

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΣΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΝΤΟΥΡΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΑΙ7075 - Τ6



ΠΟΡΦΥΡΗ ΚΑΛΛΙΡΡΟΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡ. ΔΙΑΤΡ. : 6

XANIA 2012

Στην οικογένειά μου.....

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη και τον Δρ. Παναγιώτη Κυράτση για τη χρήσιμη βοήθειά τους στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δημήτριο Βακόνδιο για την προθυμία, την υπομονή και την καθοριστική συμβολή του κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
----	----------	---

ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	.7
2.1 Κατεργασία με αφαίρεση υλικού ή κοπής	.7
2.2 Δυνάμεις κοπής	.8
2.3 Σχεδιασμός πειραμάτων (Design of experiments)	27
2.4 Ψηφιακή καθοδήγηση	31
2.5 Φραιζάρισμα (milling)	33
	 ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

3.	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	.37
	3.1 Εισαγωγή	.37
	3.2 Υλικό κατεργασίας	.39
	3.3 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco	.39
	3.4 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης	.40
	3.5 Δυναμόμετρο Kistler	.44

4.	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ	49
	4.1 Εισαγωγή	49
	4.2 Κάθετο φραιζάρισμα	49
	4.3 Διατρητικό φραιζάρισμα	51
	4.4 Ελκτικό φραιζάρισμα	52
	4.5 Πλάγιο φραιζάρισμα	53
	4.6 Πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα	54
	4.7 Πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα	55

5.	MONTEAO RSM	56
	5.1 Εισαγωγή	56
	5.2 Λογισμικό Minitab	58
	5.3 Επεξεργασία μετρήσεων	.58

6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	.61
	6.1 Εισαγωγή	.61
	6.2 Κάθετο φραιζάρισμα	.62
	6.3 Διατρητικό φραιζάρισμα	.69
	6.4 Ελκτικό φραιζάρισμα	.76
	6.5 Πλάγιο φραιζάρισμα	.83
	6.6 Πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα	.92
	6.7 Πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα	.98

7.	́ΥΝΟΨΗ10)6
		-

0		~
ö.	ΒΙΒΛΙΟΙ ΡΑΦΙΑΙΟ)/

ПАРАРТНМА110

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αδιαμφισβήτητα, οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων. Τις τελευταίες δεκαετίες το υψηλό κόστος των κατεργασιών με αφαίρεση υλικού, επέβαλε την αναζήτηση μεθόδων αύξησης της παραγωγικότητας που ισοδυναμεί με βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων, ανά περίπτωση, συνθηκών κοπής. Αντίστοιχα, η εξέλιξη των υλικών των κοπτικών εργαλείων, ο σφοδρός ανταγωνισμός ανάμεσα στις κατασκευάστριες εταιρείες και το άνοιγμα των αγορών, επιτείνανε αυτήν την ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Οι αυτοματοποιημένες τεχνολογίες στον χώρο της παραγωγής (CNC, CAD/CAM, FMS, CIM), έχοντας μεγάλο κόστος εγκατάστασης, απαιτούν με την σειρά τους μεγάλους ρυθμούς παραγωγής προκειμένου να αποσβεστεί αυτό το κόστος.

Το φραιζάρισμα αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Στην κατεργασία αυτή απαιτείται, όπως και σε όλες τις αντίστοιχες κατεργασίες, αύξηση της παραγωγικότητας συνοδευόμενη από αντίστοιχη αύξηση της ποιότητας και ελαχιστοποίηση του κόστους. Οι τρεις αυτοί παράγοντες εξαρτώνται άμεσα από την βέλτιστη χρησιμοποίηση του συστήματος εργαλειομηχανή – κοπτικό εργαλείο και την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κοπής.

Για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας στο πολυαξονικό καθοδηγούμενο φραιζάρισμα απαιτείται η κατά το δυνατόν πλήρης γνώση των κυριότερων παραμέτρων που επηρεάζουν το μηχανισμό κοπής και επιδρούν αποφασιστικά στην παραγωγικότητα της κατεργασίας και στην ποιότητα των κατεργασμένων προϊόντων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναπτύχτηκε ένα μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων κοπής και παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο επιδρά ο κάθε παράγοντας κοπής στις δυνάμεις αυτές καθώς και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων μεταξύ τους. Η επίτευξη αυτού του στόχου γίνεται με τη χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments) σε ντουραλουμίνιο Al7075 T6. Με το αναπτυσσόμενο μοντέλο μπορεί να προβλεφθεί η τιμή των δυνάμεων κοπής ανάλογα με το συνδυασμό των συνθηκών κοπής που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης. Στη συνέχεια γίνεται μελέτη τόσο των επιδράσεων των κυρίων παραγόντων, όσο και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους με στόχο τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας με κριτήριο τη μέγιστη τιμή των δυνάμεων κοπής.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

Οι κατεργασίες κοπής χρησιμοποιούν τις εργαλειομηχανές για την επιβολή δύναμης η οποία θα πρέπει να υπερνικήσει την αντίσταση του κατεργαζόμενου υλικού σε πλαστική παραμόρφωση καθώς και την αντίσταση σχηματισμού της νεοκατεργασμένης επιφάνειας. Η γνώση των δυνάμεων αυτών που αναπτύσσονται κατά την κοπή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, τόσο για τις κατασκευάστριες εταιρείες των εργαλειομηχανών, όσο και για τους τελικούς χρήστες των εργαλειομηχανών αυτών που είναι οι μηχανουργοί και γενικά οι τεχνικοί που ασχολούνται με τις κατεργασίες κοπής. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή ενός υλικού αποτελούν επίσης σημαντικά μεγέθη αξιολόγησης της κατεργαστικότητάς του. Έτσι, είναι σημαντικό να υπάρχουν δεδομένα για τις αναμενόμενες συνιστώσες της δύναμης κοπής κατά την κατεργασία, ιδιαίτερα για τους παρακάτω λόγους:

- Η ισχύς της εργαλειομηχανής που πρόκειται να υλοποιήσει μια κατεργασία, εξαρτάται από τις προκύπτουσες δυνάμεις κατά την κατεργασία αυτήν. Για τον λόγο αυτό, οι συνιστώσες της δύναμης κοπής είναι βασικό δεδομένο μια τη σχεδιομελέτη της εργαλειομηχανής.
- Οι συνιστώσες της δύναμης κοπής κατά την κατεργασία δημιουργούν παραμόρφωση εξαρτημάτων της εργαλειομηχανής, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η επιθυμητή υψηλή κατεργασία της εργαλειομηχανής. Η γνώση αυτών των δυνάμεων βοηθά στη σωστή σχεδιομελέτη των εξαρτημάτων των εργαλειομηχανών.
- Η γνώση των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενός συγκεκριμένου υλικού με καθορισμένες συνθήκες κοπής, αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για τον καθορισμό της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας της εργαλειομηχανής.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά τις συνιστώσες της δύναμης κοπής είναι:

- Η μέθοδος κατεργασίας και το είδος του αποβλίττου (σταθερό ή μεταβαλλόμενο πάχος).
- Οι συνθήκες κοπής όπως η πρόωση, το βάθος κοπής, η γεωμετρία του κοπτικού, η ταχύτητα κοπής, η παρουσία ψυκτικού υγρού, κ.λπ..
- Το κατεργαζόμενο υλικό, η χημική του σύνθεση, η πιθανή θερμική κατεργασία, κ.λπ..
- Το κοπτικό εργαλείο, η γεωμετρία των κόψεων, η πιθανή φθορά, κ.λπ..

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές μελέτες για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής, βασισμένες σε αναλυτικές σχέσεις, εμπειρικούς τύπους αλλά και πιο πρόσφατα σε αριθμητικές μεθόδους με τη βοήθεια των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η δυσκολία στον ιδανικό υπολογισμό των δυνάμεων κοπής έγκειται στο ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι παραπάνω αναφερόμενοι παράγοντες που τις επηρεάζουν, να ενταχθούν δηλαδή σε ένα κοινό νόμο προσδιορισμού των δυνάμεων, γεγονός ιδιαίτερα δύσκολο.

2.1 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού ή κοπής

Με τον όρο κατεργασίες με αφαίρεση υλικού ή κοπής, εννοούνται μια σειρά από τεχνολογίες που ουσιαστικά έχουν σκοπό να αφαιρέσουν ποσότητα μη επιθυμητού υλικού από ένα αρχικό τεμάχιο. Οι κατεργασίες κοπής χρησιμοποιούνται συνήθως για να μετατρέψουν ένα τεμάχιο που είναι χυτό, σφυρήλατο ή προερχόμενο από άλλες

πρωτογενείς διαδικασίες διαμόρφωσης, σε τελικό προϊόν σύμφωνα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του. Γενικά, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις που στο τελικό προϊόν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, αυτή έχει επέλθει μετά από κατεργασία με αφαίρεση υλικού.

Η πλειοψηφία των βιομηχανικών εφαρμογών των κατεργασιών κοπής αφορά μεταλλικά προϊόντα και υλοποιείται με τη βοήθεια ειδικών μηχανών που προσφέρουν την ισχύ η οποία απαιτείται για την κοπή. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται εργαλειομηχανές και κάθε μία από αυτές έχει και διαφορετική φιλοσοφία υλοποίησης της κοπής, προσφέροντας συγκεκριμένη ανά κατεργασία κινηματική ανάμεσα στους δύο βασικούς παράγοντες της κοπής, το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Οι βασικοί συντελεστές λοιπόν που παίζουν σημαντικό ρόλο στην κοπή και φαίνονται στο σχήμα 2.1 είναι:

- Το κατεργαζόμενο τεμάχιο
- Το κοπτικό εργαλείο
- Το απόβλιττο (το αφαιρούμενο υλικό)

Το κοπτικό εργαλείο κινείται σε σχέση προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα υ, ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλιττο που κινείται επί του κοπτικού εργαλείου μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του /1/.



Σχήμα 2.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής

2.2 Δυνάμεις κοπής

<u>2.2.1 Γενικά</u>

Οι δυνάμεις κοπής είναι η κύρια αιτία των παραμορφώσεων των δομών των εργαλειομηχανών και των τεμαχίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία σφαλμάτων μορφής και παραβιάσεις ανοχών. Αν και μπορούν να επηρεάσουν τα δομικά στοιχεία μιας εργαλειομηχανής που κατανέμονται σε μεγάλο χώρο, οι δυνάμεις κοπής αναπτύσσονται σε μια πολύ μικρή περιοχή στο περιβάλλον τεμαχίου-εργαλείου.

Η πλήρης γνώση του μεγέθους των αναπτυσσόμενων κατά την κοπή δυνάμεων, ενδιαφέρει άμεσα τόσο τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής όσο και τον χρήστη της.

Τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής ενδιαφέρουν οι δυνάμεις κοπής για την εν γένει σχεδίαση της εργαλειομηχανής, των εργαλείων, των διαφόρων συσκευών και διατάξεων πρόσδεσης των εργαλείων, των τεμαχίων, και των διαφόρων ιδιοσυσκευών.

Ο χρήστης της εργαλειομηχανής ενδιαφέρεται να κατέχει στοιχεία σχετικά με τις αναμενόμενες δυνάμεις κοπής για λόγους αποδοτικής εκμετάλλευσης της εργαλειομηχανής. Έτσι καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της ισχύος κοπής και η σωστή επιλογή του μεγέθους της εργαλειομηχανής, ο υπολογισμός παραμορφώσεων του κοπτικού που εισάγουν σφάλματα διαστάσεων και μορφής στο κατεργαζόμενο τεμάχιο όπως επίσης και η μελέτη της δυναμικής ευστάθειας του συστήματος εργαλειομηχανή – κοπτικό – τεμάχιο /2,3,4,5,6/.

2.2.2 Υπολογισμός δυνάμεων κοπής

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της δύναμης κοπής συγκέντρωσε το ενδιαφέρον των ερευνητικών ήδη από τις πρώτες περιόδους ανάπτυξης της επιστήμης της Μηχανουργικής Τεχνολογίας.

Ο Taylor /7/ προσπάθησε να περιγράψει τη δύναμη απότμησης στο φραιζάρισμα με τη βοήθεια μιας εκθετικής σχέσης του τύπου:

$$F_c = k_1 \cdot a_z \cdot s_z^{k_2} \tag{2.1}$$

όπου α_z είναι το αξονικό βάθος κοπής του κοπτικού εργαλείου και η s_z η πρόωση ανά κοπτική ακμή.

Ο Kronenberg /8/ πρότεινε μια παρόμοια σχέση που περιέγραφε την δύναμη σαν συνάρτηση της διατομής του αποβλίττου:

$$F_i = b \cdot h_1^{1-m_i} \cdot k_{i1,1} \tag{2.2}$$

Οι Kienzle και Victor /9,10,11/ χρησιμοποίησαν μία νέα εκθετική σχέση, που συνέδεε το μεν πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου γραμμικά, το δε πάχος εκθετικά, με τις αναμενόμενες συνιστώσες της δύναμης κοπής, σε προκαθορισμένες διευθύνσεις Ι σε σύστημα συντεταγμένων ως προς την κοπτική ακμή του εργαλείου (σύστημα κόψης):

$$F_i = b \cdot h_1^{1-m_i} \cdot k_{i1.1} \tag{2.3}$$

Ο Kamm /12/ επεκτείνει τη σχέση των Kienzle και Victor, προσθέτοντας έναν επιπλέον συντελεστή, που περιγράφει την άνοδο των συνιστωσών δυνάμεων κοπής, λόγω της φθοράς του κοπτικού εργαλείου.

$$F_{i} = b \cdot h_{1}^{1-m_{i}} \cdot k_{i1,1} \cdot l_{sz}^{ni}$$
(2.4)

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των προηγούμενων σχέσεων είναι ο μηδενισμός της υπολογισμένης συνιστώσας δύναμης κοπής στην περίπτωση που το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου τείνει προς το μηδέν:

$$\lim F_i = 0 \tag{2.5}$$

$$h - 0$$

Παρατηρήσεις διαφόρων ερευνητικών πάντως /13,14,15,16,17,18/ αναφέρουν την ύπαρξη συνιστωσών δύναμης κοπής και στην περίπτωση απλής τριβής του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο με μηδενική πρόωση και χωρίς να υπάρχει κοπή αποβλίττου. Το κενό αυτό καλύπτεται με την χρήση "προσθετικών" σταθερών σε γραμμικές σχέσεις όπως π.χ. αυτές που προτάθηκαν από τους Richter /16/ και Sadowy /17/:

$$F_c = b \cdot (k_1 + k_2 \cdot h) \tag{2.6}$$

$$F_c = a_z \cdot (k_1 + k_2 \cdot s_z) \tag{2.7}$$

Ο Klipcera /19/ προτείνει μία σχέση που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των γραμμικών και των εκθετικών προσεγγιστικών σχέσεων:

$$F/b = p + (g \cdot h) + (q/c) \cdot e^{c.h}$$
(2.8)

Στην καθημερινή εργαστηριακή και βιομηχανική πράξη καθιερώθηκε η σχέση των Kienzle/Victor (2.3) λόγω της αξιοπιστίας της και της σχετικής ευκολίας που προσφέρει στη διεξαγωγή των πειραμάτων για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων σταθερών. Οι σταθερές αυτές όμως, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στο φραιζάρισμα με υψηλή αξιοπιστία για όλο το φάσμα τιμών του πάχους αποβλίττου λόγω της διαφορετικής ειδικής αντίστασης, που προβάλλει το υλικό κατά την κοπή του ανάλογα με την τιμή του πάχους αποβλίττου. Κρίνεται επιβεβλημένος επομένως (όταν απαιτείται πλήρης και ακριβής περιγραφή των συνιστωσών δύναμης κοπής) ο προσδιορισμός των τεχνολογικών σταθερών σε επιλεγόμενες περιοχές πάχους αποβλίττων όπως π.χ. προτείνεται από τον Victor /20/.

