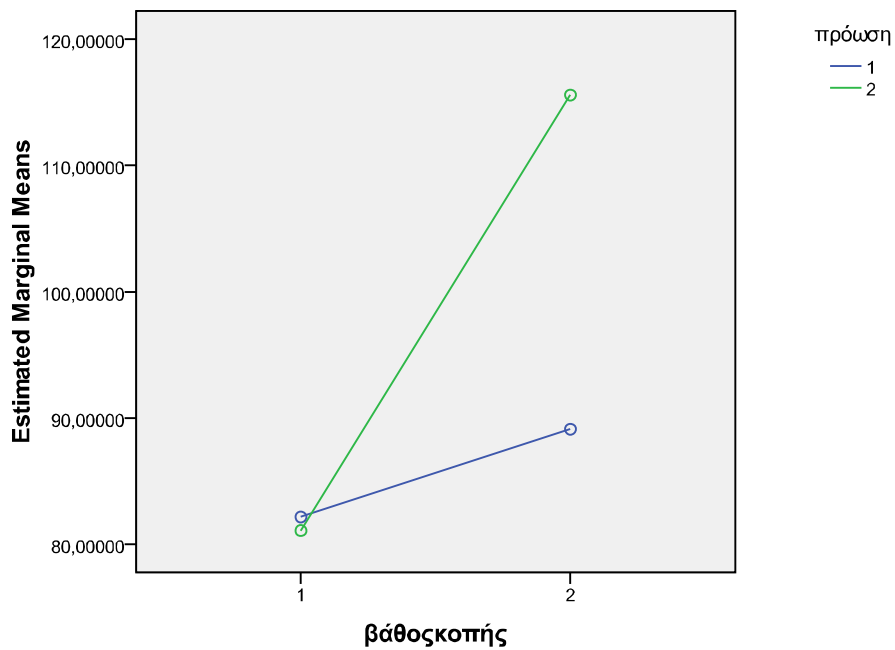
Estimated Marginal Means of θερμοκρασία**Σχήμα 4.4: Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).**

Estimated Marginal Means of θερμοκρασία



Σχήμα 4.5: Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).

Estimated Marginal Means of θερμοκρασία



Σχήμα 4.6: Αλληλεπίδραση (πρόωση*βάθος κοπής).

Παρακάτω θα γίνει εκτίμηση της θερμοκρασίας με την χρήση των συντελεστών της γραμμικής παλινδρόμησης που υπολογίζει το SPSS. Ο πίνακας 4.8 δείχνει τους 8 δυνατούς συνδυασμούς των παραγόντων.

Ο πίνακας 4.9 είναι ο πίνακας των παραμέτρων ο οποίος έχει τους συντελεστές της πολλαπλής παλινδρόμησης με εξαρτημένη μεταβλητή τη θερμοκρασία και ανεξάρτητες μεταβλητές το βάθος κοπής, την πρόωση και την ηλικία του κοπτικού. Η στήλη B δίνει τους συντελεστές της παλινδρόμησης οι οποίοι δίνουν την δυνατότητα να είναι εφικτή η εκτίμηση της θερμοκρασίας ανάλογα με τα επίπεδα των παραγόντων. Στην πρώτη στήλη φαίνεται για ποιον παράγοντα και για ποιο επίπεδο του παράγοντα είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης. Το SPSS παίρνει ως σημείο αναφοράς τα μέγιστα επίπεδα των παραγόντων. Έτσι οι συντελεστές των παραγόντων όταν βρίσκονται στο μέγιστο επίπεδό τους είναι 0. Η τιμή intercept είναι η σταθερά του συστήματος, δηλαδή όταν όλοι οι παράγοντες βρίσκονται στο μέγιστο επίπεδο τότε η τιμή της θερμοκρασίας είναι ίση με την σταθερά. Στον πίνακα υπάρχουν και αρνητικές τιμές. Αυτό συμβαίνει όταν η μετακίνηση του παράγοντα από το υψηλό στο χαμηλό επίπεδο μειώνει την εξαρτημένη μεταβλητή (θερμοκρασία).

Πίνακας 4.8 : Δυνατοί συνδυασμοί παραγόντων.

Συνδυασμός	Βάθος κοπής	Πρόωση	Ηλικία κοπτικού
1 ^{ος}	1	1	10
2 ^{ος}	1	1	100
3 ^{ος}	1	2	10
4 ^{ος}	1	2	100
5 ^{ος}	2	1	10
6 ^{ος}	2	1	100
7 ^{ος}	2	2	10
8 ^{ος}	2	2	100

Πίνακας 4.9 : Εκτίμηση Παραμέτρων.**Parameter Estimates**

Dependent Variable: Θερμοκρασία

Parameter	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval		Partial Eta Squared
					Lower Bound	Upper Bound	
Intercept	127,147	8,172	15,558	,001	101,139	153,155	,988
[βάθοςκοπή=1]	-34,525	10,337	-3,340	,044	-67,423	-1,627	,788
[βάθοςκοπή=2]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρόωση=1]	-26,469	10,337	-2,560	,083	-59,367	6,429	,686
[πρόωση=2]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[ηλικία=10]	-23,100	7,310	-3,160	,051	-46,362	,163	,769
[ηλικία=100]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=1] * [πρόωση=1]	27,568	14,619	1,886	,156	-18,957	74,093	,542
[βάθοςκοπή=1] * [πρόωση=2]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2] * [πρόωση=1]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2] * [πρόωση=2]	0 ^a	.	.	.	.	.	.

a. This parameter is set to zero because it is redundant.

Γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας της περιοχής κοπής ($Y_{i,j}$) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, όπου i ο αριθμός της πλάκας και j ο αριθμός της οπής. Για παράδειγμα για να βρεθεί η $10^{\text{η}}$ οπή της $1^{\text{ης}}$ πλάκας χρειάζεται να βρεθούν αρχικά τα επίπεδα των παραγόντων (πρόωση και βάθος κοπής) στην πλάκα αυτή. Από τον πίνακα 4.8 παρατηρείται ότι στην $1^{\text{η}}$ πλάκα το βάθος κοπής και η πρόωση βρίσκονται στο χαμηλό επίπεδο. Επομένως από πίνακα 4.9 ο συντελεστής παλινδρόμησης του βάθους κοπής όταν βρίσκεται στο χαμηλό επίπεδο είναι -34,525, ενώ της πρόωσης είναι -26,469. ο συντελεστής παλινδρόμησης της $10^{\text{ης}}$ οπής είναι -23,100. για να εκτιμηθεί η θερμοκρασία χρειάζεται να αφαιρεθούν από την σταθερά οι παραπάνω τιμές μαζί με την αλληλεπίδραση που έχουν το βάθος κοπής και η πρόωση όταν βρίσκονται στο χαμηλό επίπεδο, που ισούται με 27,568. Επομένως η θερμοκρασία για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, για την $10^{\text{η}}$ και $11^{\text{η}}$ οπή, υπολογίζεται ως εξής από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Y_{1,10} = 127,147 - 34,525 - 26,469 - 23,100 + 27,621 = 70,621$$

$$Y_{1,100} = 93,721$$

$$Y_{2,10} = 69,522$$

$$Y_{2,100} = 92,622$$

$$Y_{3,10} = 77,578$$

$$Y_{3,100} = 100,678$$

$$Y_{4,10} = 104,047$$

$$Y_{4,100} = 133,31$$

Πίνακας 4.10: Σύγκριση εκτιμούμενης με μετρούμενης τιμής της θερμοκρασίας σε °C.		
Συνδυασμός	Εκτιμούμενη Τιμή	Μετρούμενη Τιμή
1 ^{ος}	70,621	64,79
2 ^{ος}	93,721	99,56
3 ^{ος}	69,522	72,68
4 ^{ος}	92,622	89,46
5 ^{ος}	77,578	86,42
6 ^{ος}	100,678	91,83
7 ^{ος}	104,047	97,88
8 ^{ος}	133,31	133,31

Στον πίνακα 4.10 συγκρίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, με τις εκτιμούμενες τιμές της θερμοκρασίας από την γραμμική παλινδρόμηση. Οι μικρές αποκλίσεις που υπάρχουν μεταξύ των εκτιμούμενων τιμών και των μετρούμενων από το πείραμα είναι λόγω της προσεγγιστικής τιμής των σφαλμάτων. Η μεγαλύτερη απόκλιση εντοπίζεται στον 5^ο συνδυασμό και είναι της τάξης του 10,23%.

Για εγκυρότερα αποτελέσματα είναι σωστό να επαναληφθεί η ανάλυση μεταβλητότητας συμπεριλαμβάνοντας στο σφάλμα μόνο τις αλληλεπιδράσεις με το μικρότερο άθροισμα τετραγώνων και όχι την αλληλεπίδραση 3^{ου} βαθμού. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας που προκύπτει από αυτή την ανάλυση.

Πίνακας 4.11: ANOVA					
	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Sig.
Βάθος κοπής(A)	860,343	1	860,343	53,03	0,018
Πρόωση (B)	321,799	1	321,799	19,83	0,047
Ηλικία (C)	1067,2	1	1067,2	65,78	0,015
AB	380,002	1	380,002	23,42	0,04
ABC	288,133	1	288,133	17,76	0,05
Σφάλμα	32,448	2	16,224	-	-

Παρατηρείται αλλαγή των αποτελεσμάτων. Όλες οι κύριες επιδράσεις έχουν σημαντική επιρροή στη θερμοκρασία όπως και η αλληλεπίδραση (βάθος κοπής)*(πρόωση). Εξίσου σημαντική είναι και η αλληλεπίδραση 3^{ου} βαθμού.

4.2.3 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα

Οι οπές που θα αναλυθούν παρακάτω παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.3 (χρωματισμένες με κίτρινο). Η επιλογή των πρώτων εφτά οπών ήταν τυχαία, απλά οι υπόλοιπες εφτά επιλέχθηκαν να είναι οι συμμετρικές για να εξαλειφθούν τυχών επιδράσεις που μπορεί να υπάρχουν λόγω θέσης πάνω στο κομμάτι κατεργασίας.

Επομένως το πείραμά έχει τρεις παράγοντες εκ των οποίων οι δύο έχουν 2 επίπεδα, ενώ ο τρίτος 14 επίπεδα. Επομένως θα ελεγχθούν $2 \times 2 \times 14 = 56$ μετρήσεις θερμοκρασίας από τις οποίες θα βγουν τα συμπεράσματα. Ο υπολογισμός των επιδράσεων θα ήταν δυσκολότερος αν γινόταν με το χέρι, διότι οι πράξεις και οι υπολογισμοί που χρειάζονται είναι αρκετοί και έτσι η διαδικασία γίνεται χρονοβόρα. Τα στατιστικά πακέτα όμως που είναι διαθέσιμα δεν έχουν τέτοιου είδους περιορισμούς και έτσι η ανάλυση γίνεται χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία.

Σε αυτή την ανάλυση οι μετρήσεις είναι περισσότερες και επομένως η αλληλεπίδραση 3^{ου} βαθμού μπορεί να μπει ανεπιφύλακτα στο σφάλμα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας ANOVA από τον οποίο θα προκύψουν τα συμπεράσματα.

Πίνακας 4.12 : ANOVA

Tests of Between-Subjects Effects						
Dependent Variable: θερμοκρασία						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	26177,717 ^a	42	623,279	3,575	,008	,920
Intercept	544970,568	1	544970,568	3125,687	,000	,996
βάθοςκοπής	9360,206	1	9360,206	53,686	,000	,805
πρώωση	7901,482	1	7901,482	45,319	,000	,777
ηλικία	4933,006	13	379,462	2,176	,087	,685
βάθοςκοπής * ηλικία	554,149	13	42,627	,244	,992	,196
βάθοςκοπής * πρώωση	1962,354	1	1962,354	11,255	,005	,464
πρώωση * ηλικία	1466,521	13	112,809	,647	,778	,393
Error	2266,579	13	174,352			
Total	573414,864	56				
Corrected Total	28444,297	55				

a. R Squared = ,920 (Adjusted R Squared = ,663)

Από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει πως η αλληλεπίδραση μεταξύ βάθους κοπής και ηλικίας ($=0,992$) δεν επηρεάζει την θερμοκρασία. Παρακάτω θα ξαναγίνει η ανάλυση με την αλληλεπίδραση αυτή συμπεριλαμβανόμενη στο σφάλμα. Η νέα ανάλυση φαίνεται στον πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13 : ANOVA**Tests of Between-Subjects Effects**

Dependent Variable: θερμοκρασία

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	25623,569 ^a	29	883,571	8,144	,000	,901
Intercept	544970,568	1	544970,568	5023,254	,000	,995
βάθος κοπής	9360,206	1	9360,206	86,277	,000	,768
πρόωση	7901,482	1	7901,482	72,832	,000	,737
ηλικία	4933,006	13	379,462	3,498	,003	,636
βάθος κοπής * πρόωση	1962,354	1	1962,354	18,088	,000	,410
πρόωση * ηλικία	1466,521	13	112,809	1,040	,447	,342
Error	2820,728	26	108,490			
Total	573414,864	56				
Corrected Total	28444,297	55				

a. R Squared = ,901 (Adjusted R Squared = ,790)

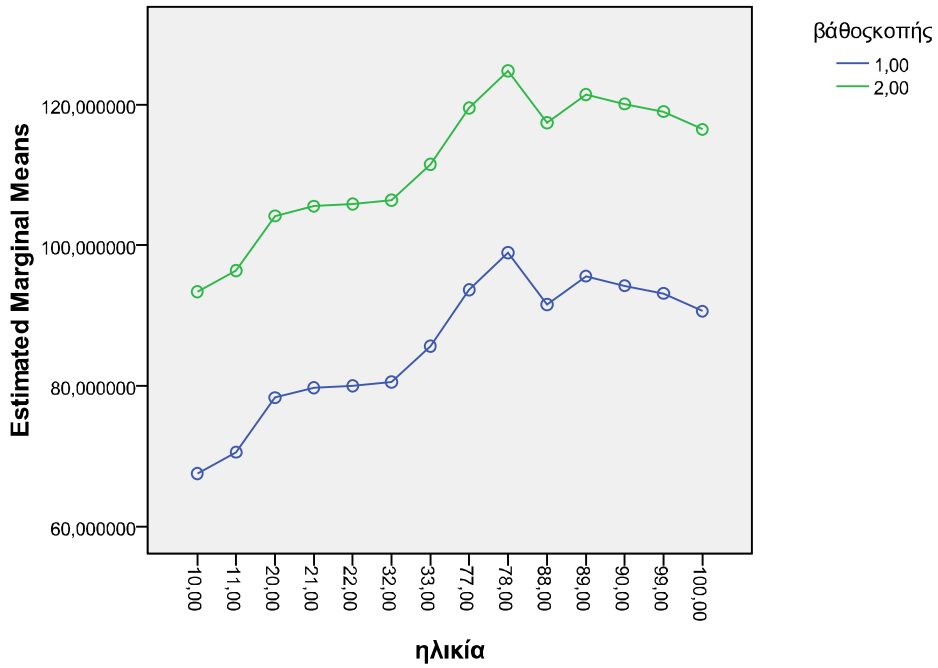
Παρατηρείται ότι και οι τρεις παράγοντες έχουν αρκετά σημαντική επιρροή στην θερμοκρασία, όπως και η αλληλεπίδραση (βάθος κοπής* πρόωση). Οι κύριες επιδράσεις κατά φθίνουσα σειρά είναι βάθος κοπής, πρόωση και ηλικία κοπτικού γιατί όσο πιο μεγάλο είναι το F τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση. Η τιμή του κριτηρίου F για κάθε επίδραση, υπολογίζεται ως το πηλίκο του μέσου τετραγώνου της επίδρασης προς το μέσο τετράγωνο των σφαλμάτων [3].

Τα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά της προηγούμενης υποενοότητας συμπίπτουν κατά κύριο λόγο. Παρατηρείται μία αλλαγή στην σειρά σημαντικότητας με την οποία επιδρούν στην κύρια μεταβλητή. Στην περίπτωση που όλοι οι παράγοντες είχαν δύο επίπεδα οι κύριες επιδράσεις κατά φθίνουσα σειρά ήταν ηλικία κοπτικού, βάθος κοπής και πρόωση σε αντίθεση με τη νέα σειρά που είναι κατά αντίστοιχη σειρά βάθος κοπής, πρόωση, ηλικία.

Αυτή η ανάλυση μπορεί να χαρακτηριστεί ως εγκυρότερη διότι αναλύει περισσότερα δεδομένα και επιπλέον επειδή ένας παράγοντας (ηλικία κοπτικού) εξετάζεται σε παραπάνω από 2 επίπεδα ελέγχονται καλύτερα οι σχέσεις μεταξύ των παραγόντων, διότι εξετάζεται και η μη- γραμμική σχέση. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα.

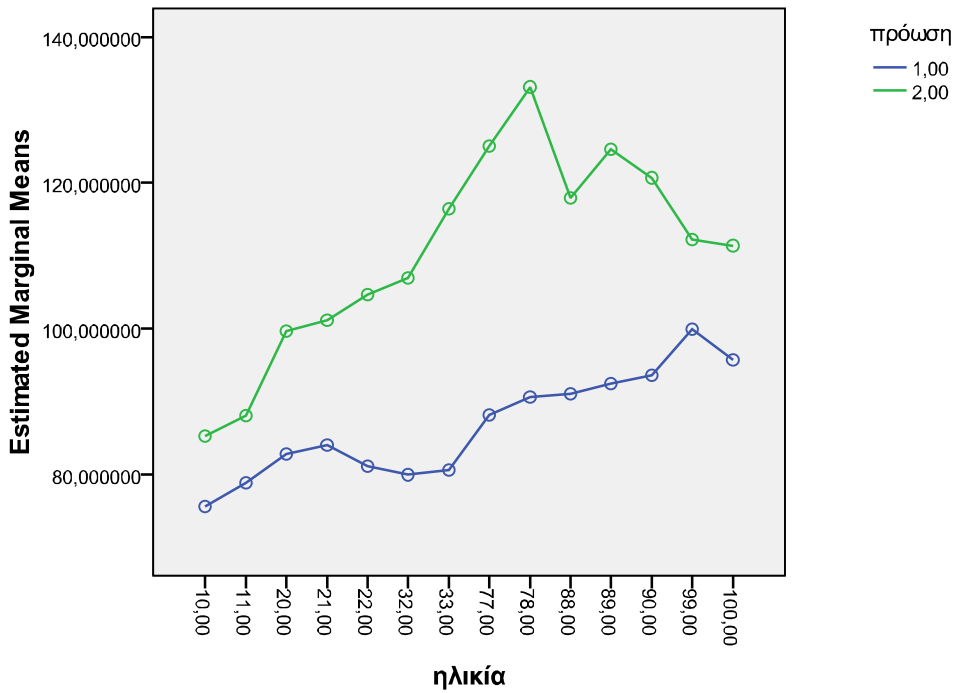
Παρακάτω απεικονίζονται γραφικά οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων (Σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9).

Estimated Marginal Means of θερμοκρασία

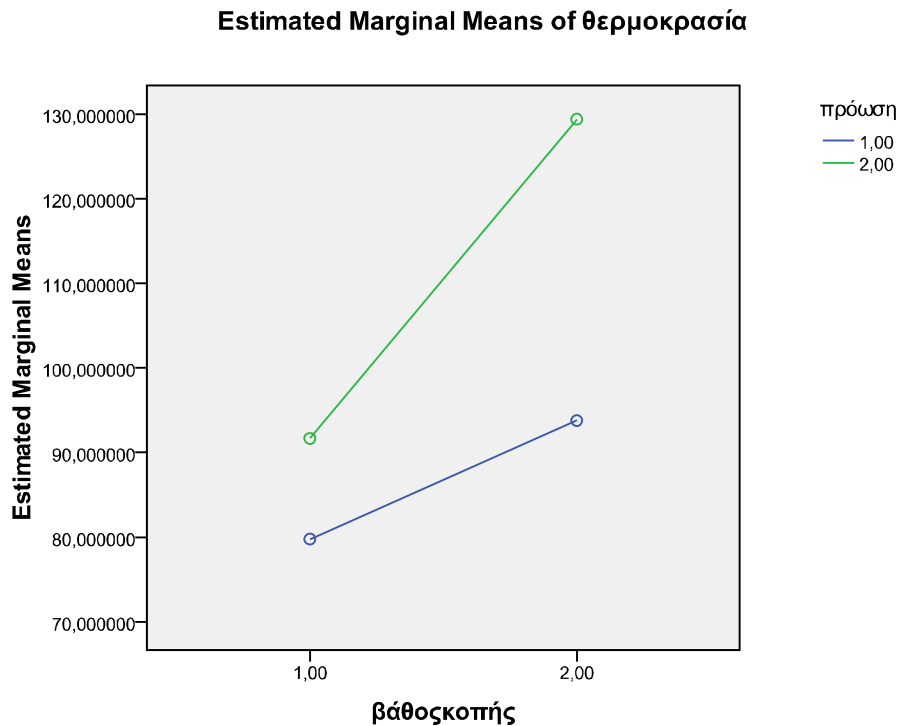


Σχήμα 4.7: Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).