Η σταθερά k_{i1.1} μπορεί να θεωρηθεί σαν μέτρο για το απόλυτο ύψος των ανηγμένων στη διατομή του αποβλίττου δυνάμεων ενώ ο συντελεστής 1-m_i σαν μέτρο για την εξάρτηση των ανηγμένων δυνάμεων από το πάχος του αποβλίττου.

Οι προσδιορισμένες τεχνολογικές σταθερές ισχύουν για συγκεκριμένους συνδυασμούς κοπτικού – υλικού – συνθηκών κοπής.

Οι Koenig – Langhammer /21/, Kamm /22/, Koenig – Essel /23/ και Witte /24/ με την χρήση διορθωτικών συντελεστών προσπαθούν να περιγράψουν την επίδραση της φθοράς και της γεωμετρίας του κοπτικού σφήνα στις αναμενόμενες δυνάμεις χωρίς ακόμα να έχει ξεκαθαριστεί η γενική ισχύς των διορθωτικών αυτών συντελεστών όταν μεταβάλλονται οι υπόλοιπες συνθήκες κοπής.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε όλες τις γνωστές δημοσιεύσεις /11,25,26,27,28/ το πρόβλημα της αντιστοίχησης πάχους – αποβλίττου – μετρούμενης δύναμης στην περίπτωση κοπτικού με γωνία ελικώσεως λ, όπου το πάχος του αποβλίττου δεν είναι σταθερό σε κάθε θέση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, αντιμετωπίζεται προσεγγιστικά με την χρησιμοποίηση τιμών του πάχους του αποβλίττου.

2.2.3 Προσδιορισμός των συνιστωσών δυνάμεων κοπής κατά την ορθογωνική κοπή

Για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιούνται αναλυτικές – προσεγγιστικές σχέσεις, οι σταθερές των οποίων προσδιορίζονται πειραματικά για κάθε συνδυασμό κοπτικού εργαλείου – κατεργαζόμενου υλικού – συνθηκών κοπής. Με τη βοήθεια αυτών των σχέσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής σαν συνάρτηση της διατομής του απαραμόρφωτου αποβλίττου (πάχος, πλάτος), των επιλεγμένων συνθηκών κατεργασίας, της φθοράς των εργαλείων κ.λ.π..

Οι συνηθισμένες εργασίες τεμαχισμού, όπως είναι το φραιζάρισμα και η τόρνευση, έχουν πολύπλοκες γεωμετρίες περιλαμβάνοντας ενέργειες κοπής στις τρεις διαστάσεις εξαιτίας των γωνιών του εργαλείου και των κοφτερών ακμών. Ωστόσο, η βασική μηχανική της διαδικασίας μπορεί να γίνει κατανοητή χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο μοντέλο κοπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Σε αυτό το απλούστερο μοντέλο κατεργασίας, το άκρο κοπής είναι κάθετο στη σχετική ταχύτητα κοπής μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Το εργαλείο με γωνία κλίσης γ κινείται κατά μήκος του υλικού κατεργασίας αφαιρώντας υλικό πάχους h (απόβλιττο). Το υλικό κατεργασίας, π.χ. το απαραμόρφωτο απόβλιττο,

υπόκεινται σε πλαστική παραμόρφωση με υψηλή τάση και μεγάλο ρυθμό παραμόρφωσης ως αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών, και φτάνει στο σημείο κλίσης όπου ρέει υπό πλαστικές και ελαστικές συνθήκες επαφής /29/.

Η πολύπλοκη μηχανική της διαδικασίας απλοποιείται θεωρώντας δύο ζώνες παραμόρφωσης: την κύρια παραμόρφωση ή ζώνη διάτμησης και τη δευτερεύουσα παραμόρφωση ή κλίση (επιφάνεια) επαφής. Στα μοντέλα με ζώνη διάτμησης, τα οποία είναι πιο ρεαλιστικά μια υψηλές ταχύτητες κοπής, το υλικό θεωρείται ότι υπόκεινται σε διάτμηση κατά μήκος του επιπέδου AB, όπως φαίνεται στο <u>σχήμα 2.2</u>, και αποτελούν το απόβλιττο. Οι διάφορες δυνάμεις που προέκυψαν κατά τη διαδικασία αυτή φαίνονται στο <u>σχήμα 2.2</u>, όπου F είναι η συνισταμένη δύναμη που ενεργεί στο εργαλείο. Όπως φαίνεται στο σχήμα, δεν τοποθετούνται δυνάμεις στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου, μια και το εργαλείο θεωρείται ιδανικά αιχμηρό και δεν αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής με την κατεργασμένη επιφάνεια. Επίσης, η ζώνη διάτμησης απλοποιείται και από ζώνη θεωρείται επίπεδο. Με τις υποθέσεις αυτές, οι δυνάμεις που ενεργούν στο απόβλιττο και που παρουσιάζονται στο δεξί μέρος του σχήματος, όπου φαίνεται το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του αποβλίττου, είναι:

- Η αντίσταση σε διάτμηση του αποβλίττου F_s που βρίσκεται πάνω στο επίπεδο διάτμησης.
- Η αντίστοιχη κάθετη στο επίπεδο διάτμησης Ν_s που αποτελεί την αντίδραση από το τεμάχιο στο απόβλιττο.
- Η δύναμη τριβής F_c που είναι η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και αποβλίττου και αντιτίθεται στην κίνησή του.
- Η δύναμη Ν_c που είναι κάθετη στην επιφάνεια επαφής αποβλίττου εργαλείου.
- Η συνισταμένη F των δυνάμεων F_c και N_c είναι η δύναμη κοπής, ίση και αντίθετη με τη δύναμη F'.

Η γωνία διάτμησης φ είναι η πιο θεμελιώδης παράμετρος σε μια κατεργασία κοπής, καθώς είναι αναγκαία για την ανάλυση των δυνάμεων. Για το λόγο αυτό υπήρξε ένα από τα πιο κομβικά σημεία της μηχανικής έρευνας μια περισσότερο από μισό αιώνα. Στην πρωτοποριακή του εργασία, ο Eugene Merchant χρησιμοποίησε τη συνθήκη ελάχιστης ενέργειας μια να προσδιορίσει την τιμή της γωνίας διάτμησης στην περίπτωση μιας ορθογωνικής κοπής /30/. Θεώρησε ένα απόλυτα αιχμηρό εργαλείο (χωρίς τριβή), μία δισδιάστατη παραμόρφωση και μία ομοιόμορφη κατανομή πίεσης στο επίπεδο διάτμησης, η οποία είναι ίση με την απόδοση της διατμητικής αντοχής του υλικού κατεργασίας, και κατέληξε στη διάσημη σχέση του για τη γωνία διάτμησης η οποία διατυπώνεται ως εξής:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\delta - \gamma) \tag{2.9}$$

όπου δ είναι η γωνία τριβής, δηλαδή δ= tan⁻¹(μ), και μ είναι ο συντελεστής τριβής στην επιφάνεια κλίσης.



δ: μέση φαινόμενη γωνία τριβής



Οι δυνάμεις κοπής, όπως παρουσιάστηκαν στην ορθογωνική κοπή, απεικονίζονται στο <u>σχήμα 2.3</u> με τη μορφή κυκλικού διαγράμματος, όπως πρωτοσχεδιάστηκε από τον Eugene Merchant το 1945 /30/. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_p που ουσιαστικά προσδιορίζει την ισχύ της κοπής και η οποία έχει την ίδια διεύθυνση με την κίνηση του εργαλείου. Αυτή η δύναμη κοπής καθώς και η κάθετη συνιστώσα F_Q είναι εκείνες που συνήθως μετρούνται με ειδικό εξοπλισμό δυναμομέτρησης.



Σχήμα 2.3: Κυκλικό διάγραμμα δυνάμεων κοπής στην ορθογωνική κοπή

Η γωνία δ-γ είναι η γωνία επενέργειας της δύναμης κοπής και εξαρτάται από την ταχύτητα κοπής της οποίας η μεταβολή, μεταβάλλει και το μέσο συντελεστή τριβής απβλίττου και εργαλείου, με αντίστοιχη μεταβολή και της γωνίας τριβής δ. η γωνία αποβλίττου επίσης, επιδρά σημαντικά στο μέσο συντελεστή τριβής και μάλιστα, την αύξηση της γωνίας αποβλίττου γ ακολουθεί αύξηση του μέσου συντελεστή τριβής ή της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής δ.

Οι δυνάμεις F_p και F_Q μπορούν να εκφραστούν ως εξής /29/:

$$F_p = h_1 \cdot w \cdot K_p \quad \text{kat} \quad F_Q = h_1 \cdot w \cdot K_Q \quad (2.10)$$

όπου h₁ είναι το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, w είναι το πλάτος της κοπής και K_p και K_q είναι οι συντελεστές της δύναμης κοπής. Οι συντελεστές της δύναμης κοπής μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση της δύναμης κατά την ορθογωνική κοπή ως ακολούθως:

$$K_{p} = \tau \frac{\cos(\delta - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta - \gamma)} \quad \text{kat} \quad K_{Q} = \tau \frac{\sin(\delta - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta - \gamma)} \quad (2.11)$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση του υλικού κατεργασίας στο επίπεδο διάτμησης.

Επίσης παρατηρώντας τον κύκλο του Merchant, μπορούν εύκολα να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$F_c = F_p \cdot \sin \gamma + F_Q \cdot \cos \gamma \tag{2.12}$$

$$N_c = F_p \cdot \cos \gamma - F_Q \cdot \sin \gamma \tag{2.13}$$

$$\mu = \tan \delta = \frac{F_c}{N_c} = \frac{F_Q + F_p \cdot \tan \gamma}{F_p - F_Q \cdot \tan \gamma}$$
(2.14)

$$F_s = F_p \cdot \cos \varphi - F_Q \cdot \sin \varphi \tag{2.15}$$

$$N_s = F_p \cdot \sin \varphi + F_Q \cdot \cos \varphi \tag{2.16}$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \tag{2.17}$$

$$\sigma_s = \frac{N_s}{A_s} \tag{2.18}$$

$$\tau_F = \frac{F_c}{A_F} \tag{2.19}$$

$$\delta = \arctan(\mu) \tag{2.20}$$

$$\mu = \frac{\tau_F}{\sigma_F} \tag{2.21}$$

$$F_{p} = \frac{A_{1} \cdot \tau_{s} \cdot \cos(\delta - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta - \gamma)}$$
(2.22)

$$F_{Q} = \frac{A_{1} \cdot \tau_{s} \cdot \sin(\delta - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \delta - \gamma)}$$
(2.23)

όπου:

μ	ο μέσος φαινόμενος συντελεστής τριβής
$\delta = \arctan(\mu)$	η μεση φαινομενη γωνια τριβης στην επιφανεια επαφης
	αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου
т	η μέση διατμητική τάση
σ	η μέση ορθή τάση
b	το πλάτος του αποβλίττου
L	το μήκος επαφής αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου
$A_{\rm l} = b \cdot h_{\rm l}$	η θεωρητική επιφάνεια του αποβλίττου
$A_s = \frac{A_1}{\sin \varphi} = \frac{b \cdot h_1}{\sin \varphi}$	η επιφάνεια διάτμησης
$A_F = b \cdot L$	η επιφάνεια επαφής αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου

Η ακρίβεια του μοντέλου δύναμης κατά την ορθογωνική κοπή είναι περιορισμένη λόγω των παραδοχών που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι προβλέψεις μπορούν να βελτιωθούν με την εξέταση μιας πιο ρεαλιστικής ζώνης παραμόρφωσης καθώς και μοντέλα υλικού, όπως το πεπερασμένος πάχος της ζώνης διάτμησης, η μη ομοιόμορφη κατανομή τάσεων στην επιφάνεια κλίσης και τα χαρακτηριστικά ροής του υλικού. Επίσης μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση πειραματικών προσεγγίσεων. Οι παράμετροι της διαδικασίας κοπής μπορούν να προσδιοριστούν μέσω δοκιμών σε ορθογωνική κοπή εκτελούμενη σε τόρνο, όπου ένας σωλήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κομμάτι κατεργασίας, προκειμένου να εξαλειφθούν οι δυνάμεις τριβής. Η γωνία κλίσης, η διατμητική τάση και ο συντελεστής τριβής μπορούν να ληφθούν από δοκιμές στην ορθογώνια κοπή ως εξής:

$$\tan \varphi = \frac{r \cos \gamma}{1 - r \sin \gamma}, \ \tau = \frac{(F_p \cos \varphi - F_Q \sin \varphi) \sin \varphi}{w h_1}, \ \tan \delta = \frac{F_Q + F_p \tan \gamma}{F_p - F_Q \tan \gamma}$$
(2.24)

όπου r είναι ο δείκτης κοπής ή ο λόγος που ισούται με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου προς το πάχος του παραμορφωμένου αποβλίττου (h₁/h₂). Ο δείκτης κοπής r είναι ο αντίστροφος του λόγου συμπίεσης του αποβλίττου λ (λ= h₂/h₁) που εκφράζει το βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το υλικό κατά το σχηματισμό αποβλίττου.

2.2.4 Προσδιορισμός των συνιστωσών δυνάμεων κοπής κατά την λοξή κοπή

Η ορθογωνική κοπή που παρουσιάστηκε, αποτελεί απλοποιημένη εκδοχή της πραγματικότητας που είναι η λοξή κοπή. Στο <u>σχήμα 2.4</u> παρουσιάζεται το σύστημα των δυνάμεων στη λοξή κοπή που είναι και η γενική περίπτωση. Στη λοξή κοπή, η δύναμη κοπής F αναλύεται σε τρεις συνιστώσες κατά μήκος των τριών αξόνων, καθέτων μεταξύ τους. Οι συνιστώσες αυτές είναι η κύρια δύναμη κοπής F_s , η δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης F_v και η δύναμη απώθησης F_R . Για τον υπολογισμό της κύριας δύναμης κοπής, η αναλυτική σχέση που διατυπώθηκε από τον Otto Kienzle, παίρνει υπόψη της τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής και την υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια /31/.



Σχήμα 2.4: Συνιστώσες δυνάμεις κοπής στη λοξή κοπή

Βασικό δεδομένο για τον υπολογισμό των αναπτυσσομένων δυνάμεων κατά την κατεργασία ενός υλικού, είναι η ειδική αντίσταση κοπής του υλικού αυτού. Η ειδική αντίσταση κοπής είναι η ανηγμένη στη διατομή του αποβλίττου δύναμη κοπής και προσδιορίζεται πειραματικά. Ο τύπος του Kienzle είναι:

$$F_s = b \cdot K_{s1,1} \cdot h^{1-z} \tag{2.25}$$

όπου:

- F_s κύρια δύναμη κοπής
- b πλάτος αποβλίττου
- h πάχος αποβλίττου
- K_{s1,1} ειδική αντίσταση κοπής
- z σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Σχετικές πειραματικές μελέτες για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης κοπής, έχουν γίνει για τα περισσότερα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά και έχουν δημοσιευθεί πίνακες με χαρακτηριστικές τιμές.

Παρόμοιες σχέσεις με την (2.25) ισχύουν για τις συνιστώσες της δύναμης κοπής, απώθησης F_R και στην κατεύθυνση της πρόωσης F_v.

$$F_{R} = b \cdot K_{R1,1} \cdot h^{1-y}$$
(2.26)

$$F_{V} = b \cdot K_{V1,1} \cdot h^{1-x}$$
(2.27)

Η διαδικασία για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.25) έως (2.27), μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις μηχανουργικές κατεργασίες με κοπή, λαμβάνοντας όμως υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε κατεργασίας.

Για παράδειγμα στο φραιζάρισμα, σε αντίθεση με την τόρνευση, το απόβλιττο δεν έχει σταθερό πάχος. Έτσι, ο σχετικός υπολογισμός με τον τύπο του Kienzle απαιτεί την εύρεση μιας μέσης τιμής του πάχους του αποβλίττου. Επίσης οι συντελεστές K_s, K_v και K_R διαφοροποιούνται από τους αντίστοιχους της τόρνευσης και πρέπει σε κάθε περίπτωση να έχουν προσδιοριστεί πειραματικά. Οι εξισώσεις (2.25) έως (2.27) σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα με τετμημένη το πάχος του αποβλίττου και τεταγμένη την ανηγμένη στο πλάτος του αποβλίττου δύναμη κοπής, περιγράφονται ως ευθεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Η ευθεία αυτή έχει κλίση τον «συντελεστή κλίσης» 1-z που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της δύναμης κοπής σε ζεύγος κατεργαζόμενου υλικού – κοπτικού

εργαλείου, για συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής και διαφορετικά πάχη αποβλίττου. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για τις ειδικές αντιστάσεις κοπής για ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά. Προφανώς οι τιμές δεν καλύπτουν όλες τις μηχανουργικές κατεργασίες και τα πάχη κοπής, απλώς η χρήση τους προσφέρει μια αρχική εκτίμηση των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 2.5: Γραφικός υπολογισμός ειδικών αντιστάσεων κοπής

Στα πλαίσια των διαφόρων προσομοιώσεων μηχανουργικών κατεργασιών και των αντίστοιχων υπολογισμών για ποιότητα επιφάνειας και δυνάμεων κοπής, έχουν αναπτυχθεί λογισμικά τα οποία προσομοιώνουν την κινηματική των κατεργασιών, προσδιορίζουν τις διεισδύσεις του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο (υπό διάφορες συνθήκες κατεργασίας, όπως η κλίση του εργαλείου, συνθήκες κοπής κ.λπ.), τα παραγόμενα απόβλιττα και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής κατά τη διάρκεια της μελετούμενης κατεργασίας. Τα λογισμικά αυτά είναι επίσης ικανά να προσδιορίζουν την τοπομορφία της κατεργασμένης επιφάνειας, τις χαρακτηριστικές τιμές ποιότητας της και να προτείνουν κατά περίπτωση τις βέλτιστες συνθήκες κοπής. Η εγκυρότητα τέτοιων λογισμικών επιβεβαιώνεται με πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την ποιότητα της νεοκατεργασμένης επιφάνειας αλλά κυρίως την ακρίβεια υπολογισμού των συνιστωσών της δύναμης κοπής.

Υλικό	z	K _{s1,1} σε N/mm²	1-x	κ _{ν1,1} σε N/mm²	1-у	Κ _{ν1,1} σε N/mm²
St50	0,26	1990	0,2987	351	0,5089	274
St70	0,30	2260	0,3835	364	0,5067	311
C15	0,22	1820	0,1993	333	0,4648	260

Ck45	0,14	2220	0,3248	343	0,5244	263
Ck60	0,18	2130	0,2877	347	0,5870	250
15CrMo5	0,17	2290	0,2488	290	0,4430	232
16MnCr5	0,26	2100	0,3024	391	0,5410	324
18CrNi6	0,30	2260	0,2750	326	0,5352	247
20MnCr5	0,25	2140	0,3190	337	0,4778	246
30CrNiMo8	0,20	2600	0,3844	355	0,5657	255
34CrMo4	0,21	2240	0,3190	337	0,3715	237
37MnSi5	0,20	2260	0,3622	259	0,7432	277
42CrMo4	0,26	2500	0,3295	334	0,5239	271
50CrV4	0,26	2220	0,2345	317	0,6106	315
GG20	0,25	1020	0,3010	240	0,5400	178
GG25	0,26	1160	0,3020	251	0,5410	190
GGG-60	0,17	1480	0,2400	290	0,5657	240

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικών αντιστάσεων κοπής

2.2.5 Δυνάμεις κοπής σε κατεργασίες με σύνθετη κινηματική

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευών ως προς την ακρίβεια διαστάσεων και μορφής και την συνθετότητα των διαφόρων εξαρτημάτων, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονες ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές, θέτουν το πρόβλημα του υπολογισμού των αναπτυσσομένων κατά την κοπή δυνάμεων σε συνθήκες πολύπλοκης κινηματικής του κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία τεμαχίων με επίσης πολύπλοκη γεωμετρία.

Ο υπολογισμός των διεισδύσεων του κοπτικού στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, της προκύπτουσας νέας γεωμετρίας, του τεμαχίου, της διατομής του αποβλίττου και των δυνάμεων κοπής, γίνεται με την βοήθεια προσομοιωτικών προτύπων της συγκεκριμένης κατεργασίας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Σε διάφορες μεθοδολογίες κοπής οδοντώσεων όπως για παράδειγμα στην πλάνιση και στο φραιζάρισμα με κύλιση, σε μια σειρά από εργασίες /32-36/, έχουν αναπτυχθεί και εξελιχθεί μαθηματικά προσομοιωτικά πρότυπα, που περιγράφουν την γεωμετρία του κοπτικού δοντιού του γραναζοκόπτη και της δημιουργούμενης γεωμετρίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου με τη βοήθεια πολυγωνικών γραμμών σε ανεξάρτητα συστήματα συντεταμένων. Η κινηματική αλυσίδα που σχηματίζεται από το κοπτικό, το κατεργαζόμενο τεμάχιο και την εργαλειομηχανή, με τη βοήθεια μετασχηματισμού συντεταγμένων, προσομοιώνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός τελικά των διεισδύσεων του κοπτικού στο τεμάχιο.

Με τη βοήθεια προσεγγιστικών – αναλυτικών σχέσεων και των απαραίτητων τεχνολογικών σταθερών υπολογίζονται οι στοιχειώδεις δυνάμεις, αθροίζονται για κάθε θέση περιστροφής και μεταφέρονται, μέσω σχηματισμού συντεταγμένων, σε επιλεγόμενο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο φραιζάρισμα, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον αναλυτικό προσδιορισμό των συνιστωσών δυνάμεων κοπής σε περιπτώσεις κατεργασίας με απλή (ευθύγραμμη) κινηματική και γεωμετρία (μετωπικός κοπέας ή περιφερικός με γωνία ελίκωσης λ=0°) του κοπτικού, κατά την κατεργασία δοκιμίων με απλή (παραλληλεπίπεδη) γεωμετρία. Αντίθετα, ελάχιστες είναι οι εργασίες που αναφέρονται σε συνθετότερες κινηματικές συνθήκες κατεργασίας.

2.2.6 Μοντελοποίηση της διακύμανσης της δύναμης κοπής στο μετωπικό φραιζάρισμα

Ο ακριβής χαρακτηρισμός των δυνάμεων κοπής είναι απαραίτητος για τη μελέτη των κοπτικών εργαλείων και της δυναμικής της κοπής.

Ο Merchant /37/ ασχολήθηκε με τη μείωση των δυνάμεων κοπής στο μετωπικό φραιζάρισμα χρησιμοποιώντας ένα κοπτικό δόντι. Το προφίλ της δύναμης κοπής πολλαπλών κοπτικών δοντιών με ίσο ή άνισο βήμα δοντιού προέρχεται από την προσθήκη πολλών μοναδιαίων προφίλ δοντιών. Ένα ημι-μηχανιστικό μοντέλο για την πρόβλεψη των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής από ένα κοπτικό δόντι προέρχεται από θεωρίες κοπής μετάλλων και γεωμετρικές σχέσεις διαδικασιών μετωπικού φραιζαρίσματος. Οι τρεις παράμετροι που υπεισέρχονται στο μοντέλο κατοπτρίζουν τις επιδράσεις των ιδιοτήτων των υλικών και της γεωμετρίας του κόφτη, το απαραμόρφωτο πάχος αποβλίττου και το λόγο της ακτινικής προς την εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης κοπής. Τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραμάτων, που πραγματοποιήθηκαν με ένα και πολλαπλά κοπτικά δόντια σε διάφορες συνθήκες κοπής, δείχνουν συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των μετρούμενων προφίλ δυνάμεων κοπής και τάξεων μεγέθους, με μέση τιμή απόκλισης 2,2% για κοπτικό εργαλείο με ένα δόντι και 7,2% για περισσότερα δόντια. Το μοντέλο της μελέτης λειτουργεί σαν ένα απλό εργαλείο για την ανάλυση των επιπτώσεων της πρόωσης, του βάθους κοπής, του εύρους της εργασίας, καθώς και των αριθμών των δοντιών στις δυνάμεις κοπής κατά το μετωπικό φραιζάρισμα.

2.2.7 Μοντελοποίηση της δύναμης κοπής κατά τη διαδικασία του φραιζαρίσματος

Τα μοντέλα των κατεργασιών κοπής είναι γενικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τις δυνάμεις σε μια ποικιλία μηχανουργικών κατεργασιών. Για παράδειγμα, θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση δύναμης κατά τη διαδικασία του φραιζαρίσματος. Το φραιζάρισμα είναι μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μηχανουργικές κατεργασίες, και έχει μία σχετικά πιο περίπλοκη γεωμετρία λόγω του περιστρεφόμενου εργαλείου, των πολλαπλών ακμών κοπής και της διακοπτόμενης ενέργειας κοπής, όπως φαίνεται στο <u>σχήμα 2.6</u> που ακολουθεί. Θα παρουσιαστούν δύο μοντέλα ανάλυσης δύναμης: τα μηχανιστικά και τα μηχανικά μοντέλα κοπής τα οποία διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται οι συντελεστές των δυνάμεων κοπής /29/.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση των διαφορικών δυνάμεων κοπής κατά το φραιζάρισμα

Στο μηχανιστικό μοντέλο δύναμης, οι συντελεστές της δύναμης κοπής έχουν βαθμονομηθεί για ορισμένες συνθήκες κοπής χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα. Έστω η διατομή που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Για ένα σημείο στο (jth) κοπτικό δόντι, οι διαφορικές δυνάμεις φραιζαρίσματος που αντιστοιχούν σε ένα απειροελάχιστο πάχος στοιχείου (dz) στην εφαπτομενική, dF_t, ακτινική, dF_r, καθώς και αξονική, dF_a, διεύθυνση μπορούν να δοθούν ως εξής:

$$dF_{i}(\varphi, z) = K_i h_i(\varphi, z) dz \tag{2.28}$$

$$dF_{ri}(\varphi, z) = K_r dF_{ti}(\varphi, z) \tag{2.29}$$

$$dF_{ai}(\varphi, z) = K_a dF_{ii}(\varphi, z) \tag{2.30}$$

όπου:

φ είναι η γωνία επαφής - εισχώρησης που μετράται από το θετικό y – άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.

K_t, K_r, K_a είναι οι συντελεστές των δυνάμεων κοπής κατά τη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης και της αξονικής διεύθυνσης αντίστοιχα.