Estimated Marginal Means of θερμοκρασία



Σχήμα 4.8: Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).



Σχήμα 4.9: Αλληλεπίδραση (πρόωση*βάθος κοπής).

Ο πίνακας 4.14 των παραμέτρων, έχει τα αποτελέσματα της πολλαπλής παλινδρόμησης. Παρακάτω θα γίνουν οι εκτιμήσεις για τη θερμοκρασία στους 56 δυνατούς συνδυασμούς.

Τα αποτελέσματα των εξισώσεων παρουσιάζονται παρακάτω, όπου $Y_{i,j,k}$ είναι η θερμοκρασία με i ίσο με 1 ή 2 ανάλογα με το επίπεδο του βάθους κοπής, j αντίστοιχα για την πρόωση και $k = \{10,11,20,21,22,32,33,77,78,88,89,90,99,100\}$:

Ενδεικτικά θα γίνει εκτίμηση των οπών 10 και 89 για κάθε δυνατό συνδυασμό, δηλαδή 4 συνδυασμοί για κάθε οπή, ώστε να προκύψουν κάποια συμπεράσματα.

$$Y_{1,1,10} = 130,240 - 37,696 - 27,535 - 26,076 + 23,679 = 62,612$$

$$Y_{1,1,89} = 130,240 - 37,696 - 27,535 - 13,204 + 23,679 = 101,892$$

$$Y_{1,2,10} = 66,468$$

$$Y_{1,2,89} = 105,748$$

$$Y_{2,1,10} = 104,164$$

$$Y_{2,1,89} = 143,444$$

$$Y_{2,2,10} = 76,629$$

$$Y_{2,2,89} = 115,909$$

Πίνακας 4.14: Εκτίμηση Παραμέτρων.

Parameter Estimates							
Dependent Variable: Βαρουκρασία							
Parameter	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval		Partial Eta Squared
					Lower Bound	Upper Bound	
Intercept	130,240	7,624	17,084	,000	114,569	145,910	,918
[βάθοςκοπή<=1,00]	-37,696	3,937	-9,575	,000	-45,789	-29,604	,779
[βάθοςκοπή<=2,00]	0 ^a						
[πρόωση=1,00]	-27,535	10,781	-2,554	,017	-49,697	-5,374	,201
[πρόωση=2,00]	0 ^a						
[ηλικία=10,00]	-26,076	10,416	-2,504	,019	-47,486	-4,666	,194
[ηλικία=11,00]	-23,309	10,416	-2,238	,034	-44,719	-1,899	,162
[ηλικία=20,00]	-11,705	10,416	-1,124	,271	-33,115	9,705	,046
[ηλικία=21,00]	-10,228	10,416	-,982	,335	-31,638	11,182	,036
[ηλικία=22,00]	-6,680	10,416	-,641	,527	-28,091	14,730	,016
[ηλικία=32,00]	-4,413	10,416	-,424	,675	-25,823	16,998	,007
[ηλικία=33,00]	5,079	10,416	,488	,630	-16,331	26,489	,009
[ηλικία=77,00]	13,614	10,416	1,307	,203	-7,796	35,024	,062
[ηλικία=78,00]	21,761	10,416	2,089	,047	,350	43,171	,144
[ηλικία=88,00]	6,513	10,416	,625	,537	-14,897	27,923	,015
[ηλικία=89,00]	13,204	10,416	1,268	,216	-8,206	34,614	,058
[ηλικία=90,00]	9,302	10,416	,893	,380	-12,108	30,712	,030
[ηλικία=99,00]	,841	10,416	,081	,936	-20,569	22,251	,000
[ηλικία=100,00]	0 ^a						
[βάθοςκοπή<=1,00] * [πρόωση=1,00]	23,679	5,567	4,253	,000	12,234	35,123	,410
[βάθοςκοπή<=1,00] * [πρόωση=2,00]	0 ^a						
[βάθοςκοπή<=2,00] * [πρόωση=1,00]	0 ^a						
[βάθοςκοπή<=2,00] * [πρόωση=2,00]	0 ^a						
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=10,00]	5,985	14,730	,406	,688	-24,293	36,263	,006
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=11,00]	6,491	14,730	,441	,663	-23,788	36,769	,007
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=20,00]	-1,196	14,730	-,081	,936	-31,474	29,083	,000
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=21,00]	-1,379	14,730	-,094	,926	-31,657	28,900	,000
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=22,00]	-7,843	14,730	-,532	,599	-38,122	22,435	,011
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=32,00]	-11,300	14,730	-,767	,450	-41,579	18,978	,022
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=33,00]	-20,116	14,730	-1,366	,184	-50,394	10,162	,067
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=77,00]	-21,127	14,730	-1,434	,163	-51,405	9,152	,073
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=78,00]	-26,832	14,730	-1,822	,080	-57,110	3,446	,113
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=88,00]	-11,128	14,730	-,755	,457	-41,407	19,150	,021
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=89,00]	-16,449	14,730	-1,117	,274	-46,727	13,830	,046
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=90,00]	-11,350	14,730	-,771	,448	-41,629	18,928	,022
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=99,00]	3,393	14,730	,230	,820	-26,885	33,671	,002
[πρόωση=1,00] * [ηλικία=100,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=10,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=11,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=20,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=21,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=22,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=32,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=33,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=77,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=78,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=88,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=89,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=90,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=99,00]	0 ^a						
[πρόωση=2,00] * [ηλικία=100,00]	0 ^a						

a. This parameter is set to zero because it is redundant.

Πίνακας 4.15: Σύγκριση εκτιμώμενης με μετρούμενης τιμής της θερμοκρασίας σε °C.		
i,j,k	Εκτιμώμενη Τιμή	Μετρούμενη Τιμή
1,1,10	62,612	64,78
1,1,89	101,892	89,67
1,2,10	66,468	72,68
1,2,89	105,748	94,87
2,1,10	104,164	97,88
2,1,89	143,444	154,3
2,2,10	76,629	86,41
2,2,89	115,909	95,22

Στον πίνακα 4.15 συγκρίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, με τις εκτιμώμενες τιμές της θερμοκρασίας από την γραμμική παλινδρόμηση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι αποκλίσεις που υπάρχουν είναι αποτέλεσμα κυρίως της προσεγγιστικής τιμής των σφαλμάτων.

Η μεγαλύτερη απόκλιση εντοπίζεται στην τελευταία περίπτωση και είναι της τάξης του 17,85%.

4.3 Πειραματικά αποτελέσματα για τις συχνότητες των δονήσεων

Αρχικά πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων και την εξαγωγή των στατιστικών παραμέτρων, δεν υπήρξε η χρήση φίλτρου αποκοπής του θορύβου από τα ακατέργαστα δεδομένα.

Επίσης, για το λόγο ότι οι δονήσεις είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα X και επομένως η τιμή του αριθμητικού μέσου είναι πολύ κοντά στο μηδέν, ο αριθμητικός μέσος των δονήσεων που παράγονται κατά τη διάρκεια της διάτρησης δεν έχει συσχέτιση με τη φθορά του τρυπανιού [4,5,6]. Αντίθετα, η ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των τιμών, είναι ένα αξιόπιστο στατιστικό μέγεθος διάγνωσης της φθοράς [7]. Σε έρευνες που έχουν γίνει, αποδείχθηκε ότι η τιμή RMS των δονήσεων είναι ο καλύτερος δείκτης φθοράς [8]. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ο πίνακας 4.16, όπου φαίνονται οι τιμές του αριθμητικού μέσου των δονήσεων μετά την επεξεργασία για τις 109 οπές της 1^{ης} πλάκας κατεργασίας (όπου το βάθος κοπής και η πρόωση είναι σε χαμηλά επίπεδα).

Πίνακας 4.16: Τιμές αριθμητικού μέσου των δονήσεων του πρώτου κομματιού κατεργασίας.

Αριθμητικός Μέσος Δονήσεων												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	0,0065	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066	0,0065	0,0066	0,0066				0,0066
2	0,0064	0,0065	0,0065	0,0065	0,0063	0,0066	0,0068	0,0065	0,0067			0,0065
3	0,0067	0,0066	0,0065	0,0066	0,0065	0,0082	0,0088	0,0074	0,0096	0,0066		0,0073
4	0,0065	0,0064	0,0065	0,0083	0,0082	0,0096	0,0074	0,0096	0,0084	0,0066	0,0065	0,0076
5	0,0067	0,0066	0,0065	0,0080	0,0098	0,0088	0,0072	0,0089	0,0092	0,0062	0,0064	0,0077
6	0,0065	0,0066	0,0064	0,0065	0,0066	0,0075	0,0065	0,0066	0,0083	0,0084	0,0070	0,0070
7	0,0068	0,0067	0,0069	0,0067	0,0079	0,0079	0,0079	0,0072	0,0071	0,0069	0,0061	0,0071
8	0,0062	0,0071	0,0068	0,0074	0,0068	0,0065	0,0060	0,0083	0,0077	0,0069	0,0082	0,0071
9		0,0093	0,0070	0,0070	0,0066	0,0076	0,0078	0,0082	0,0088	0,0073	0,0072	0,0077
10			0,0072	0,0075	0,0073	0,0076	0,0078	0,0072	0,0083	0,0080	0,0084	0,0077
11				0,0092	0,0093	0,0092	0,0093	0,0093	0,0088	0,0083	0,0078	0,0089
Workpiece Average												0,0074

Η επεξεργασία των δονήσεων στη συνέχεια θα γίνει με τις τιμές των RMS απ' όπου θα εκτιμηθεί, με βάση τη μεθοδολογία του Σχεδιασμένου Πειράματος με την οποία έχει στηθεί και το πείραμα, η κύρια επίδραση των παραγόντων οι αλληλεπιδράσεις αλλά και η γραμμική παλινδρόμηση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα των δονήσεων για κάθε πλάκα ξεχωριστά, όπως αυτά μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας στο Σχεδιασμένο Πείραμα (πίνακες 4.17,4.18,4.19,4.20). Σε κάθε κελί υπάρχουν οι μετρούμενες δονήσεις της αντίστοιχης οπής. Οι οπές δημιουργήθηκαν κατά σειρά, δηλαδή πρώτα 1A,1B,...,1H και στην συνέχεια 2A,2B,...,2I.

Πίνακας 4.17: Τιμές RMS των δονήσεων του πρώτου κομματιού κατεργασίας.