Η αξονική συνιστώσα της δύναμης, F_{α} , είναι στην αξονική διεύθυνση του κοπτικού εργαλείου, το οποίο είναι κάθετο στη διατομή όπως φαίνεται στο <u>σχήμα 2.6</u>. Για το μοντέλο ακμής δύναμης ή γραμμικό μοντέλο ακμής δύναμης, οι διαφορικές δυνάμεις μπορούν να εκφραστούν παρόμοια με αυτές των εξισώσεων (2.28) – (2.30). Το ακτινικό (w) και αξονικό βάθος κοπής (α), ο αριθμός των δοντιών (N), η ακτίνα κοπής (R) και η γωνία ελίκωσης (i) καθορίζουν ποιο τμήμα του δοντιού είναι σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο για ένα δεδομένο γωνιακό προσανατολισμό του κόφτη, φ=Ωt, όπου είναι ο χρόνος, Ω η γωνιακή ταχύτητα σε (rad/sec) ή Ω=2πn/60, n είναι το (rpm) της ατράκτου. Το πάχος αποβλίττου σε ένα συγκεκριμένο σημείο της δύναμης ακμής μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής:

$$h_i(\varphi, z) = f_t \sin \varphi_i(z) \tag{2.31}$$

όπου f_t είναι η πρόωση ανά δόντι και φ_i(z) η γωνία εισχώρησης (για κάθε δόντι) κατά την αξονική θέση z. Οι μεταβολές στη γωνία εισχώρησης κατά μήκος της αξονικής διεύθυνσης έχουν ως εξής:

$$\varphi_j(z) = \varphi + (j-1)\varphi_p - \frac{\tan i}{R}z \qquad (2.32)$$

όπου η γωνία βήματος ορίζεται ως φ_p=2π/Ν. Οι εφαπτόμενες, ακτινικές και αξονικές δυνάμεις που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.33) – (2.36) μπορούν να επιλυθούν ως προς την κατεύθυνση πρόωσης, x, κανονική, y, και αξονική, z, και μπορούν να ενσωματωθούν στο "βυθισμένο" τμήμα του εργαλείου για την απόκτηση των συνολικών δυνάμεων φραιζαρίσματος που εφαρμόζονται σε κάθε δόντι. Για το εκθετικό μοντέλο δύναμης, προκύπτουν τα ακόλουθα, μετά την διαδικασία ολοκλήρωσης:

$$F_{x_j}(\varphi) = \frac{K_t f_t R}{4 \tan \beta} \Big[-\cos 2\varphi_j + K_r \Big(2\varphi_j(z) - \sin 2\varphi_j(z) \Big) \Big]_{z_{jl}(\varphi)}^{z_{ju}(\varphi)}$$

$$F_{y_{j}}(\varphi) = -\frac{K_{t}f_{t}R}{4\tan\beta} \Big[\Big(2\varphi_{j}(z) - \sin 2\varphi_{j}(z) \Big) + K_{r}\cos 2\varphi_{j}(z) \Big]_{z_{jl}(\varphi)}^{z_{ju}(\varphi)} \quad (2.33)$$

$$F_{z_j}(\varphi) = -\frac{K_a K_l f_l R}{\tan \beta} \Big[\cos \varphi_j(z) \Big]_{z_{jl}(\varphi)}^{z_{ju}(\varphi)}$$

όπου z_j(φ) και z_{ju}(φ) είναι τα άνω και κάτω όρια κατά την κοπή κάθε jth τμήματος από το δόντι. Οι συνολικές δυνάμεις φραιζαρίσματος μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$F_{x}(\varphi) = \sum_{j=1}^{N} F_{x_{j}}(\varphi)$$

$$F_{y}(\varphi) = \sum_{j=1}^{N} F_{y_{j}}(\varphi)$$

$$F_{z}(\varphi) = \sum_{j=1}^{N} F_{z_{j}}(\varphi)$$
(2.34)

Για το γραμμικό μοντέλο ακμής δύναμης, οι δυνάμεις λαμβάνονται επίσης χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των δυνάμεων κοπής κατά την εφαπτόμενη διεύθυνση και την διεύθυνση της πρόωσης αντίστοιχα

$$F_{t} = w(K_{tc}h + K_{te}), \ F_{f} = w(K_{fe}h + K_{fe})$$
(2.35)

όπου w είναι το πλάτος της κοπής, h το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, και ενσωματώνοντας και τα εμπλεκόμενα όρια όπως ακολούθως:

$$F_{xj}(\varphi) = \frac{R}{\tan\beta} \left\{ K_{te} \sin\varphi_{j}(z) - K_{re} \cos\varphi_{j}(z) + \frac{f_{t}}{4} \left[K_{rc} (2\varphi_{j}(z) - \sin 2\varphi_{j}(z)) - K_{tc} \cos 2\varphi_{j}(z) \right] \right\}_{z_{jl}}^{z_{ju}}$$

$$F_{xj}(\varphi) = \frac{R}{\tan\beta} \left\{ -K_{re} \sin\varphi_{j}(z) - K_{te} \cos\varphi_{j}(z) + \frac{f_{t}}{4} \left[K_{tc} (2\varphi_{j}(z) - \sin 2\varphi_{j}(z)) - K_{rc} \cos 2\varphi_{j}(z) \right] \right\}_{z_{jl}}^{z_{ju}}$$

$$(2.36)$$

$$\varphi_{xt}(z) = \pi - \cos^{-1} \left(1 - \frac{w}{R} \right)$$



Σχήμα 2.7: Τρόπος υπολογισμού ορίων

Τα εμπλεκόμενα όρια εξαρτώνται από την κοπή και τη γεωμετρία του εκάστοτε εργαλείου. Το παραπάνω σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να φανεί πως υπολογίζονται τα όρια. Η σκούρα περιοχή στο σχήμα αντιπροσωπεύει τη ζώνη κοπής μεταξύ φ_{st} και φ_{ex} κατά τη γωνιακή διεύθυνση, και μεταξύ 0 και α στην αξονική διεύθυνση. φ_{st} και φ_{ex} είναι η αρχή και το τέλος της γωνίας εισχώρησης – βύθισης και μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\varphi_{st}(z) = \pi - \cos^{-1}\left(1 - \frac{w}{R}\right)$$

$$\varphi_{ex}(z) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{w}{R}\right)$$
(2.37)
(2.38)

Να σημειωθεί ότι φ_{ex} είναι πάντα π στο αντίρροπο φραιζάρισμα και φ_{st} είναι πάντα 0 στο ομόρροπο φραιζάρισμα, σύμφωνα με τη σύμβαση του <u>σχήματος 2.7</u>. Οι ελικοειδείς κοπτικές άκρες του εργαλείου μπορούν να τέμνουν την περιοχή με έξι διαφορετικούς τρόπους ανάλογα νε τη γωνία εισχώρησης του κάθε δοντιού για z=0, φ_j. Τα όρια που αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση δίνονται τον Πίνακα 2.2 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση (2.36), προκειμένου να καθορισθούν οι δυνάμεις κοπής ανά δόντι. Οι δυνάμεις που δίνονται από τις εξισώσεις (2.33) και (2.36) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τις δυνάμεις κοπής για μια συγκεκριμένη διαδικασία φραιζαρίσματος, αν είναι γνωστοί οι συντελεστές των δυνάμεων φραιζαρίσματος. Στο μηχανιστικό μοντέλο δύναμης, οι συντελεστές των δυνάμεων κοπής K_t, K_r και K_α μπορούν να προσδιοριστούν από το μέσο όρο έκφρασης της δύναμης ως εξής:

$$K_r = \frac{P\overline{F_y} - Q\overline{F_x}}{P\overline{F_x} - Q\overline{F_y}}$$
(2.39)

$$K_t = \frac{\overline{F_x}}{f_t (P - QK_r)} \tag{2.40}$$

$$K_a = \frac{\overline{F_z}}{f_t K_t T}$$
(2.41)

όπου:

$$P = \frac{aN}{2\pi} \left[\cos 2\varphi \right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}}$$
(2.42)

$$Q = \frac{aN}{2\pi} \left[2\varphi - \sin 2\varphi \right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}}$$
(2.43)

$$T = \frac{aN}{2\pi} \left[\cos\varphi\right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}}$$
(2.44)

Υλικό	Condition	In/Out	Z _{jl}	Z _{ju}
1	$\phi_j > \phi_{ex}$ and $(\phi_j - \alpha \frac{tan\beta}{R}) > \phi_{ex}$	Out	NA	NA
2	$\phi_i > \phi_{ex}$ and $\phi_{st} < (\phi_j - \alpha \frac{tan\beta}{R}) < \phi_{ex}$	In cut	$\frac{R}{tan\beta}(\phi_j > \phi_{ex})$	α
3	$\phi_j > \phi_{ex}$ and $(\phi_j - \alpha \frac{tan\beta}{R}) < \phi_{st}$	In cut	$\frac{R}{tan\beta}(\phi_j > \phi_{ex})$	$\frac{R}{tan\beta}(\boldsymbol{\varphi}_{j} > \boldsymbol{\varphi}_{st})$
4		In cut	0	α
5	$\phi_{st} < \phi_j < \phi_{ex}$ and $(\phi_j - \alpha \frac{tan\beta}{R}) < \phi_{st}$	In cut	0	$\frac{R}{tan\beta}(\boldsymbol{\varphi}_{j} > \boldsymbol{\varphi}_{st})$
6	$\Phi_{i < \phi_{st}}$ and $(\phi_{j} - \alpha \frac{tan\beta}{R}) < \phi_{ex}$	Out	NA	NA

Πίνακας 2.2: Εύρεση ορίων ανά περίπτωση για υπολογισμό των δυνάμεων κοπής ανά δόντι

Οι μέσες δυνάμεις F_x, F_y και F_z μπορούν να ληφθούν πειραματικά από τις δοκιμές φραιζαρίσματος. Στο μοντέλο της εκθετικής δύναμης, το πάχος του αποβλίττου επηρεάζει τους συντελεστές δύναμης. Δεδομένου ότι το πάχος του αποβλίττου ποικίλει συνεχώς στο φραιζάρισμα, το μέσο πάχος αποβλίττου, h_α, χρησιμοποιείται ως:

$$h_{\alpha} = f_t \frac{\cos \varphi_{st} - \cos \varphi_{ex}}{\varphi_{ex} - \varphi_{st}}$$
(2.45)

Στις διάφορες δοκιμές, η συνήθης πρακτική είναι η διεξαγωγή των πειραμάτων σε διαφορετικά ακτινικά βάθη και τιμές πρόωσης, ώστε να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα του h_α για ένα συγκεκριμένο ζεύγος υλικού – εργαλείου. Οι συντελεστές που ισχύουν μπορούν στη συνέχεια να εκφραστούν όπως τις ακόλουθες εκθετικές συναρτήσεις:

$$K_t = K_T \cdot h_{\alpha}^{-p} \tag{2.46}$$

$$K_r = K_R \cdot h_{\alpha}^{-q} \tag{2.47}$$

$$K_{\alpha} = K_{\rm A} \cdot h_{\alpha}^{-s} \tag{2.48}$$

όπου K_T, K_R, K_A, p, q και s προσδιορίζονται από τις γραμμικές παλινδρομήσεις που εκτελούνται στις λογαριθμικές διακυμάνσεις των K_t, K_r, K_α με το h_α.

Στο γραμμικό μοντέλο ακμής δύναμης οι συνολικές δυνάμεις κοπής χωρίζονται σε δύο μέρη. Η δύναμη ακμής αντιπροσωπεύει το μέρος των δυνάμεων που δεν οφείλονται στην κοπή, και συνεπώς δεν εξαρτώνται από το "άκοπο" πάχος αποβλίττου, ενώ οι δυνάμεις κοπής εξαρτώνται. Στη συνέχεια, ο μέσος όρος δυνάμεων μπορεί να περιγραφεί ομοίως ως εξής:

$$\overline{F_q} = \overline{F_{qe}} + f_t \overline{F_{qc}}, (q = x, y, z)$$
(2.49)

όπου η ακμή και τα στοιχεία κοπής του μέσου όρου δυνάμεων (F_{qe}, F_{qc}) προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τη γραμμική παλινδρόμηση των μετρούμενων μέσων όρων των δυνάμεων φραιζαρίσματος. Οι συντελεστές των δυνάμεων κοπής για το γραμμικό μοντέλο ακμής δύναμης μπορούν να ληφθούν από το μέσο όρο δυνάμεων όμοια με το μοντέλο εκθετικής δύναμης ως εξής:

$$K_{rc} = \frac{K_{tc}P - 4\overline{F_{xc}}}{Q}$$
(2.50)

$$K_{ac} = \frac{\overline{F_{zc}}}{T}$$
(2.51)

$$K_{te} = -\frac{F_{xe}S + F_{ye}T}{S^2 + T^2}$$
(2.52)

$$K_{re} = \frac{K_{te}S + F_{xe}}{T}$$
(2.53)

$$K_{ae} = -\frac{2\pi}{aN} \frac{F_{ze}}{\varphi_{ex} - \varphi_{st}}$$
(2.54)

όπου Ρ, Q και Τ δίνονται από την εξίσωση (2.32)-(2.34) και

$$S = \frac{aN}{2\pi} \left[\sin\varphi\right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}}$$
(2.55)

Στη μηχανιστική προσέγγιση, οι συντελεστές της δύναμης κοπής πρέπει να βαθμονομούνται για κάθε ζεύγος εργαλείου – υλικού που καλύπτουν τις προϋποθέσεις που έχουν ενδιαφέρον. Το πλάγιο μοντέλο κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να 23 προβλέψει αυτούς τους συντελεστές μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των δοκιμών. Στη μηχανιστική προσέγγιση του φραιζαρίσματος, που προτάθηκε από τους Armarego και Whitfield /38/, και αργότερα από τον Budak et al. /39,40/, τα απαιτούμενα στοιχεία που προκύπτουν από τις δοκιμές της ορθογωνικής κοπής προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών και ο αριθμός των δοκιμών, και επίσης να δημιουργηθεί μια πιο γενική βάση δεδομένων η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες διαδικασίες επίσης.