RMS Δονήσεων (g*)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	0,0883	0,0883	0,0686	0,0385	0,0069	0,0067	0,0068	0,0067				0,0388
2	0,0939	0,0624	0,0230	0,0066	0,0065	0,0068	0,0069	0,0067	0,0069			0,0244
3	0,0875	0,0609	0,0227	0,0068	0,0067	0,0083	0,0090	0,0076	0,0097	0,0346		0,0254
4	0,0872	0,0597	0,0239	0,0084	0,0083	0,0097	0,0076	0,0097	0,0085	0,0417	0,0750	0,0309
5	0,0845	0,0594	0,0248	0,0081	0,0099	0,0090	0,0074	0,0091	0,0093	0,0490	0,0992	0,0336
6	0,0821	0,0585	0,0291	0,0257	0,0320	0,0356	0,0387	0,0445	0,0518	0,0087	0,0072	0,0376
7	0,0862	0,0652	0,0270	0,0068	0,0080	0,0080	0,0081	0,0074	0,0073	0,0071	0,0063	0,0216
8	0,1599	0,0841	0,0847	0,0899	0,0997	0,1211	0,2383	0,1528	0,1653	0,1881	0,3059	0,1536
9		0,1049	0,1017	0,1029	0,1080	0,1288	0,3261	0,2514	0,2351	0,2857	0,3140	0,1959
10			0,1368	0,1338	0,1322	0,1472	0,1783	0,2099	0,2625	0,3054	0,2217	0,1920
11				0,1245	0,1259	0,1335	0,1475	0,1741	0,1776	0,1637	0,1763	0,1529
Workpiece Average												0,0824

Όπου $g=9.81 \text{ m/sec}^2$

Πίνακας 4.18: Τιμές RMS των δονήσεων του δεύτερου κομματιού κατεργασίας.

RMS Δονήσεων (g*)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	0,1041	0,1072	0,1056	0,0923	0,0872	0,0801	0,0739	0,0759				0,0908
2	0,1023	0,1007	0,0926	0,0806	0,0669	0,0667	0,0662	0,0662	0,0653			0,0786
3	0,1122	0,0997	0,0927	0,0841	0,0696	0,0634	0,0613	0,0600	0,0554	0,0539		0,0752
4	0,1025	0,1052	0,0967	0,0812	0,0721	0,0672	0,0603	0,0701	0,0623	0,0413	0,0091	0,0698
5	0,1019	0,0940	0,0837	0,0747	0,0684	0,0666	0,0623	0,0664	0,0666	0,0732	0,0731	0,0756
6	0,0957	0,0853	0,0883	0,0846	0,0821	0,0774	0,0818	0,0970	0,1056	0,1025	0,1236	0,0931
7	0,0899	0,0850	0,0823	0,0788	0,0723	0,0698	0,0726	0,0781	0,0924	0,0956	0,1060	0,0839
8	0,0877	0,0857	0,0803	0,0784	0,0732	0,0773	0,0754	0,0787	0,0957	0,1160	0,1170	0,0878
9		0,0858	0,0829	0,0786	0,0753	0,0771	0,0571	0,0118	0,0101	0,0099	0,0104	0,0499
10			0,0857	0,0550	0,0106	0,0103	0,0101	0,0101	0,0101	0,0098	0,0103	0,0236
11				0,0943	0,0829	0,0815	0,0848	0,0940	0,1052	0,1127	0,1132	0,0961
											Workpiece Average	0,0749

Όπου $g=9.81 \text{ m/sec}^2$

Πίνακας 4.19: Τιμές RMS των δονήσεων του τρίτου κομματιού κατεργασίας.

RMS Δονήσεων (g*)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	0,1218	0,0884	0,0969	0,1133	0,3228	0,1471	0,0735	0,0876				0,1314
2	0,1633	0,1136	0,1506	0,2265	0,3635	0,2157	0,1134	0,2172	0,2709			0,2039
3	0,1119	0,2819	0,3020	0,4448	0,3771	0,5320	0,4608	0,3086	0,4444	0,5500		0,3813
4	0,5932	0,6188	0,9124	1,0032	0,8281	0,8936	0,8411	0,7566	0,6804	1,0740	0,6899	0,8083
5	0,8069	0,8369	1,3007	1,4050	0,8638	1,4308	0,8130	1,4109	0,9434	1,2763	0,4654	1,0503
6	0,6657	1,7914	1,0846	1,7616	1,9841	1,5171	1,7588	1,6315	3,6171	3,3671	0,9599	1,8308
7	1,8441	1,8738	1,1376	1,4420	2,3591	2,1274	2,1792	4,0682	4,2026	2,3761	0,5294	2,1945
8	1,2468	1,4840	3,2938	4,1810	4,4052	3,7624	3,3676	4,1079	4,3280	5,3291	0,9918	3,3180
9		1,0386	4,2474	4,3133	4,3187	4,7106	5,1059	4,5648	3,2670	4,5870	3,7262	3,9879
10			2,0141	4,6151	2,0932	2,1350	4,3945	4,5041	4,3932	4,1085	3,8858	3,5715
11				0,4688	3,6795	0,9667	3,8384	4,2060	4,2314	1,3563	3,7591	2,8133
											Workpiece Average	1,8447

Όπου $g=9.81 \text{ m/sec}^2$

Πίνακας 4.20: Τιμές RMS των δονήσεων του τέταρτου κομματιού κατεργασίας.

RMS Δονήσεων (g*)												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Average
1	0,1079	0,1010	0,0712	0,0515	0,0425	0,0083	0,0146	0,1802				0,0722
2	0,5275	0,0882	0,0369	0,0070	0,0069	0,7177	0,8305	0,3297	0,0604			0,2894
3	0,1426	0,0922	0,0379	0,0071	0,0073	1,0446	1,3007	0,0931	0,0603	0,0376		0,2823
4	0,1682	0,0888	0,7710	0,0165	0,0232	1,2238	0,6184	1,6701	0,0664	0,0417	0,0080	0,4269
5	0,6905	0,0760	0,0349	0,0081	0,0205	0,9505	1,3309	0,7037	0,1151	0,0440	0,0106	0,3623
6	0,8747	0,0687	0,0363	0,0089	0,0211	0,9457	0,7702	2,3738	0,0801	0,0482	0,0087	0,4760
7	0,8488	0,0697	0,0392	0,0092	0,0169	1,1083	1,3884	1,2567	0,0837	0,0560	0,0110	0,4444
8	0,7178	0,0669	0,0384	0,0108	0,0327	1,4545	1,4441	0,6438	0,0979	0,0615	0,0119	0,4164
9		1,1005	0,0711	0,0406	0,0107	0,0344	1,6549	1,5490	0,7580	0,1099	0,0728	0,5402
10			0,7248	0,0793	0,0483	0,0123	0,0423	1,1964	1,1541	0,9934	0,1275	0,4865
11				1,7798	0,0839	0,0538	1,2354	0,0182	2,7539	1,8241	1,3702	1,1399
											Workpiece Average	0,4488

Όπου $g=9.81 \text{ m/sec}^2$

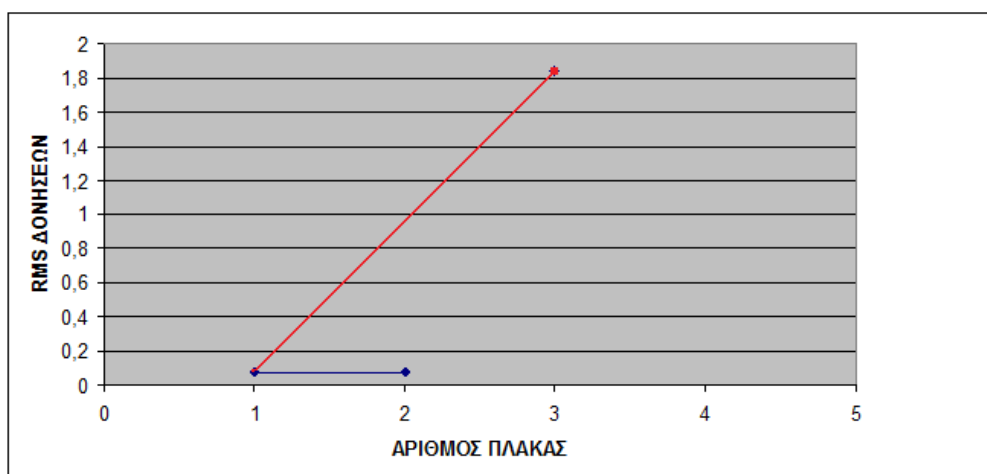
Η μέση τετραγωνική τιμή x_{rms} των τιμών $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ ενός δείγματος N είναι η τετραγωνική ρίζα του αριθμητικού μέσου των τετραγώνων των τιμών (RMS) και υπολογίζεται από τη σχέση [9] :

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4.2)$$

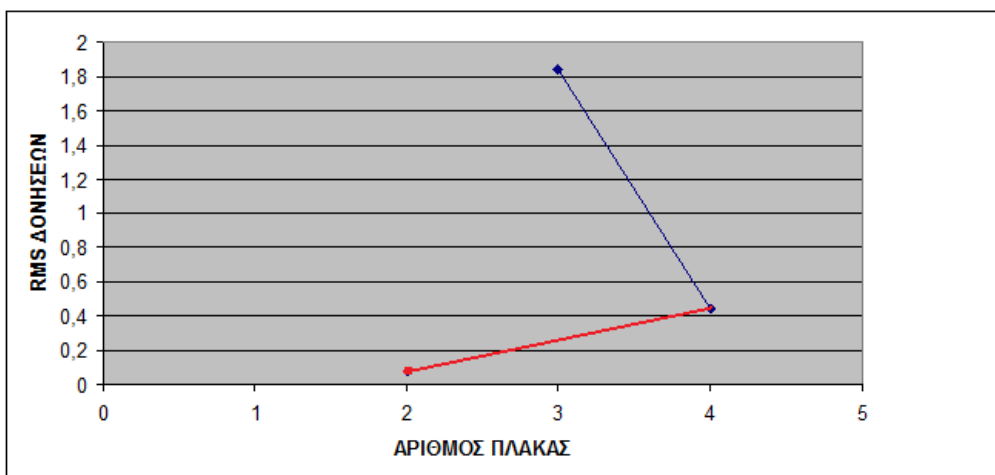
Μια πρώτη εκτίμηση για το αν και πώς επηρεάζουν οι παράγοντες (βάθος κοπής και πρόωση) την εξαρτημένη μεταβλητή (δονήσεις στην περιοχή κοπής), μπορεί να γίνει όπως και με την θερμοκρασία. Αν τα πειράματα δεν ήταν Σχεδιασμένα ούτε αυτές οι πρώτες εκτιμήσεις θα μπορούσαν να γίνουν. Τα ακόλουθα σχήματα δείχνουν την αντίδραση των RMS των δονήσεων στην εναλλαγή του ενός παράγοντα από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο (ή το αντίθετο) όταν ο άλλος παραμένει σταθερός (είτε στο χαμηλό, είτε στο υψηλό επίπεδο). Παρακάτω δίνεται και ο πίνακας 4.21 των συνδυασμών των επιπέδων των παραγόντων, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η επιλογή των εξεταζόμενων πλακών ανά ζεύγη στα σχήματα.

Πίνακας 4.21: Συνδυασμοί επιπέδων παραγόντων σε κάθε πλάκα κατεργασίας.

	βάθος κοπής	πρόωση
1^η πλάκα	-	-
2^η πλάκα	-	+
3^η πλάκα	+	-
4^η πλάκα	+	+



Σχήμα 4.10: Εναλλαγή παραγόντων από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο χαμηλό επίπεδο.



Σχήμα 4.11: Εναλλαγή παραγόντων από το υψηλό στο χαμηλό επίπεδο, όταν ο άλλος παρέμεινε σταθερός στο υψηλό επίπεδο.

Η εναλλαγή του παράγοντα πρόωση όταν το βάθος κοπής παραμένει στο χαμηλό επίπεδο, γίνεται από την πλάκα 1 στην πλάκα 2, αντίστοιχα η εναλλαγή του βάθους κοπής όταν η πρόωση παραμένει στο χαμηλό επίπεδο γίνεται από την πλάκα 1 στην πλάκα 3. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.10, όπου παρατηρείται ότι και το βάθος κοπής και η πρόωση επιδρούν στην θερμοκρασία της περιοχής κοπής. Είναι ξεκάθαρο επίσης, ότι η επίδραση των παραγόντων είναι αντίρροπη, αφού όταν το βάθος κοπής αυξάνει (μειώνει) επίπεδο οι δονήσεις αυξάνονται (μειώνονται), ενώ όταν η πρόωση αυξάνει (μειώνει) επίπεδο οι δονήσεις μειώνονται (αυξάνονται). Επίσης φαίνεται πως το βάθος κοπής έχει μεγαλύτερη επίδραση στις δονήσεις απ' ότι η πρόωση.

Όμοιες εκτιμήσεις βγαίνουν και από το Σχήμα 4.11, όπου φαίνεται η εναλλαγή του παράγοντα πρόωση όταν το βάθος κοπής παραμένει στο υψηλό επίπεδο (από την 3 πλάκα στην 4 πλάκα) και αντίστοιχα η εναλλαγή του βάθους κοπής όταν η πρόωση παραμένει στο υψηλό επίπεδο (από την 2 πλάκα στην 4 πλάκα).

4.3.1 Επιλογή οπών προς ανάλυση

Τα αισθητήρια της μέτρησης του θερμομέτρου υπερύθρων, δεν επηρεάζονται από την γεωμετρία του υλικού προς διάτρηση όπως έχει αναφερθεί. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τη μέτρηση των δονήσεων από τα δύο εγκατεστημένα επιταχυνσιόμετρα (στο κεφάλαιο 3 φαίνεται η διάταξη). Λόγω της πρόσδεσης του κομματιού πάνω στην τράπεζα εργασίας (με τη χρήση δεστών), καθώς και του σταθερού σημείου εγκατάστασης των αισθητηρίων, υπάρχει διακύμανση της απόστασης μεταξύ του σημείου διάτρησης και της θέσης τους. Η αυξομείωση αυτής

της απόστασης μεταβάλει τα μετρούμενα σήματα, λόγω της απόσβεσής των σημάτων κατά τη μεταφορά τους μέσα από το υλικό. Έτσι χρειάστηκε να γίνει επιλογή ενός σετ οπών, όπου θα γίνουν οι αναλύσεις των δεδομένων των δονήσεων, το οποίο να είναι όσο γίνεται απαλλαγμένο από την παραπάνω αδυναμία της πειραματικής διάταξης. Παρακάτω, στο σχήμα 4.12 είναι χρωματισμένες με πράσινο οι οπές που επιλέχθηκαν για ανάλυση σύμφωνα με την γεωμετρία του κομματιού αλλά και την τοποθέτηση των δεστών και των αισθητηρίων.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	2	3	4	5	6	7	8			
2	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
3	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
4	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
5	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
6	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
7	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
8	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
9		83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
10			93	94	95	96	97	98	99	100	101
11				102	103	104	105	106	107	108	109

Σχήμα 4.12: Αρίθμηση οπών και σκίαση των προς ανάλυση οπών.

Θα μπορούσε να γίνει επεξεργασία και με τα δεδομένα των οπών που είναι με κίτρινο χρώμα, όμως με μία γρήγορη παρατήρηση των αποτελεσμάτων στο Excel φάνηκε ότι οι τιμές των δονήσεων σε αυτές τις οπές είναι μικρότερες γιατί βρίσκονται πολύ κοντά στις δέστρες. Επίσης στις οπές με το πράσινο χρώμα είναι πιο έντονη και η φθορά του κοπτικού αφού οι μισές είναι στην αρχή της διάτρησης ενώ οι υπόλοιπες στο τέλος.

4.3.2 Ανάλυση πειράματος με τον παράγοντα ηλικία σε παραπάνω από δύο επίπεδα

Αφού η ανάλυση θα γίνει στις οπές που περιγράφηκαν στην παραπάνω υποενότητα, ο παράγοντας ηλικία του κοπτικού έχει 12 επίπεδα μετρούμενα σε οπές (επίπεδα παράγοντα ηλικία: 1, 2, 3, 9, 10, 18, 92, 100, 101, 107, 108, 109).

Έτσι στο πείραμά θα ελεγχθούν $2 \times 2 \times 12 = 48$ μετρήσεις δονήσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας ANOVA από τον οποίο θα προκύψουν τα συμπεράσματα.

Πίνακας 4.22: ANOVA**Tests of Between-Subjects Effects**

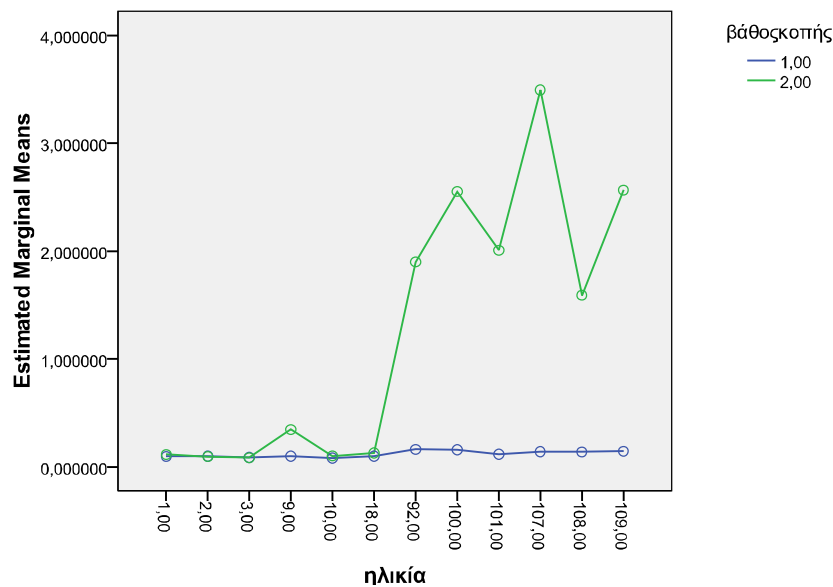
Dependent Variable: δονήσεις

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	65,527 ^a	36	1,820	3,076	,025	,910
Intercept	22,393	1	22,393	37,840	,000	,775
βάθος κοπής	15,303	1	15,303	25,860	,000	,702
πρώωση	4,342	1	4,342	7,338	,020	,400
ηλικία	17,627	11	1,602	2,708	,057	,730
βάθος κοπής * ηλικία	16,276	11	1,480	2,500	,072	,714
βάθος κοπής * πρώωση	3,376	1	3,376	5,704	,036	,341
πρώωση * ηλικία	8,603	11	,782	1,322	,326	,569
Error	6,509	11	,592			
Total	94,429	48				
Corrected Total	72,036	47				

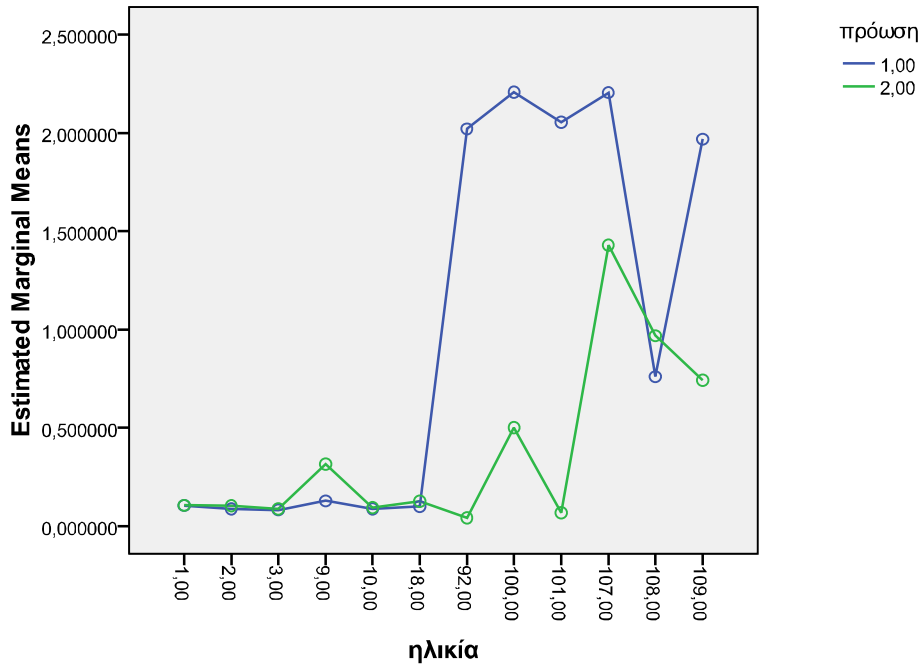
a. R Squared = ,910 (Adjusted R Squared = ,614)

Από τον πίνακα της Ανάλυσης Διακύμανσης παρατηρείται πώς αρκετά σημαντική επίδραση έχει το βάθος κοπής στις δονήσεις, το οποίο φάνηκε και από τα αρχικά σχεδιαγράμματα (σχήματα 4.10, 4.11). Επίσης, παρατηρώντας τις τιμές του Sig. στον πίνακα 4.20, σημαντική επίδραση έχει και η πρώωση (0,020) και ακολουθεί οριακά η ηλικία του κοπτικού (0,57). Ακόμα από τις αλληλεπιδράσεις, αυτή που δεν επιδρά καθόλου στις δονήσεις είναι (πρώωση*ηλικία) αφού η τιμή του Sig. είναι 0,326 το οποίο αρκετά μεγαλύτερο από το επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Παρακάτω δίνονται και τα σχήματα που απεικονίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων.