2.2.8 Παράγοντες που επηρεάζουν τις συνιστώσες της δύναμης κοπής

Από εξειδικευμένα πειράματα που έχουν γίνει από εκατοντάδες ερευνητές μέχρι σήμερα, έχουν διαπιστωθεί ποσοτικές επιπτώσεις διαφόρων παραγόντων στις συνιστώσες της δύναμης κοπής /41/. Οι παράγοντες που επηρεάζουν είναι:

- Η <u>κινηματική της κοπής</u> (επηρεάζει η ύπαρξη σταθερής ή μεταβαλλόμενης διατομής αποβλίττου)
- Οι συνθήκες κοπής (επηρεάζουν η πρόωση, το βάθος κοπής, η ταχύτητα κοπής και η παρουσία λίπανσης και ψύξης)
- Το κατεργαζόμενο υλικό (επηρεάζει η χημική σύσταση και η θερμική επεξεργασία του υλικού)
- Το κοπτικό εργαλείο (επηρεάζουν το υλικό, η κοπτική γεωμετρία, η φθορά και τυχόν επικάλυψη)

Η επίδραση της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου είναι ουσιαστική στις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής. Η μεταβολή αυτής της γεωμετρίας κατά τη κοπή, επηρεάζει τις διαδικασίες πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της διάτμησης κατά τη διάρκεια της κοπής, δηλαδή την ίδια καθεαυτή τη δημιουργία του αποβλίττου. Επίσης, οι γωνίες κοπής (αποβλίττου, κοπτικού σφήνα και ελευθερίας) επηρεάζουν μια γεωμετρικές λόγους την αναλογία των συνιστωσών της δύναμης κοπής μεταξύ τους. Όταν η γωνία του αποβλίττου μικραίνει (μεγαλώνει) τότε υπάρχει αύξηση (πτώση) των συνιστωσών της δύναμης κοπής ισούται μια την κύρια δύναμη κοπής $F_s 1,5\%$ (η αύξηση και η πτώση ανά 1 μοίρα). Στο <u>σχήμα 2.8</u> παρουσιάζεται αυτή η συμπεριφορά των τριών συνιστωσών της δύναμης κοπής κοπής σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας αποβλίττου αλλά και της γωνίας τοποθέτησης και η οποία φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος.

F	6-	F _S :Κύρια δύναμη κοπής	F _V : Δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης	F _R : Δύναμη απώθησης
E S	γωνία αποβλίττου γ	1.5 %	5.0 %	1 4.0 %
+	γωνία θέσης κύριας κόψης κ	1.5 %	1.5 %	10.0 %
Επίπεδο	γωνία αποβλίττου γ	1.5 %	5.0 %	4.0 %
κόψης	γωνία θέσης κύριας κόψης κ	1.5 %	1.5 %	10.0 %

Σχήμα 2.8: Επίδραση μεταβολής γωνιών αποβλίττου και τοποθέτησης στις συνιστώσες της δύναμης κοπής

Αντίστοιχα στο <u>σχήμα 2.9</u>, παρουσιάζεται η μεταβολή μόνο της κύριας δύναμης κοπής F_s σε συνάρτηση με τη γωνία αποβλίττου γ και το πάχος αποβλίττου h.



Σχήμα 2.9: Επίδραση της γωνίας αποβλίττου και του πάχους αποβλίττου στην κύρια κίνηση κοπής

Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η μεταβολή του συντελεστή τριβής μ μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η αύξηση της γωνίας αποβλίττου συνεπάγεται μείωση της απαιτούμενης πλαστικής παραμόρφωσης, άρα ομαλότερες συνθήκες σχηματισμού του αποβλίττου και τελικά μείωση της κύριας δύναμης κοπής. Αντίθετα, η αύξηση του πάχους αποβλίττου αυξάνει, όπως είναι αναμενόμενο, τη κύρια δύναμη κοπής.

Στο <u>σχήμα 2.10</u> παρουσιάζεται η επίδραση της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής, της γωνίας τοποθέτησης του κοπτικού και του βάθους κοπής στις συνιστώσες F_s, F_R και F_v της δύναμης κοπής. Ειδικά η επίδραση της ταχύτητας κοπής στις συνιστώσες της δύναμης κοπής έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αναλύεται περισσότερο στο <u>σχήμα 2.10</u>, όπου παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα της επίδρασης της ταχύτητας κοπής ν_c στις συνιστώσες Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις περιοχές:

- Η περιοχή α όπου παρατηρείται εν γένει πτώση των δυνάμεων και είναι η περιοχή όπου υπάρχει πλήρης σχηματισμός της ψευδόκοψης και αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της δύναμης κοπής λόγω της αύξησης της γωνίας του αποβλίττου.
- Η περιοχή σ όπου παρατηρείται υποχώρηση της ψευδόκοψης και άρα αύξηση της δύναμης κοπής με αύξηση της ταχύτητας.
- Η περιοχή γ, όπου στην αρχή παρουσιάζεται πτώση της δύναμης κοπής και στη συνέχεια σταθεροποίησή της με την αύξηση της ταχύτητας κοπής.



Σχήμα 2.10: Επίδραση συνθηκών κοπής στις συνιστώσες της δύναμης κοπής

Η μορφή της καμπύλης F=f(v_c) που παρουσιάζεται στο <u>σχήμα 2.10</u>, εξηγείται ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επενέργειας του σχηματισμού της ψευδόκοψης και της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, εξαιτίας της οποίας ελαττώνεται το όριο διαρροής σε διάτμηση του υλικού. Συνολικά, η επίδραση της ταχύτητας κοπής στις χαμηλές ταχύτητες (εκεί δηλαδή που παρατηρείται το φαινόμενο της ψευδόκοψης) θεωρείται σημαντική δύναμη κοπής, ενώ στις υψηλές ταχύτητες θεωρείται αμελητέα.

2.2.9 Μέτρηση των δυνάμεων κοπής

Οι συνιστώσες της δύναμης κοπής μπορούν να μετρηθούν εύκολα και με ικανοποιητική ακρίβεια με τη βοήθεια δυναμόμετρων /41/. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται και είναι σημαντικές για ένα δυναμόμετρο, είναι η στιβαρότητα της κατασκευής του, η ευαισθησία και η ακρίβειά του. Το δυναμόμετρο θα πρέπει να είναι τόσο στιβαρό ώστε η κατεργασία κοπής να μην επηρεάζεται από επιπλέον παραμορφώσεις.

Η αρχή λειτουργίας των δυναμομέτρων στηρίζονται στην ιδιότητα που έχουν οι πιεζοκρύσταλλοι που διαθέτουν, να προσανατολίζονται σε ορισμένη κατεύθυνση ανάλογα με το μέγεθος της πίεσης που δέχονται, στέλνοντας το αντίστοιχο ηλεκτρικό φορτίο στην έξοδο του οργάνου. Τα δυναμόμετρα τριών συνιστωσών έχουν τρεις εξόδους από όπου λαμβάνονται τρία σήματα φορτίου καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί στις τρεις συνιστώσες της δύναμης που εφαρμόζεται πάνω στο δυναμόμετρο.

Στο <u>σχήμα 2.11</u>, παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές δυναμομετρήσεων με χρήση στατικών και περιστρεφόμενου δυναμόμετρου.



Σχήμα 2.11: Εφαρμογές στατικών και περιστρεφόμενων δυναμομέτρων (από KISTLER)

Τα μοντέλα κατά τη διαδικασία κοπής είναι γενικά και μπορεί να χρησιμοποιηθούν μια να προβλέψουν τις δυνάμεις σε μια ποικιλία μηχανουργικών κατεργασιών. Ως παράδειγμα θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση της δύναμης κοπής κατά τη διαδικασία του φραιζαρίσματος.

Στο φραιζάρισμα, η κοπή πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου. Το εργαλείο αυτό διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο, ενώ μια μπορεί να εισέρχεται στο κατεργαζόμενο κομμάτι, οι κοπτικές ακμές έχουν τη μορφή του σφήνα που έχει και το εργαλείο τόρνευσης (η διαδικασία του φραιζαρίσματος παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο).

2.3 Σχεδιασμός πειραμάτων (Design of experiments)

Πρόσφατες έρευνες εστιάζουν στην πρόβλεψη των παραμέτρων κοπής χρησιμοποιώντας μαθηματικές μεθόδους ή πιο σύνθετες μεθόδους με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή στις κατεργασίες μορφοποίησης υλικού /42, 43/. Μοντέλα εξισώσεων χρησιμοποιούνται με τη χρήση μαθηματικής ανάλυσης, όπως ανάλυσης παλινδρόμησης (Regration analysis) και ανάλυσης διασποράς (ANOVA). Τέλος η εξέλιξη των υπολογιστών έχει βοηθήσει στη βελτίωση της τελικής επιφάνειας με την ανάπτυξη σύγχρονων μεθόδων πρόβλεψης, όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα /44/.

2.3.1 Εισαγωγή στο σχεδιασμό πειραμάτων

Ο σχεδιασμός πειραμάτων αναφέρεται και ως στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων. Σκοπός του είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ της εξόδου μιας διεργασίας (απόκριση) και των πειραματικών της παραγόντων. Έτσι καταγράφεται η επιρροή που έχουν οι παράγοντες αυτοί πάνω στην έξοδο του συστήματος στο οποίο δρουν. Μια γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας ενός πειράματος παρουσιάζεται στο <u>σχήμα 2.12</u>.



Σχήμα 2.12: Γραφική απεικόνιση της διαδικασίας ενός πειράματος

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εύρεση ενός εμπειρικού μοντέλου που προσεγγίζεται βέλτιστα από μια συνάρτηση της μορφής:

$$y = f(X_1, X_2, ..., X_n) + \varepsilon$$
 (2.56)

όπου:

Υ : είναι η απόκριση X₁,X₂,...,X_n : είναι οι τιμές των ελεγχόμενων παραγόντων Z₁,Z₂,...,Z_n : είναι οι τιμές των ανεξέλεγκτων παραγόντων και ε : είναι το πειραματικό σφάλμα

Η ύπαρξη του ε σημαίνει ότι μπορεί να μην υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ του Υ και των (X₁,X₂,...,X_n) και αυτό μπορεί να οφείλεται:

- Σε ανεξέλεγκτους παράγοντες (Z₁,Z₂,...,Z_n) που θα επηρεάσουν την τιμή Y, αλλά δεν περιλαμβάνονται στην εξίσωση
- Στην ύπαρξη πειραματικών μετρητικών σφαλμάτων στην τιμή Υ και
- Στους ελεγχόμενους παράγοντες (X₁, X₂,...,X_n)

Η διαδικασία που ακολουθείται για το σχεδιασμό πειραμάτων βασίζεται σε μια σειρά από βήματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- <u>Προσδιορισμός του έργου.</u> Στο βήμα αυτό προσδιορίζεται ο σκοπός του έργου και ορίζεται το πρόβλημα. Επίσης γίνεται η καταγραφή της τωρινής απόδοσης του συστήματος. Σε αυτό το βήμα πρέπει να γίνει σαφές, τι είναι αυτό που πρέπει να επιτευχθεί.
- 2. <u>Επιλογή της παραμέτρου εξόδου (απόκριση)</u>. Μετά τον προσδιορισμό του έργου ορίζεται η παράμετρος Υ, που είναι η απόκριση του συστήματος. Η απόκριση πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να ανταποκρίνεται στην έξοδο του συστήματος, να είναι συνεχής (εάν είναι δυνατόν) για ευκολία ανάλυσης των δεδομένων και να διευκολύνει την σωστή και ακριβή μέτρηση της.
- 3. <u>Επιλογή των παραγόντων.</u> Το βήμα αυτό γίνεται παράλληλα με την επιλογή της απόκρισης Υ, ώστε οι παράγοντες που θα επιλεγούν να την επηρεάζουν άμεσα. Μερικές φορές η επιλογή τους είναι προφανής και εύκολη, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικοί παράγοντες είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Οι

παράγοντες ενός πειράματος μπορεί να είναι συνεχείς ή διακριτοί και για κάθε είδος πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές τιμές δοκιμής. Οι διαφορετικές αυτές τιμές δοκιμής ονομάζονται επίπεδα. Ο αριθμός των επιλεγμένων παραγόντων έχει άμεση επίδραση στο κόστος και την διάρκεια των πειραμάτων ,ενώ τα πειράματα πρέπει να έχουν επαρκείς παράγοντες, για να δώσουν σωστά αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα και με λογικό κόστος.

- 4. <u>Η επιλογή του κατάλληλου σχεδίου πειραμάτων.</u> Η επιλογή του κατάλληλου σχεδίου πειραμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των παραγόντων, το φάσμα τιμών τους και τον αριθμό των επαναλήψεων που πρέπει να εκτελεστούν. Έτσι μπορούν να σχεδιαστούν πλήρως παραγοντικά πειράματα (full factorial designs), όπου γίνεται έλεγχος για όλους τους συνδυασμούς των δεδομένων, αποκτώνται περισσότερες πληροφορίες για την διαδικασία και κοστίζουν αρκετά παραπάνω, ή μικρότερου μεγέθους κλασματικά παραγοντικά πειράματα,(fractional factorial designs), όπου εκτελείται σαφώς μικρότερος αριθμός πειραμάτων, με μικρότερο κόστος, αλλά με λιγότερες πληροφορίες για την διαδικασία που μελετάται.
- 5. <u>Εκτέλεση του πειράματος.</u> Κατά την φάση εκτέλεσης του πειράματος αρχικά γίνεται έλεγχος των οργάνων μέτρησης, για να επιβεβαιωθεί ότι λειτουργούν σωστά και δίνουν σωστές μετρήσεις. Επίσης, γίνεται έλεγχος του συστήματος για αστοχίες. Τέλος, κατά την διάρκεια εκτέλεσης γίνεται αναλυτική καταγραφή όλων των συμβάντων.
- 6. <u>Ανάλυση των δεδομένων.</u> Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με στατιστικές μεθόδους και επικεντρώνεται στα ακόλουθα θέματα:
 - Προσδιορισμός των σημαντικών και ασήμαντων επιδράσεων που προέρχονται από του παράγοντες του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις τους. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση της ανάλυσης διασποράς (ANOVA – ANalysis Of VAriance).
 - Κατάταξη των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους ανάλογα με την σημαντικότητα τους. Η ΑΝΟVΑ υπολογίζει τους αντίστοιχους συντελεστές.
 - Σύνθεση του μαθηματικού μοντέλου που προσεγγίζει βέλτιστα την απόκριση Υ του συστήματος. Το μοντέλο μπορεί να είναι γραμμικό ή πολυωνυμικό, με την προσθήκη των αλληλεπιδράσεων.
 - Αναγνώριση των καλύτερων επιπέδων (τιμές) των παραγόντων, ώστε να βρεθούν οι τιμές που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την απόκριση του συστήματος.
- 7. Συμπεράσματα και προτάσεις. Μετά την ανάλυση των δεδομένων, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το έργο που μελετάται. Εάν έχουν εξαχθεί αρκετές πληροφορίες, τότε μπορεί να προταθούν αλλαγές στην αρχική σχεδίαση της διαδικασίας. Ακόμη και όταν το έργο ολοκληρωθεί με επιτυχία και βρεθούν το μαθηματικό μοντέλο ή/και οι βέλτιστες τιμές για την μελετώμενη διαδικασία, θα πρέπει να γίνουν τα λεγόμενα πειράματα, επαλήθευσης και να διαπιστωθεί ότι η τιμή της απόκρισης στην έξοδο, είναι κοντά σε αυτή που έχει υπολογιστεί με βάση τα προηγούμενα βήματα.