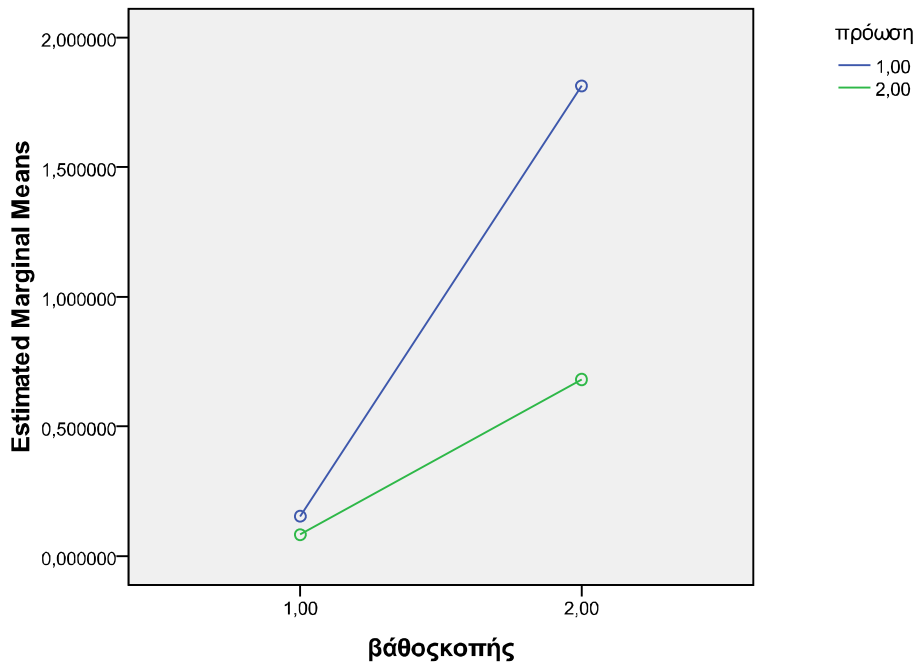
Estimated Marginal Means of δονήσεις**Σχήμα 4.13: Αλληλεπίδραση (βάθος κοπής*ηλικία).**

Estimated Marginal Means of δονήσεις



Σχήμα 4.14: Αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία).

Estimated Marginal Means of δονήσεις



Σχήμα 4.15: Αλληλεπίδραση (πρόωση* βάθος κοπής)

Σε όλα τα Σχήματα παρατηρείται αλληλεπίδραση. Ακόμα και στο Σχήμα 4.14 όπου απεικονίζεται η αλληλεπίδραση (πρόωση*ηλικία). Βέβαια οι κορυφές των

σχημάτων σχετικά συμπίπτουν. Γενικά πάντως μία αλληλεπίδραση που το P-value είναι ίσο με 0,326, όπως συμβαίνει στην αλληλεπίδραση (πρώση*ηλικία) δεν μπορεί να θεωρηθεί εντελώς αδιάφορη και μάλιστα όταν το σφάλμα έχει γίνει κατ' εκτίμηση, όπως έχει γίνει στις συγκεκριμένες αναλύσεις όπου στο σφάλμα μπήκε η μεγαλύτερης τάξης αλληλεπίδραση γιατί δεν είχαν γίνει επαναλήψεις στο πείραμα.

Ο πίνακας 4.23 των παραμέτρων, έχει τα αποτελέσματα της πολλαπλής παλινδρόμησης. Παρακάτω θα γίνουν οι εκτιμήσεις για τις δονήσεις στους 48 δυνατούς συνδυασμούς.

Πίνακας 4.23: Εκτίμηση Παραμέτρων

Parameter Estimates							
Dependent Variable: δονήσεις							
Parameter	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval		Partial Eta Squared
					Lower Bound	Upper Bound	
Intercept	1,886	,675	2,497	,030	,200	3,173	,362
[βάθοςκοπή=1,00]	-1,890	,801	-2,360	,038	-3,652	-,127	,336
[βάθοςκοπή=2,00]	0 ^a						
[πρώση=1,00]	1,756	,801	2,194	,051	-,006	3,519	,304
[πρώση=2,00]	0 ^a						
[ηλικία=1,00]	-1,836	,942	-1,949	,077	-3,910	,237	,257
[ηλικία=2,00]	-1,849	,942	-1,963	,075	-3,923	,225	,259
[ηλικία=3,00]	-1,865	,942	-1,979	,073	-3,938	,209	,263
[ηλικία=9,00]	-1,513	,942	-1,606	,137	-3,587	,561	,190
[ηλικία=10,00]	-1,848	,942	-1,961	,076	-3,921	,226	,259
[ηλικία=18,00]	-1,811	,942	-1,922	,081	-3,884	,263	,251
[ηλικία=92,00]	-1,041	,942	-1,105	,293	-3,115	1,032	,100
[ηλικία=100,00]	-,253	,942	-,269	,793	-2,327	1,820	,007
[ηλικία=101,00]	-,937	,942	-,995	,341	-3,011	1,136	,083
[ηλικία=107,00]	1,154	,942	1,224	,246	-,920	3,227	,120
[ηλικία=108,00]	-,257	,942	-,273	,790	-2,331	1,816	,007
[ηλικία=109,00]	0 ^a						
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=1,00]	2,401	1,088	2,207	,049	,007	4,796	,307
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=2,00]	2,423	1,088	2,227	,048	,028	4,817	,311
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=3,00]	2,423	1,088	2,227	,048	,029	4,817	,311
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=9,00]	2,173	1,088	1,997	,071	-,222	4,567	,266
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=10,00]	2,401	1,088	2,207	,050	,006	4,795	,307
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=18,00]	2,392	1,088	2,199	,050	-,002	4,787	,305
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=92,00]	,683	1,088	,627	,543	-1,712	3,077	,035
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=100,00]	,027	1,088	,024	,981	-2,368	2,421	,000
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=101,00]	,529	1,088	,486	,636	-1,865	2,924	,021
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=107,00]	-,931	1,088	-,856	,410	-3,326	1,463	,062

[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=108,00]	,968	1,088	,890	,393	-1,427	3,362	,067
[βάθοςκοπή=1,00] * [ηλικία=109,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=1,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=2,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=3,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=9,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=10,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=18,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=92,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=100,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=101,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=107,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=108,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [ηλικία=109,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=1,00] * [πρώση=1,00]	-1,061	,444	-2,388	,036	-2,038	-,083	,341
[βάθοςκοπή=1,00] * [πρώση=2,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [πρώση=1,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[βάθοςκοπή=2,00] * [πρώση=2,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=1,00] * [ηλικία=1,00]	-1,227	1,088	-1,128	,283	-3,621	1,168	,104
[πρώση=1,00] * [ηλικία=2,00]	-1,242	1,088	-1,141	,278	-3,636	1,153	,106
[πρώση=1,00] * [ηλικία=3,00]	-1,232	1,088	-1,132	,282	-3,626	1,163	,104
[πρώση=1,00] * [ηλικία=9,00]	-1,412	1,088	-1,298	,221	-3,807	,982	,133
[πρώση=1,00] * [ηλικία=10,00]	-1,232	1,088	-1,133	,281	-3,627	1,162	,104
[πρώση=1,00] * [ηλικία=18,00]	-1,254	1,088	-1,152	,274	-3,648	1,141	,108
[πρώση=1,00] * [ηλικία=92,00]	,752	1,088	,692	,503	-1,642	3,147	,042
[πρώση=1,00] * [ηλικία=100,00]	,479	1,088	,441	,668	-1,915	2,874	,017
[πρώση=1,00] * [ηλικία=101,00]	,759	1,088	,697	,500	-1,636	3,153	,042
[πρώση=1,00] * [ηλικία=107,00]	-,451	1,088	-,415	,686	-2,846	1,943	,015
[πρώση=1,00] * [ηλικία=108,00]	-1,434	1,088	-1,319	,214	-3,829	,960	,136
[πρώση=1,00] * [ηλικία=109,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=1,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=2,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=3,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=9,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=10,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=18,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=92,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=100,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=101,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=107,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=108,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.
[πρώση=2,00] * [ηλικία=109,00]	0 ^a	.	.	.	.	.	.

a. This parameter is set to zero because it is redundant.

Τα αποτελέσματα των εξισώσεων παρουσιάζονται παρακάτω, όπου $Y_{i,j,k}$ είναι οι δονήσεις με i 1 ή 2 ανάλογα με το επίπεδο του βάθους κοπής, j αντίστοιχα για την πρώση και $k = \{1, 2, 3, 9, 10, 18, 92, 100, 101, 107, 108, 109\}$:

Ενδεικτικά θα γίνει εκτίμηση της 1^{ης} οπής για κάθε δυνατό συνδυασμό, δηλαδή 4 συνδυασμοί.

$$Y_{1,11} = 1,686 - 1,890 + 1,756 - 1,836 + 2,401 - 1,061 = 1,056$$

$$Y_{1,2,1} = 0,361$$

$$Y_{2,1,1} = -0,15$$

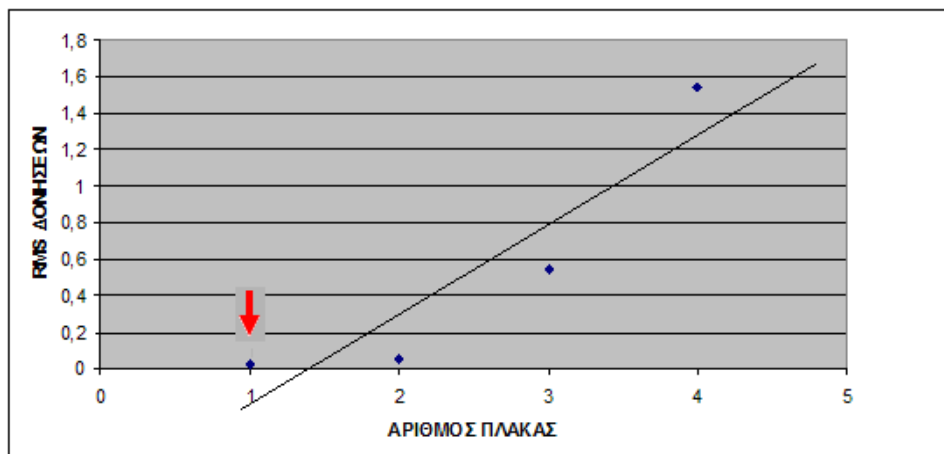
$$Y_{2,2,1} = 1,606$$

Πίνακας 4.25: Σύγκριση εκτιμούμενης με μετρούμενης τιμής των δονήσεων.		
i,j,k	Εκτιμούμενη Τιμή	Μετρούμενη Τιμή
1,1,1	1,056	0,0883
1,2,1	0,361	0,1041
2,1,1	-0,15	0,1079
2,2,1	1,606	0,1218

Στον πίνακα 4.25 συγκρίνονται οι τιμές των δονήσεων που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, με τις εκτιμούμενες τιμές των δονήσεων από την γραμμική παλινδρόμηση. Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης φαίνεται ότι έχουν αποκλίσεις από τις πραγματικές μετρούμενες τιμές. Παρατηρείται επίσης ότι από την εκτίμηση προκύπτει αρνητική τιμή, το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο διότι η ανάλυση έγινε για τα RMS των δονήσεων που είναι θετικές τιμές.