2.3.2 Παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων

Οι περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούν πειράματα στα οποία εμπλέκονται δυο ή περισσότεροι παράγοντες. Στην περίπτωση αυτή, ο όρος παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων χρησιμοποιείται για να περιγράψει, όλα τα πειράματα τα οποία προκύπτουν από τον συνδυασμό όλων των επιπέδων, από όλους

τους παράγοντες που συμμετέχουν. Εάν για παράδειγμα υπάρχουν δύο παράγοντες Α και Β και για τον μεν Α υπάρχουν α επίπεδα τιμών, ενώ για τον Β υπάρχουν β επίπεδα, τότε τα πειράματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν είναι όλοι οι (α*β) συνδυασμοί. Επιπλέον, εάν για κάθε συνδυασμό πραγματοποιηθεί η αριθμός επαναλήψεων, τότε θα πραγματοποιηθούν (n*a*β) πειράματα.

Υπάρχουν τρείς κύριοι λόγοι για τη διενέργεια παραγοντικών πειραμάτων:

- Ο πρώτος λόγος είναι ότι με τα πειράματα αυτά γίνεται δυνατή η αποτίμηση των κοινών επιδράσεων δύο ή περισσότερων παραγόντων, δηλαδή των αλληλεπιδράσεων τους. Έτσι αποφεύγονται λανθασμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της μέσης απόκρισης.
- Δεύτερον, στα παραγοντικά πειράματα όλες οι παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιδράσεων των παραγόντων. Κάθε παρατήρηση της απόκρισης δίνει πληροφορίες για όλους του παράγοντες που υπεισέρχονται στο πείραμα. Δεν μένουν δηλαδή παρατηρήσεις της απόκρισης ανεκμετάλλευτες, στην τελική αποτίμηση των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων. Έτσι εξοικονομούνται πειραματικοί πόροι.
- Ο τρίτος κύριος λόγος της χρησιμότητας των παραγοντικών πειραμάτων είναι ότι τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά, ισχύουν για ένα μεγάλο εύρος πειραματικών συνθηκών.

Ένα είδος πειράματος το οποίο είναι πολύ διαδεδομένο σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά μειονεκτεί σε σχέση με τα παραγοντικά πειράματα, είναι το πείραμα της αλλαγής «ενός παράγοντα κάθε φορά». Σε μια εκδοχή του πειράματος αυτού γίνονται παρατηρήσεις της απόκρισης στα διαφορετικά επίπεδα ενός παράγοντα, ενώ όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί. Ακολούθως, επιλέγεται ένας άλλος παράγοντας για να μεταβάλλεται διατηρώντας τους υπόλοιπους αριθμούς σταθερούς κ.ο.κ.

Τα πειράματα αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά δεν παρέχουν επαρκή πληροφόρηση για τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά είναι αρκετές φορές λανθασμένα, όταν οι παράγοντες δεν επενεργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο στην απόκριση. Για παράδειγμα, όταν η μεταβλητή απόκρισης είναι η απόδοση μίας βιομηχανικής διεργασίας και υπάρχει ανάγκη εύρεσης των επιπέδων δύο ή περισσότερων παραγόντων στα οποία μεγιστοποιείται η απόδοση, ο παραγοντικός σχεδιασμός οδηγεί πάντα στην προσεγγιστική εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού ενώ ο σχεδιασμός αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά μπορεί να οδηγήσει σε ένα συνδυασμό πολύ διαφορετικό του βέλτιστου.

Επιπλέον, ακόμη και στην περίπτωση που οι παράγοντες επιδρούν μεμονωμένα πάνω στην απόκριση και δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, οι σχεδιασμοί αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά είναι λιγότερο αποτελεσματικού από τους παραγοντικούς σχεδιασμούς για την εκτίμηση των κύριων επιδράσεων των παραγόντων. Αυτό συμβαίνει γιατί η κύρια επίδραση ενός παράγοντα στους πρώτους σχεδιασμούς, βασίζεται μόνο στις πληροφορίες που δίνουν για τον παράγοντα οι παρατηρήσεις στις οποίες ο παράγοντας αυτός μεταβάλλεται και όλοι οι άλλοι μένουν σταθεροί. Αντίθετα, στους παραγοντικούς σχεδιασμούς χρησιμοποιούνται όλες οι παρατηρήσεις για την εκτίμηση της κύριας επίδρασης κάθε παράγοντα.

Η προηγούμενη αδυναμία των πειραμάτων αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά, για την ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών παραγόντων, περιορίζει το εύρος εφαρμογής των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτά, σε σύγκριση με τα παραγοντικά πειράματα. Έτσι με τους ήδη περιορισμένους διαθέσιμους πόρους, είναι δυνατή η παρακολούθηση λιγότερων παραγόντων, αφού για την εκτίμηση των κυρίων επιδράσεων τους χρειάζονται

περισσότερες συνολικά παρατηρήσεις, εάν απαιτηθεί η ίδια ακρίβεια εκτίμησης με αυτήν που δίνουν τα παραγοντικά πειράματα.

2.3.2 Μεθοδολογία RSM (Response surface Methodology)

Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει από την ανάλυση παλινδρόμησης και τον έλεγχο της ποιότητάς του με τη βοήθεια του πίνακα ANOVA. Πιο αναλυτικά η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται σε ακόλουθο κεφάλαιο.

2.4 Ψηφιακή καθοδήγηση

Τα τελευταία χρόνια είναι αισθητή η ανάγκη παραγωγής μεγάλων παρτίδων πανομοιότυπων τεμαχίων, με μικρό κόστος κατασκευής και επαναληπτικότητα στην ακρίβεια κατασκευής. Οι παραγωγικές δυνατότητες των συμβατικών εργαλειομηχανών περιορίζονται από την ικανότητα του χειριστή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ποιότητα και η παραγωγή μιας παρτίδας συγκεκριμένων τεμαχίων να εξαρτάται από την εμπειρία, την εκπαίδευση, τη φυσική κατάσταση αλλά ακόμα και τη ψυχολογική κατάσταση και διάθεση του τεχνίτη.

Η αναγκαιότητα περιορισμού του ποσοστού συμμετοχής του χειριστή και ο αυτόματος έλεγχος οδήγησαν σε μια νέα γενιά εργαλειομηχανών οι οποίες λειτουργούν βασιζόμενες στον αριθμητικό έλεγχο (Numerical Control), δηλαδή στη δυνατότητα επικοινωνίας και καθοδήγησης της εργαλειομηχανής από το χειριστή μέσω ενός κώδικα. Οι συγκεκριμένες εργαλειομηχανές ονομάζονται ψηφιακά καθοδηγούμενες (NC). Στην περίπτωση που η επικοινωνία και η καθοδήγηση γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, η εργαλειομηχανή ονομάζεται ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή με ηλεκτρονικό υπολογιστή (CNC).

Σήμερα οι ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές είναι ευρέως διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς της παραγωγικής διαδικασίας καθότι έχουν τη δυνατότητα συνεργασίας με συστήματα σχεδίασης (CAD) και συστήματα κατεργασιών (CAM), ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα ένταξής τους σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (CIM) και ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS).



Γραμμή παραγωγής CNC

Σχήμα 2.13: Ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές

Ο κώδικας επικοινωνίας και καθοδήγησης μιας ψηφιακά καθοδηγούμενης εργαλειομηχανής είναι γνωστός με την ονομασία G-code. Κάθε εντολή του συγκεκριμένου κώδικα εκτελεί μια συγκεκριμένη κίνηση-κατεργασία σύμφωνα με τις παραμέτρους που δίνονται στο χειριστήριο της μηχανής. Τον κώδικα της μηχανής τον συμπληρώνουν οι εντολές βοηθητικών λειτουργιών, γνωστές ως M-code.

Ο αριθμητικός έλεγχος (NC) είναι ένας τύπος ελέγχου των μηχανών βασιζόμενος σε ψηφιακές πληροφορίες. Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου είναι κατάλληλες για μικρούς και μεσαίους όγκους παραγωγής, για πολύπλοκες μορφές, διαστάσεις, κατεργασίες και μεθόδους παραγωγής αντικειμένων. Στις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου οι διάφορες πληροφορίες που απαιτούνται για την κατεργασία, η κίνηση της μηχανής, οι συνθήκες κατεργασίας, η πορεία των εργαλείων, η χρήση των ψυκτικών κ.λ.π., παρέχονται υπό τη μορφή αριθμητικών πληροφοριών που αποτυπώνονται στη μνήμη του υπολογιστή. Η κίνηση των εργαλείων ή του αντικειμένου εξαρτάται από ψηφιακά σήματα που οδηγούν το φορέα της μηχανής ή του εργαλείου. Ο αριθμητικός έλεγχος είναι μια τεχνολογία που πρωτοπαρουσιάστηκε πριν από πενήντα περίπου χρόνια όταν ακόμα η τεχνολογία των υπολογιστών βρισκόταν σε νηπιακό στάδιο.

Εκτός από τους τύπους του αριθμητικού ελέγχου καθοριστικό ρόλο έπαιζαν από τα πρώτα βήματα αυτής της τεχνολογίας και ορισμένοι κανονισμοί που κωδικοποιούσαν τις βασικές παραμέτρους της κοπής, οι οποίες προφανώς έπρεπε να ελεγχθούν. Οι κανονισμοί αυτοί ξεκίνησαν να εφαρμόζονται στις ΗΠΑ οι οποίες και σε αυτόν τον τομέα της τεχνολογίας βρίσκονταν στην πρωτοπορία πολλές δεκαετίες πριν.



Σχήμα 2.14: Αρχές λειτουργίας CNC

Οι κανονισμοί αυτοί αφορούν καταρχήν τους άξονες και τις κινήσεις της μηχανής. Αναφορικά με τις κινήσεις της μηχανής, το πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί είχε να κάνει καταρχήν με την επιλογή του άξονα (Χ, Υ ή Ζ) που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κίνηση και κατά δεύτερο λόγο με το ποια φορά θα έπρεπε να χαρακτηρισθεί θετική και ποια αρνητική.

2.5 Φραιζάρισμα (milling)

Η συνήθης κατεργασία κοπής με εργαλείο πολλαπλής σημειακής επαφής είναι το φραιζάρισμα. Ως φραιζάρισμα καλείται η διεργασία κοπής με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου. Το φραιζάρισμα στηρίζεται σε δύο βασικές κινήσεις. Η πρώτη είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, η οποία ονομάζεται και κύρια κίνηση κοπής, και η δεύτερη είναι η ταχύτητα της πρόωσης, δηλαδή η μετατόπιση του κατεργαζόμενου κομματιού.

Τα είδη φραιζαρίσματος μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου. Τα δυο είδη φραιζαρίσματος είναι:

 Το περιφερικό ή περιφερειακό φραιζάρισμα: ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει κυκλική μορφή, αφαιρώντας το απόβλιττο από το τεμάχιο με περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές. Τα προκύπτοντα απόβλιττα έχουν στην περίπτωση αυτή σφηνοειδές σχήμα. Το μετωπικό φραιζάρισμα: ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει, εκτός των περιφερειακών κοπτικών ακμών του και κοπτικές ακμές στο εμπρός πρόσωπό του.

Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζονται τα δύο αυτά είδη φραιζαρίσματος και η κινηματική τους.



Σχήμα 2.15: Κινηματική περιφερικού και μετωπικού φραιζαρίσματος

Στο περιφερικό φραιζάρισμα, η πρόωση του τεμαχίου συνήθως είναι αντίθετη στην περιστροφή του εργαλείου αλλά μπορεί και να συμβαίνει το αντίθετο. Η επιλογή αυτή της κίνησης του τεμαχίου διακρίνει το φραιζάρισμα σε ομόρροπο και αντίρροπο. Στο <u>σχήμα</u> <u>2.16</u>, παρουσιάζεται η κινηματική για τα δύο αυτά είδη φραιζαρίσματος. Από το σχήμα γίνεται φανερό πως στο αντίρροπο φραιζάρισμα, η κοπή ξεκινάει από λεπτότερο απόβλιττο και καταλήγει σε χοντρό απόβλιττο, κάτι που δεν ισχύει στο ομόρροπο φραιζάρισμα /45/. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο να δέχεται ισχυρές καταπονήσεις κατά την είσοδό του στο τεμάχιο και έτσι να αυξάνει ο κίνδυνος θραύσης του. Αντίστοιχα στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο, όπως προκύπτει από την κινηματική, "πιέζει" το τεμάχιο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι η κοπή είναι πιο σταθερή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την κατεύθυνση των δυνάμεων κοπής στα δύο είδη φραιζαρίσματος, όπως φαίνονται στο <u>σχήμα 2.16</u>.



Σχήμα 2.16: Ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα

Η συνισταμένη δύναμη κοπής F στο αντίρροπο φραιζάρισμα έχει φορά προς τα επάνω, προσπαθώντας ουσιαστικά να ανασηκώσει το τεμάχιο. Αντίστοιχα η συνισταμένη δύναμη κοπής που δέχεται το τεμάχιο στο ομόρροπο φραιζάρισμα έχει φορά προς το τραπέζι της εργαλειομηχανής, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τη σταθερότητα της σύνδεσης τεμαχίου – τραπεζίου.