Ενώ για την ανάλυση διακύμανσης τα συμπεράσματα είναι σίγουρα ορθά, στην παλινδρόμηση είναι αρκετά επισφαλής για τους εξής λόγους:

- Δεν έχουν γίνει επαναλήψεις στο πείραμα ($n=1$), λόγω της συνέχειας της διπλωματικής εργασίας με προηγούμενη διπλωματική εργασία δεν υπήρχαν αρκετές πλάκες της ίδιας σύστασης.
- Το σφάλμα είναι κατ' εκτίμηση υπολογισμένο, επειδή δεν έγιναν επαναλήψεις στο πείραμα ήταν αδύνατος ο υπολογισμός του και έτσι χρειάστηκε στο σφάλμα να συμπεριληφθούν οι μεγαλύτερης τάξης αλληλεπιδράσεις, οι οποίες κατά κανόνα είναι ασήμαντες.
- Ο αριθμός των μετρήσεων είναι μικρός, λόγω συγκεκριμένου αριθμού διαθέσιμων πλακών το μέγεθος του δείγματος δεν είναι αρκετά μεγάλο.
- Δεν είναι γνωστή ακριβώς η γραμμικότητα μεταξύ των παραγόντων. Δηλαδή η σχέση μεταξύ του βάθους κοπής και της πρόωσης σε σχέση με τις τιμές των RMS των δονήσεων μπορεί να μη είναι πάνω σε μία ευθεία γραμμή ακριβώς.



Σχήμα 4.16: Παράδειγμα γραφικής παράστασης απεικόνισης

Έτσι όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η ευθεία γραμμή είναι η εκτίμηση που προσπαθεί να κάνει η παλινδρόμηση, να ενώσει δηλαδή τα σημεία των μετρήσεων. Τα σημεία όμως δεν είναι εντελώς γραμμικά, δηλαδή δεν ενώνονται με ευθεία γραμμή. Επομένως η εκτίμηση δεν είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές. Μάλιστα φαίνεται και πώς μπορεί να προκύψει αρνητική εκτίμηση (κόκκινο βελάκι) σε κάποια τιμή ενώ η τιμή αυτή είναι θετική. Η ευθεία γραμμή της παλινδρόμησης προσπαθώντας να περάσει όσο πιο κοντά γίνεται από όλα τα σημεία, φαίνεται ότι περνώντας κοντά από τη μέτρηση της πρώτης πλάκας η εκτίμηση που κάνει είναι αρνητική.

4.4 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των Πειραματικών Αποτελεσμάτων με την βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS. Μέσα από τις στατιστικές αναλύσεις, τα σχεδιαγράμματα και την μέθοδο του Σχεδιασμένου Πειράματος αποκομίσθηκαν σημαντικές και ενδιαφέρουσες πληροφορίες για τις παραμέτρους αξιολόγησης φθοράς κοπτικών (θερμοκρασία περιοχής κοπής, δονήσεις), αλλά και για τους παράγοντες που τις επηρεάζουν (ηλικία κοπτικού, βάθος κοπής, πρόωση κινητήρα).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αποκομίσθηκαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και οι ενδιαφέρουσες προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη του θέματος.

4.5 Βιβλιογραφία

- [1] Χαράλαμπος Γναρέλλης, “*Ανάλυση Δεδομένων με το SPSS 14.0 for Windows*”, Παπαζήση, ISBN: 960-02-1969-9, 2006.
- [2] Γιώργος Ν. Ταγαράς, “*Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*”, Καθηγητής Α.Π.Θ., Ζήτη, ISBN:960-431-706-7, 2001.
- [3] Δημήτριος Π. Ψωινός, “*Στατιστική*”, Εκδόσεις Ζήτη, Οκτώβριος 1999, Θεσσαλονίκη
- [4] Ευστάθιος Δημητριάδης, “*Στατιστικές Εφαρμογές με S.P.S.S.*”, Κριτική, ISBN: 978-960-218-258-1, 2007.
- [5] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, “*Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling—II. Investigation on some problems associated with sensor integration*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 35, Issue 6, Pages 795-815, June 1995.
- [6] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, “*On Multisensor Approach to Drill Wear Monitoring*”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 42, Issue 1, Pages 71-74, 1993.
- [7] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, “*Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling—I. Correlation with drill wear*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 35, Issue 6, Pages 775-793, June 1995.
- [8] T. I. Liu and K. S. Anantharaman, “*Intelligent classification and measurement of drill wear*”, Journal of engineering for industry, Vol. 116, No3, pp. 392-397, 1996.
- [9] T. Radhakrishnan, R. K. Kawlra and S. M. Wu, “*A mathematical model of the grinding wheel profile required for a specific twist drill flute*” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 22 No 4, pp 239 251, 1982.

- [10] L. Hoehn and I. Niven, "*Averages on the Move*, Math. Magazine 58, Pages 151-156, 1985.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προτάσεις

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	103
5.1 Εισαγωγή	104
5.2 Συμπεράσματα.....	104
5.2.1 Χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων σε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.....	104
5.2.2 Σωστή επιλογή των ανεξάρτητων Σχεδιασμένων Μεταβλητών.....	104
5.2.3 Συμπεράσματα για τις Παραμέτρους εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων.....	105
5.3 Προτάσεις.....	106
5.3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Σχεδιασμού Πειραμάτων και σε άλλες πειραματικές διατάξεις.....	106
5.3.2 Δημιουργία συστήματος μέτρησης χρόνου ζωής κοπτικών εργαλείων... ..	106
5.3.3 Αξιολόγηση επιπλέον παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος.....	107
5.3.4 Δημιουργία συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής	107

5.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική ολοκληρώνεται με την περάτωση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων και την ανάλυση των στατιστικών αποτελεσμάτων, επιτυγχάνοντας το σκοπό της. Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν κατά την προσπάθεια ολοκλήρωσής της, καθώς και η αξιολόγηση των παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων παρατίθενται παρακάτω.

Επίσης καταγράφονται πολλές νέες ιδέες για την εξέλιξη του θέματος, οι οποίες προήλθαν από τη γνώση που αποκομίστηκε κατά τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της παρούσας εργασίας. Οι ιδέες αυτές παρουσιάζονται ως προτάσεις.

5.2 Συμπεράσματα

5.2.1 Χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων σε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη

Το πρώτο βήμα καθώς και το πιο σημαντικό, ήταν να εφαρμοστεί η μέθοδος των Σχεδιασμένων Πειραμάτων και πιο συγκεκριμένα των Παραγοντικών Πειραμάτων, σε όμοια πειραματική διάταξη με προηγούμενη διπλωματική. Οι δυσκολίες που συναντήθηκαν στο Σχεδιασμό των Πειραμάτων για τον παραπάνω λόγο, αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα ήταν ότι προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, το πείραμα εξαναγκάστηκε στη χρήση πλακών ίδιας σύστασης, με αποτέλεσμα λόγω περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων πλακών (πέντε) να χρειαστεί να περιοριστεί και ο αριθμός των επαναλήψεων των πειραμάτων αλλά και ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών προς εξέταση (βάθος κοπής, πρόωση, ηλικία κοπτικού).

5.2.2 Σωστή επιλογή των ανεξάρτητων Σχεδιασμένου Μεταβλητών

Το κυριότερο βήμα του Σχεδιασμού Πειραμάτων είναι να επιλεγθούν οι κυριότερες ανεξάρτητες μεταβλητές που θα εξετασθούν στο πείραμα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία λόγω των 5 διαθέσιμων πλακών κατεργασίας οι μεταβλητές που ήταν δυνατόν να αναλυθούν ήταν 2 (βάθος κοπής και πρόωση του κινητήρα), καθώς θα είχαν δύο επίπεδα και επομένως 4 δυνατούς συνδυασμούς (4 πλάκες). Ο παράγοντας ηλικία του κοπτικού που ελέγχθηκε δεν επηρέασε τον αριθμό πλακών

αφού τα επίπεδά του ήταν ανάλογα με τον αριθμό της οπής και έπρεπε να συμπεριληφθεί στον έλεγχο αφού η ηλικία του κοπτικού δεν παραμένει ίδια και έτσι οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δεν θα ήταν όμοιες. Εάν δεν υπήρχε υλικός περιορισμός μία άλλη παράμετρος που θα μπορούσε να ελεγχθεί χωρίς να επηρεάζει την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη και τη σωστή λειτουργία των αισθητηρίων της, είναι οι στροφές του κινητήρα που τελικά παρέμειναν σταθερές.

Η επιλογή του βάθους κοπής και της προώσεως αποδείχτηκε πώς ήταν σωστή, αφού η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε πως και οι δύο μεταβλητές επηρεάζουν τις παραμέτρους εκτίμησης της φθοράς των κοπτικών (δόνηση και θερμοκρασία περιοχής κοπής) και επομένως και την φθορά.

5.2.3 Συμπεράσματα για τις Παραμέτρους εκτίμησης φθοράς κοπτικών εργαλείων

Η μεθοδολογία των Σχεδιασμένων Πειραμάτων απαιτεί τον έλεγχο κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών ώστε να εκτιμηθούν κάποιες εξαρτημένες ανεξέλεγκτες μεταβλητές. Οι δονήσεις που παράγονται από την κατεργασία της διάτρησης, όπως και η θερμοκρασία που αποκτά το κοπτικό και το κατεργαζόμενο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της διάτρησης είναι μεταβλητές που δεν μπορούν να ελεγχθούν από τον μελετητή, αποτελούν όμως βασικές παραμέτρους της διάγνωσης της φθοράς των κοπτικών. Επομένως για να μπορούν να αξιολογηθούν αυτές οι παράμετροι χρειάζεται να εκτελεστούν Σχεδιασμένα Πειράματα με Σχεδιασμένες Μεταβλητές, ελέγξιμες από τον μελετητή σε Σχεδιασμένα Επίπεδα. Οι Σχεδιασμένες Μεταβλητές επιλέχθηκαν να είναι το βάθος κοπής, η πρόωση του κινητήρα και η ηλικία του κοπτικού.