2.5.1 Συνθήκες κατεργασίας κατά το φραιζάρισμα

Οι βασικές συνθήκες κοπής κατά το φραιζάρισμα είναι:

 <u>Ταχύτητα κοπής ν_c</u>: εκφράζει το ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση που είναι η περιστροφή του εργαλείου. Όπως και στην τόρνευση, έτσι και στο φραιζάρισμα τεμαχίου με κοπτικό εργαλείο διαμέτρου D [mm] το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής ν_c σε m/min, ισούται:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \tag{2.57}$$

- <u>Πρόωση</u>: είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο και ονομάζεται ταχύτητα πρόωσης. Συνήθως η κίνηση της πρόωσης είναι στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι εκφράζεται συχνά ως η ταχύτητα κίνησής του. Η επιλογή της ταχύτητας πρόωσης (ή απλούστερα πρόωση) εξαρτάται από το κοπτικό εργαλείο, το κατεργαζόμενο υλικό, το βάθος κοπής και την επιδιωκόμενη ποιότητα επιφάνειας. Η πρόωση στο φραιζάρισμα δίνεται με δύο μορφές:
 - Πρόωση ανά λεπτό f_{min}: είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο σε ένα λεπτό.
 - Πρόωση ανά δόντι f_z: είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο, στο χρονικό διάστημα από την εισχώρηση ενός δοντιού (μίας κόψης) της φραίζας, μέχρι την εισχώρηση του επόμενου.

Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές προώσεις προκύπτει ως εξής: έστω κοπτική φραίζα με z κοπτικές ακμές (ή δόντια), η οποία περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό και τραπέζι της μετατοπίζεται με πρόωση ανά λεπτό f_{min}. Τότε, το τραπέζι της φραίζας προχωρά με f_{min} χιλιοστά το λεπτό. Επειδή σε ένα λεπτό η φραίζα κάνει n στροφές και σε κάθε στροφή συμμετέχουν στην κοπή z δόντια, προκύπτει μετατόπιση ανά δόντι $f_z \cdot z \cdot n$. Άρα ο τύπος που συνδέει τις δύο προώσεις είναι:

$$f_{\min} = f_z \cdot z \cdot n \tag{2.58}$$

 Το βάθος (ή πλάτος) κοπής t, δηλαδή το μήκος της εισόδου της κύριας κόψης του εργαλείου στο κατεργασμένο τεμάχιο. Στο περιφερικό φραιζάρισμα αντιστοιχεί στο πλάτος κοπής ενώ στο μετωπικό στο αξονικό βάθος κοπής.

Αντίθετα προς τις άλλες συμβατικές κατεργασίες κοπής, στο φραιζάρισμα, το απόβλιττο έχει διατομή μεταβαλλόμενου πάχους, που είναι συνέπεια της επαλληλίας της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και της πρόωσης του τεμαχίου. Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού του αποβλίττου, το περιφερειακό φραιζάρισμα διακρίνεται σε αντίρροπο και ομόρροπο. Είναι προφανές ότι στο αντίρροπο φραιζάρισμα το πάχος της διατομής του αποβλίττου μεταβάλλεται από μηδενική σε μια μέγιστη τιμή, ενώ στο ομόρροπο φραιζάρισμα από τη μέγιστη τιμή του στη μηδενική.

2.5.2 Φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (Ball-end milling)

Μια ευρέως διαδεδομένη κατεργασία για τη μορφοποίηση της τελικής επιφάνειας είναι η διαδικασία του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (Ball-end milling), όπως αυτό του <u>σχήματος 2.17</u>. Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και οι διαδρομές του εργαλείου είναι βασικοί παράγοντες της τοπομορφίας της κατεργασμένης επιφάνειας και της τραχύτητας. Μελέτες έχουν εστιάσει στην επίδραση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου πάνω στην τραχύτητα της τελικής επιφάνειας /46, 47/. Η δημιουργία των διαδρομών του κοπτικού /48/, στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, η κλίση του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και την κατεύθυνση της πρόωσης επηρεάζουν την επιφάνεια του τελικού προϊόντος /49/. Η στρατηγική φραιζαρίσματος απορρέει από τις σχετικές θέσεις του κοπτικού και του τεμαχίου κατεργασίας. Μοντέλα που μπορούν να καθορίσουν την τοπομορφία μιας επιφάνειας που έχει παραχθεί από φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης έχουν ήδη αναπτυχθεί /50/.



Σχήμα 2.17: Εργαλεία σφαιρικής απόληξης

Στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, η ταχύτητα κοπής ποικίλει ανάλογα με το σημείο επαφής της κοπτικής ακμής σε σχέση με το τεμάχιο. Η ρύθμιση των κλίσεων του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου μπορούν να βελτιώσουν την επίδοση του κοπτικού και την τραχύτητα της επιφάνειας /51/. Η τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου διαφοροποιείται ανάλογα με τις κλίσεις μεταξύ τεμαχίου και κοπτικού και την κατεύθυνση της πρόωσης. Παρατηρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης δημιουργήθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο τραχύτητας της επιφάνειας /52/ ενώ έχει εκπονηθεί εφαρμογή βασισμένη σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την κατεργασία αυτή /53/.
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Κάθε κατεργασία κοπής αποτελεί ένα διαφορετικό πείραμα και κάθε πείραμα μια διαφορετική περίπτωση. Τα πειράματα εκπονήθηκαν με βάση τον παραγοντικό σχεδιασμό. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές αξονικού βάθους κοπής (t_z), δύο τιμές ακτινικού βάθους κοπής (t_z), δύο τιμές ακτινικού βάθους κοπής (t_z), δύο τιμές ανά δόντι (f_z), τρεις τιμές γωνίας κλίσης παράλληλα στην πρόωση (φ) και δύο τιμές γωνίας κλίσης κάθετα στην πρόωση (ω). Η διαφορά των δύο γωνιών κλίσης φαίνεται στο <u>σχήμα 3.1</u>. Σύμφωνα με αυτό οι διαφορετικοί συνδυασμοί που προκύπτουν είναι 96 καθότι εξετάζεται η περίπτωση, τόσο του ομόρροπου, όσο και του αντίρροπου φραιζαρίσματος. Στο <u>σχήμα 3.2</u> και στο <u>σχήμα 3.3</u> παρουσιάζονται τα τεμάχια των πειραμάτων αντίρροπου και ομόρροπου,



Σχήμα 3.1: Γωνίες κλίσης φ και ω.

Αριθμός πειραμάτων = $(t_z \cdot t_{xy} \cdot f_z \cdot \varphi \cdot \omega) = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 = 48$

Στον <u>πίνακα 3.1</u> που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των παραγόντων κοπής που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο πείραμα.

t _z (mm)	t _{xy} (mm)	f _z (mm/στροφή,δόντι)	φ (°)	ω (°)
0,3	0,3	0,2	-5	0
0,6	0,6	0,6	0	5
			5	

Πίνακας 3.1: Τιμές παραγόντων κοπής

Σημαντικοί παράγοντες της κατεργασίας είναι η επιλογή του κατεργαζόμενου υλικού, η εργαλειομηχανή που εκτελεί την κατεργασία και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται. Οι διάφοροι συνδυασμοί των τριών τελευταίων παραγόντων (fz, φ και ω) παράγουν τις στρατηγικές φραιζαρίσματος που εξαρτώνται από τη φορά του κοπτικού και τις κλίσεις του κοπτικού εργαλείου



Σχήμα 3.2: Πειράματα αντίρροπου φραιζαρίσματος



Σχήμα 3.3: Πειράματα ομόρροπου φραιζαρίσματος

3.2 Υλικό κατεργασίας

Το υλικό που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι το Al7075-T6. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή δομικών εξαρτημάτων κυρίως στην αεροναυπηγικές εφαρμογές. Η αεροναυπηγική βιομηχανία απαιτεί υλικά που έχουν υψηλή αντοχή και εύκολη, όσο είναι δυνατόν, κατεργασιμότητα. Το ντουραλουμίνιο Al7075 θερμικής κατεργασίας T6 συνδυάζει υψηλή αντοχή, μέση σκληρότητα και αντίσταση στη διάβρωση και για αυτό το λόγο προτιμάται στη βιομηχανία κατασκευής δομικών εξαρτημάτων.

Το Al7075 είναι ένα κράμα αλουμινίου με πρωταρχικό στοιχείο κράματος τον ψευδάργυρο. Είναι σκληρό υλικό με αντοχή αντίστοιχη αυτής των χαλύβων, με καλή αντοχή σε κόπωση και μέση κατεργασιμότητα αλλά μικρότερη αντίσταση στη διάβρωση από αυτήν που έχουν άλλα κράματα αλουμινίου. Το υψηλό κόστος του περιορίζει τη χρήση του μόνο σε εφαρμογές όπου φθηνότερα κράματα δεν είναι κατάλληλα.

Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του ΑΙ7075-Τ6 παρουσιάζονται στον ακόλουθο <u>πίνακα 3.2</u>.

	Πάχος in. (mm)	, 8	Αντοχή σε εφελκυσμό ksi (MPa)	Ő	οιο διαρρα ksi (MPa)	ρής Επι	μήκυνση %		
ΑΙ7075-Τ6 φύλλο	0.008-0.24 (0.203-6.32	.9 2)	74-78 (510-538)		63-69 (434-476)		5-8		
Χημική Σύσταση (wt.%)									
Si=0.40	Fe=0,50	Cu=1.2- 2.0	Mn=0.30	Mg=2.1- 2.9	Zn=5.1- 6.1	Cr=0.18- 0.28	Ti=0.20		

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες ΑΙ7075-Τ6

3.3 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο κέντρο κατεργασίας της Deckel Maho DMU 50 eco, το οποίο καθοδηγείται με ψηφιακή καθοδήγηση Siemens 810D. Στην κοπή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου D20 και σταθερή ταχύτητα κοπής 60m/min. Ως κοπτικά εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν ένθετα πλακίδια με επικάλυψη καρβιδίων (ACZ350).

Το κέντρο κατεργασίας γενικής χρήσης CNC DMU 50 eco, <u>σχήμα 3.4</u>, είναι εξοπλισμένο με ισχυρή άτρακτο για στροφές μέχρι 8.000 rpm και χαρακτηριστικά: 83 Nm (40% ED), ισχύς ατράκτου 13 kW (40% ED) και 12 m/min γρήγορη μετακίνηση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι του καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύ σύνθετων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°. Ο εργαλειοφορέας με 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διαφόρων εργασιών φραιζαρίσματος. Η κατασκευή είναι με χυτοσίδηρο σκελετό για μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών. Τέλος το εργονομικό DMG SLIM*line*® Panel με οθόνη TFT 15″, SIEMENS 810D powerline και λογισμικό ShopMill καθιστούν δυνατό τον απλό προγραμματισμό αλλά και την τρισδιάστατη προσομοίωση.



Σχήμα 3.4: Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco

3.4 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης

Τα εργαλεία σφαιρικής απόληξης (ball-end mills) είναι ιδανικά για μηχανουργικές κατεργασίες αποπεράτωσης σε τρεις κατευθύνσεις, όπως καλούπια και μήτρες. Χρησιμοποιούνται επίσης σε επιφάνειες που είναι κάθετες μεταξύ τους, για να δημιουργηθεί κοίλη επιφάνεια έτσι ώστε να μειωθούν συγκεντρωμένες τάσεις. Παράδειγμα εργαλείου σφαιρικής απόληξης παρουσιάζεται στο <u>σχήμα 3.5</u>.

Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι συμπαγώς κατασκευασμένα ή διαιρετά χρησιμοποιώντας ένθετα πλακίδια σφαιρικής μορφής. Τα σφαιρικής απόληξης κοπτικά εργαλεία είναι κατάλληλα για την κατεργασία πολλών ειδών υλικών, από πλαστικό μέχρι και κράματα χάλυβα και τιτανίου. Η σκληρότητα και η αντοχή της αιχμής του εργαλείου είναι πολύ υψηλή λόγω της στρογγυλεμένης σχεδίασης του άκρου.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του τρόπου σχεδίασης ενός κοπτικού με σφαιρική απόληξη, είναι ότι μπορεί να υποστεί πολύ ψηλές τιμές πρόωσης, που σημαίνει ότι μπορεί να κατεργαστεί το υλικό πολύ γρήγορα. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη παραγωγικότητα και ευρεία χρήση στις σημερινές απαιτητικές εφαρμογές. Επίσης, η καλή γεωμετρία της κοπτικής ακμής μεταφράζεται σε χαμηλότερες δυνάμεις, γεγονός το οποίο δίνει στο κοπτικό εργαλείο πρόσθετη αντοχή κάτω από συνθήκες πίεσης. Καθώς είναι λιγότερο πιθανό να σπάσει υπό κανονικές δυνάμεις, το κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης είναι πολύ αποδοτικό από πλευράς κόστους για τις εφαρμογές τις οποίες είναι κατάλληλο.

Τα κοπτικά εργαλεία σφαιρικής απόληξης σχεδόν πάντα είναι κατασκευασμένα από καρβίδιο βολφραμίου, που είναι κράμα υψηλής αντοχής. Συνήθως τα εργαλεία αυτά παράγονται με μια προστατευτική επικάλυψη που περιέχει τιτάνιο αναμιγμένο με άλλα στοιχεία, όπως τον άνθρακα και το αλουμίνιο. Οι επιστρώσεις αυτές εφαρμόζονται για να μειωθεί η φθορά ενώ μπορεί να προσφέρουν υψηλή σκληρότητα στην επιφανειακή στοιβάδα. Για παράδειγμα, το επίχρυσο χρώμα αποτελεί επικάλυψη νιτρικού τιτανίου και βοηθά στο να αποφευχθεί συγκόλληση μικρών κομματιών από το κατεργασμένο υλικό στη φραίζα, υπό υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή ενισχύει την αποφυγή της ψευδόκοψης.



Σχήμα 3.5: Εργαλείο σφαιρικής απόληξης

Στον προγραμματισμό μιας εργαλειομηχανής με ψηφιακή καθοδήγηση (CNC) σημαντικό ρόλο έχουν οι στροφές του κοπτικού εργαλείου (n σε rpm), η ταχύτητα της πρόωσης (f σε mm/min) και η προγραμματιζόμενη θέση του κοπτικού εργαλείου στον άξονα της ατράκτου. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται προσοχή στον υπολογισμό αυτών των τιμών.

Σε κάθε κατεργασία κοπής είναι επιθυμητή σταθερή ταχύτητα κοπής v_c (σε m/min) η οποία εξαρτάται κυρίως από το κατεργαζόμενο υλικό. Η ταχύτητα κοπής είναι συνήθως γνωστή από πίνακες υλικών και έτσι το σημαντικό μέγεθος που υπολογίζεται από τον τύπο υπολογισμού της ταχύτητας κοπής είναι οι στροφές της ατράκτου n σε rpm.