Με την εναλλαγή των επιπέδων των μεταβλητών και με τον έλεγχο όλων των δυνατών συνδυασμών έγινε εκτίμηση των δονήσεων και της θερμοκρασίας στην περιοχή κοπής. Έτσι παρατηρήθηκε ποια παράμετρος μπορεί να εκτιμηθεί σωστά και έτσι να γίνει και έμμεση εκτίμηση της φθοράς. Πολύτιμα συμπεράσματα αποκομίσθηκαν κατά την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων και την στατιστική ανάλυση τα οποία έδειξαν πως η θερμοκρασία είναι η καταλληλότερη μέθοδος εκτίμησης της φθοράς, καθώς μπορεί να γίνει σωστή εκτίμηση της θερμοκρασίας από τα Σχεδιασμένα Πειράματα. Οι δονήσεις είχαν αρκετές αδυναμίες, όπως είναι η μεγάλη επιρροή της θέσης των αισθητηρίων στα αποτελέσματα των μετρήσεων, η στήριξη του κομματιού κατεργασίας, οι επιπλέον δονήσεις που παράγονται από τον κινητήρα της εργαλειομηχανής.

Σε αντίθεση με τις δονήσεις, η θερμοκρασία στην περιοχή κοπής αποδείχτηκε να μην επηρεάζεται έντονα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο λόγος είναι ότι το

υπέρυθρο θερμόμετρο είναι αρκετά κοντά στο κοπτικό εργαλείο και εστιάζει στην περιοχή διάτρησης.

5.3 Προτάσεις

5.3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Σχεδιασμού Πειραμάτων και σε άλλες πειραματικές διατάξεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δόθηκε βαρύτητα στην αξιολόγηση παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενη διπλωματική εργασία, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί.

Θα ήταν ενδιαφέρον να ελεγχθούν διάφοροι παράμετροι σε μία πειραματική διαδικασία στο αν και πόσο επηρεάζουν την φθορά του κοπτικού. Για παράδειγμα θα μπορούσε να ελεγχθεί η επίδραση που έχει στη φθορά του κοπτικού το προς κατεργασία υλικό. Δηλαδή να χρησιμοποιηθούν πλάκες αλουμινίου, χάλυβα και σιδήρου και να βρεθεί η επιρροή του παράγοντα, υλικό προς κατεργασία, και αν είναι αισθητή η διαφορά στη φθορά του κοπτικού σε σχέση με το υλικό του κομματιού επεξεργασίας.

Άλλη παράμετρος που θα μπορούσε να ελεγχθεί είναι η διάμετρος ή το υλικό του τρυπανιού. Για παράδειγμα, σε μία βιομηχανία υπάρχει δυνατότητα το προϊόν να κατεργαστεί με δύο διαφορετικά υλικά κοπτικών εργαλείων. Με τη μέθοδο αυτή, θα μπορούσαν να εξαχθούν συμπεράσματα για το ποιο υλικό φθείρεται βραδύτερα.

Άλλοι παράμετροι είναι η χρήση ή μη ψυκτικού υγρού, οι στροφές του κινητήρα, η ίδια η εργαλειομηχανή. Έτσι μπορούν να προκύψουν μοντέλα, σε κάθε πειραματική διάταξη, τα οποία θα είναι ικανά να προβλέψουν την φθορά του κοπτικού εργαλείου και με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η έγκαιρη αλλαγή του, πριν τη θραύση ή την μείωση της κοπτικής του ικανότητας.

5.3.2 Δημιουργία συστήματος μέτρησης χρόνου ζωής κοπτικών εργαλείων

Πολλές εταιρίες κατασκευής CNC εργαλειομηχανών σε συνεργασία με κατασκευάστριες εταιρίες κοπτικών εργαλείων, βρίσκονται στην προσπάθεια δημιουργίας ενός συστήματος μέτρησης του εναπομείναντος χρόνου ζωής των κοπτικών εργαλείων [1].

Το σύστημα αυτό, λαμβάνοντας στοιχεία από μια βάση δεδομένων με τις απαραίτητες πληροφορίες των κοπτικών εργαλείων και σε συνδυασμό με τις

τρέχουσες συνθήκες κοπής (στροφές και πρόωση εργαλείου, χρήση ψυκτικού), θα μπορεί να υπολογίσει τις εναπομείναντες ώρες ζωής του κοπτικού εργαλείου μέχρι την τελική φθορά ή θραύση του.

Οι απαραίτητες πληροφορίες που θα εμπεριέχει η βάση δεδομένων θα έχουν συλλεχθεί από Σχεδιασμένα Πειράματα της συγκεκριμένης διάταξης. Στα πειράματα αυτά χρειάζεται να καταπονείται αρκετά το κοπτικό και σε πολλά από αυτά ακόμη και να σπάει, διότι η μέτρηση της φθοράς θα γίνεται με ειδικό μικροσκόπιο και έτσι η φθορά πρέπει να είναι αισθητή. Έτσι με την χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων και την βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να γίνει απευθείας εκτίμηση της φθοράς, με τον τρόπο που στην παρούσα διπλωματική γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας στην περιοχή κοπής.

5.3.3 Αξιολόγηση επιπλέον παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών με χρήση της μεθόδου Σχεδιασμού Πειράματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε αξιολόγηση δύο παραμέτρων εκτίμησης φθοράς κοπτικών, των δονήσεων και της θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά το σύστημα ήταν ικανό να συλλέξει επιπλέον δεδομένα όπως το ρεύμα κινητήρα περιστροφής (Spindle Motor Current) και του κινητήρα πρόωσης του άξονα Z (Feed Motor Current). Από τη βιβλιογραφία [2,3] προέκυψε ότι υπάρχει συσχέτιση των ρευμάτων κινητήρα περιστροφής και κινητήρα πρόωσης του άξονα Z, με τη θραύση ή την ανεπάρκεια διάτρησης του κοπτικού εργαλείου, έτσι θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν διεξοδικές αναλύσεις και να αξιολογηθούν και αυτοί οι παράμετροι ως προς την εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Η εξαγωγή στατιστικών παραμέτρων όπως οι τιμές RMS των ρευμάτων κινητήρα περιστροφής και κινητήρα πρόωσης του άξονα Z, υποδηλώνουν την αύξηση της κοπτικής ροπής και της κάθετης δύναμης αντίστοιχα [4], που είναι συνάρτηση της αύξησης φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

5.3.4 Δημιουργία συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής

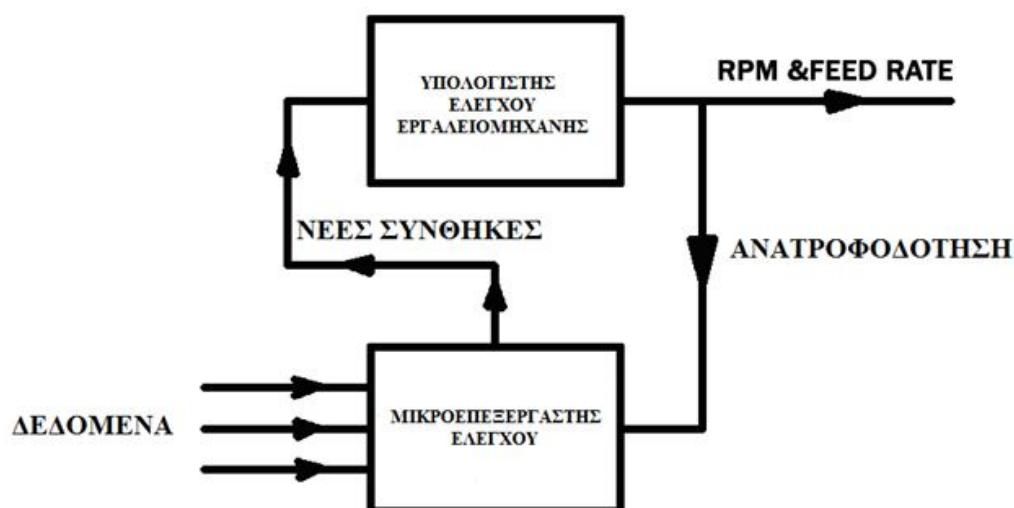
Ο απώτερος σκοπός της παρακολούθησης και καταγραφής των λειτουργικών παραμέτρων στις εργαλειομηχανές CNC, είναι η ενσωμάτωση συστημάτων αυτόματης αναπροσαρμογής των συνθηκών κοπής κατά το χρόνο λειτουργίας τους.

Τα σημερινά εξελιγμένα λογισμικά CAD/CAM, διαθέτουν βάσεις δεδομένων από τις οποίες ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει συγκεκριμένα εργαλεία για ανάλογες

κατεργασίες, καθώς και τις πρώτες ύλες των προς κατεργασία αντικειμένων. Οι βάσεις αυτές έχουν ένα μεγάλο πλήθος από παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται από το εκάστοτε λογισμικό, για τον υπολογισμό των συνθηκών κοπής κατά την δημιουργία του κώδικα G και M. Βέβαια οι συνθήκες αυτές ποτέ δεν είναι οι βέλτιστες για να επιτευχθούν αντικείμενα με υψηλό λόγο ποιότητας προς χρόνο κατεργασίας.

Αντιθέτως με τη δημιουργία και τη χρήση ενός συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής, θα μπορούσαν να επιτευχθούν μικρότεροι χρόνοι κατεργασίας, οι οποίοι είναι πάρα πολύ σημαντικοί στην σημερινή βιομηχανία, καθώς και ποιοτικότερων κατασκευαστικά κομματιών.

Η βασική ιδέα με την οποία μπορεί να υλοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα, βασίζεται στην αρχή της ανατροφοδότησης (Feedback) με δεδομένα στον μικροεπεξεργαστή ελέγχου. Αρχικά τα τοποθετημένα αισθητήρια όργανα, θα συλλέγουν τα δεδομένα και θα τα τροφοδοτούν σε έναν υπολογιστή ο οποίος με βάση τα δεδομένα που έχει λάβει εκείνη τη χρονική στιγμή, θα τα επεξεργάζεται και θα εξάγει τις συνθήκες κοπής. Στη συνέχεια οι συνθήκες κοπής θα μεταφέρονται στον υπολογιστή ελέγχου της εργαλειομηχανής για την εκτέλεση της κατεργασίας (Σχήμα 5.1). Το σύστημα αυτό δουλεύοντας σε πραγματικό χρόνο (Real Time), θα έχει τη δυνατότητα να κατεργάζεται τα υλικά με καλύτερους χρόνους και υψηλότερη ποιότητα, καθώς και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων μειώνοντας το κόστος αλλαγής τους.



Σχήμα 5.1: Γραφική απεικόνιση συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής συνθηκών κοπής.