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \tag{3.1}$$

Με βάση τις στροφές της ατράκτου υπολογίζεται και η ταχύτητα πρόωσης από τη σχέση:

$$f = f_z \cdot z \cdot n \tag{3.2}$$

όπου f_z είναι η πρόωση ανά δόντι και z ο αριθμός των δοντιών του κοπτικού που λαμβάνουν μέρος κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού.

Στον τύπο της ταχύτητας κοπής, ως D συμβολίζεται η διάμετρος του κοπτικού σε mm. Για εργαλείο σφαιρικής απόληξης ως διάμετρος λαμβάνεται η ενεργή διάμετρος D_m και ο τύπος γράφεται ως εξής:

$$v_c = \pi \cdot D_m \cdot n / 1000 \tag{3.3}$$

Η ενεργή διάμετρος υπολογίζεται με βάση το τόξο επαφής του εργαλείου στο τεμάχιο κατεργασίας και προφανώς διαφέρει στην περίπτωση που το εργαλείο βρίσκεται σε κάθετη θέση πάνω από το τεμάχιο ή σε κάποια άλλη κεκλιμένη θέση πλάγιας γωνίας.

Ο υπολογισμός της ενεργής διαμέτρου στην περίπτωση του κάθετου φραιζαρίσματος φαίνεται στο <u>σχήμα 3.6</u>.



Σχήμα 3.6: Υπολογισμός ενεργής διαμέτρου στο κάθετο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 3.7</u> παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ενεργής διαμέτρου στη γενική περίπτωση όπου υπάρχει κλίση φ σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το κάθετο φραιζάρισμα αποτελεί ειδική περίπτωση όπου φ = 0.



Σχήμα 3.7: Υπολογισμός ενεργής διαμέτρου σε φραιζάρισμα με κλίση φ

Η θέση του κοπτικού εργαλείου που προγραμματίζεται στην εργαλειομηχανή εξαρτάται από την κλίση του κοπτικού ή του τεμαχίου, ανάλογα με το αν κινείται το κοπτικό ή η τράπεζα. Ο υπολογισμός του άκρου του κοπτικού εργαλείου κατά την z διεύθυνση παρουσιάζεται στο <u>σχήμα 3.8</u>.



Σχήμα 3.8: Υπολογισμός προγραμματίσιμου σημείου στον άξονα z

Ένα φύλλο εργασίας του excel δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων παραμέτρων των πειραμάτων. Το φύλλο υπολογισμού φαίνεται στο <u>σχήμα</u> <u>3.9</u>.



Σχήμα 3.9: Πίνακας υπολογισμού παραμέτρων

Στα παρακάτω <u>σχήματα 3.10 και 3.11</u> παρουσιάζονται στιγμιότυπα από χαρακτηριστικές θέσεις κατεργασίας του δοκιμίου πειραμάτων.



Σχήμα 3.10: Στιγμιότυπα πλάγιας τοποθέτησης εργαλείου



Σχήμα 3.11: Στιγμιότυπα κατεργασίας με διάφορες στρατηγικές

3.5 Δυναμόμετρο Kistler

Για την μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμόμετρο Kistler τύπου 9257BA, <u>σχήμα 3.12</u>, με δυνατότητα μέτρησης τριών συνιστωσών δυνάμεων. Το σήμα επεξεργαζόταν από μία μονάδα ελέγχου τύπου 5233A, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονταν απ' ευθείας στην οθόνη ενός Η/Υ, ώστε να εντοπίζονται αμέσως τυχόν λάθη κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.



Σχήμα 3.12: Δυναμόμετρο Kistler

Το δυναμόμετρο επέτρεπε την μέτρηση δυνάμεων σε διαφορετικές εμβέλειες:

- Fx, Fy: ±0.5KN, Fz: ±1KN,
- Fx, Fy: ±1KN, Fz: ±2KN,

• Fx, Fy: ±2KN, Fz: ±5KN,

Η μονάδα ελέγχου επέτρεπε την επιλογή της εμβέλειας της μετρούμενης κάθε φορά δύναμης. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων επιλέχθηκαν οι τιμές 0.5KN και 1KN για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής. Το δυναμόμετρο σταθεροποιήθηκε πάνω στην τράπεζα του κέντρου κατεργασίας με τέσσερα σημεία στήριξης και στη συνέχεια πάνω του στερεώθηκε καλά το δοκίμιο (πλάκα) από Al7075-T6 που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά βήματα χρήσης του λογισμικού Dynoware. Το Dynoware είναι ένα γενικής χρήσης πακέτο λογισμικού για την απόκτηση και τη απεικόνιση δεδομένων, κατάλληλο για τη μέτρηση δυνάμεων κοπής και γενικών εφαρμογών δυναμομέτρησης.

Μέσω του μενού **File** γίνεται η αποθήκευση των πειραμάτων, η εκτύπωση, η αποθήκευση, εξαγωγή και η διαχείριση των δεδομένων καθώς και η έξοδος από το πρόγραμμα.

Στο μενού Acquisition ρυθμίζονται τα χαρακτηριστικά του υλικού και οι γενικές παράμετροι κάθε δοκιμής. Επιλέγοντας Acquisition \rightarrow Hardware εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου Hardware Dialog Box, <u>σχήμα 3.13</u>, απ΄ όπου γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις. Επιλέγοντας Acquisition \rightarrow Setup δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τις κατάλληλες παραμέτρους, <u>σχήμα 3.14</u>. Με το Acquisition \rightarrow Start ξεκινά η διαδικασία απόκτησης δεδομένων.

Chan.	Label	Measuring Range [M.U.]	Unit	Scale [MU/V]	Sensitivity [pC/M.U.]	Filter		Time Constant
1	Ch1	10.00	N	1.00	1.000	OFF	-	Long 🔻
2	Ch2	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔻
3	Ch3	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔻
4	Ch4	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔻
5	Ch5	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔽
6	Ch6	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔻
7	Ch7	10.00	N	1.00	1.000	OFF	•	Long 🔽
8	Ch8	10.00	N	1.00	1.000	OFF	-	Long 🔻
R <u>e</u> set/Oj	perate by RS-232 int	erface	[Operate	<u>R</u> eset		<u>S</u> er	nd Parameter

Σχήμα 3.13: Hardware Configuration Dialog

edit Acquisition Parameter Channels & Trigger Data Manipulation OnLine	×
Measuring Parameters Measuring Time : Seconds Sample Rate : 1000 Hz Cycles : Triager Delay Time : O Seconds	Information Number of Channels : 12 Samples / Channel : 1000 RAM Space / Cycle : 45.8 KByte
Save: C NO Display: C OFF	Save File : messdat4.dwd Directory : [C:\Program files\Dynoware\Data\ Save configuration
	<u> </u>

Σχήμα 3.14: Acquisition Edit

Το μενού **View** επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει τις γραφικές προτιμήσεις και να επεξεργαστεί την τεκμηρίωση των πειραμάτων. Επιλέγοντας **View** → **Setup** γίνεται η διαμόρφωση των γραφημάτων ενώ το παράθυρο ανοίγει όταν ένα αρχείο είναι ανοικτό ή κατά την εξαγωγή του πειράματος. Επιλέγοντας **View** → **Edit**, <u>σχήμα 3.15</u>, μπορεί να αλλάξει το περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου γραφήματος.

Επίσης, κάνοντας διπλό κλικ πάνω σε ένα χαρακτηριστικό του γραφήματος (τίτλος, υπόμνημα, τίτλος άξονα) δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας για το χρήστη. Η προβολή μπορεί να αλλάξει ανά πάσα στιγμή χωρίς να αλλάζουν τα δεδομένα. Ο χρήστης μπορεί επίσης να μεγεθύνει την εμφανιζόμενη περιοχή, ενεργοποιώντας/απενεργοποιώντας τις γραμμές του πλέγματος, και να επεξεργάζεται όλες τις πληροφορίες των αποτελεσμάτων από το μενού View.

۷	iew Edit						×
	File 5a-fraesen_aussen_2.dwd	Cycle 1		Chan. Fz Mz	Color vs. Y2	y y = 258N x = 127mm t = 3.56s Numerical	N-Y
		Unselec	t <u>A</u> ll	<u>S</u> elect All	Select C <u>o</u> lor	Г	⊻iew dependence

Σχήμα 3.15: View Edit

Το μενού **Analysis** δίνει τη δυνατότητα για φιλτράρισμα των δεδομένων και απάλειψη των παρεμβαλλομένων σημάτων. Το μενού **Tools** παρέχει τη δυνατότητα για την εμφάνιση των δεδομένων της τάσης σε πραγματικό χρόνο με δύο τρόπους: Παλμογράφο και Βολτόμετρο. Αυτά τα εργαλεία έχουν σχεδιαστεί για την απλή αντιμετώπιση των προβλημάτων του συστήματος. Ένα άλλο μενού που εμφανίζεται όταν απεικονίζεται ένα γράφημα είναι το **Window** μενού. Το μενού Window χρησιμοποιεί πρότυπα-εντολές της Microsoft Windows για την διαχείριση ενεργών παραθύρων.

Στα σχήματα 3.16 και 3.17 φαίνονται τα αποτελέσματα της δυναμομέτρησης για συγκεκριμένο πείραμα – αντίρροπο ελκτικό φραιζάρισμα - που επιτεύχθηκε στο εργαστήριο καθώς και η περεταίρω επεξεργασία που εφαρμόζεται για ανάλυση των δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 3.16: Δυναμομέτρηση

UP - 0.6 - 0.6 - 0.2 - 11 Page 1 of 1 Printed on 10. July 2011 at 14:06



Σχήμα 3.17: Επεξεργασία δυναμομέτρησης και ανάλυση δυνάμεων

4. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής έχει αποδειχθεί ότι είναι: η κλίση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και η στρατηγική φραιζαρίσματος /54/. Η στρατηγική που χρησιμοποιείται απορρέει τόσο από τη σχετική θέση του κοπτικού και του τεμαχίου κατεργασίας, όσο και από την κινηματική του κοπτικού εργαλείου κατά τη διεργασία.

Στο παρακάτω <u>σχήμα 4.1</u>, παρουσιάζονται οι παραλλαγές των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.1: Παραλλαγές πειραματικών δεδομένων

Ανάλογα με την κλίση του κοπτικού εργαλείου το περιφερικό φραιζάρισμα χωρίζεται στις ακόλουθες έξι κατηγορίες

- Κάθετο φραιζάρισμα
- Διατρητικό φραιζάρισμα
- Ελκτικό φραιζάρισμα
- Πλάγιο φραιζάρισμα
- Πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα
- Πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυναμομετρήσεων για τις έξι αυτές παραλλαγές φραιζαρίσματος.

4.2 Κάθετο φραιζάρισμα

Στο κάθετο φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι κάθετος πάνω στο τεμάχιο κατεργασίας, δηλαδή οι κλίσεις φ και ω ισούνται με το μηδέν.



Σχήμα 4.2: Αντίρροπο και ομόρροπο κάθετο φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του κάθετου φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον ακόλουθο <u>πίνακα 4.1</u>.

	ΚΑΘΕΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ									
			ANTI	РОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
5	0,6	0,3	-0,2	0	0	61,04	11,47	98,15		
6	0,3	0,3	-0,2	0	0	31,74	6,84	54,20		
7	0,6	0,6	-0,2	0	0	86,91	28,08	131,84		
8	0,3	0,6	-0,2	0	0	45,65	19,04	77,15		
17	0,6	0,3	-0,6	0	0	107,91	15,14	161,14		
18	0,3	0,3	-0,6	0	0	49,56	11,72	82,52		
19	0,6	0,6	-0,6	0	0	168,21	53,96	213,38		
20	0,3	0,6	-0,6	0	0	75,20	30,76	113,28		
			OMO	РРОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
53	0,6	0,3	0,2	0	0	63,72	-46,87	133,79		
54	0,3	0,3	0,2	0	0	33,45	-20,02	70,31		
55	0,6	0,6	0,2	0	0	82,76	-78,12	166,02		
56	0,3	0,6	0,2	0	0	43,21	-39,06	93,26		
65	0,6	0,3	0,6	0	0	109,86	-56,40	158,69		
66	0,3	0,3	0,6	0	0	46,39	-22,71	79,10		
67	0,6	0,6	0,6	0	0	163,09	-111,08	227,54		
68	0,3	0,6	0,6	0	0	55,42	-42,72	98,63		

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις δυνάμεων στο κάθετο φραιζάρισμα

4.3 Διατρητικό φραιζάρισμα

Στο διατρητικό φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου έχει κλίση φ κατά τη φορά της πρόωσης ενώ η κλίση ω ισούται με το μηδέν.



Σχήμα 4.3: Αντίρροπο και ομόρροπο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του διατρητικού φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον <u>πίνακα 4.2</u> που ακολουθεί.

	ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ									
			ANTI	РОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή.δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
1	0,6	0,3	-0,2	5	0	111,82	-47,85	162,11		
2	0,3	0,3	-0,2	5	0	68,36	-29,3	99,61		
3	0,6	0,6	-0,2	5	0	160,4	-51,51	202,15		
4	0,3	0,6	-0,2	5	0	98,39	-35,4	128,9		
13	0,6	0,3	-0,6	5	0	168,95	-64,7	184,08		
14	0,3	0,3	-0,6	5	0	97,17	-43,46	112,79		
15	0,6	0,6	-0,6	5	0	272,95	-77,39	256,84		
16	0,3	0,6	-0,6	5	0	156,74	-55,66	160,16		
			OMO	РРОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
57	0,6	0,3	0,2	5	0	78,37	-20,02	156,74		
58	0,3	0,3	0,2	5	0	48,83	16,85	99,61		
59	0,6	0,6	0,2	5	0	113,77	-46,16	212,4		
60	0,3	0,6	0,2	5	0	70,56	31,74	138,67		
69	0,6	0,3	0,6	5	0	124,27	36,62	188,48		
70	0,3	0,3	0,6	5	0	78,61	33,94	123,05		
71	0,6	0,6	0,6	5	0	214,11	-126,22	286,13		
72	0,3	0,6	0,6	5	0	130,13	62,01	183,59		

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις δυνάμεων στο διατρητικό φραιζάρισμα

4.4 Ελκτικό φραιζάρισμα

Στο ελκτικό φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου έχει κλίση φ αντίθετη στη φορά της πρόωσης ενώ η κλίση ω ισούται με το μηδέν.



Σχήμα 4.4 : Αντίρροπο και ομόρροπο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του ελκτικού φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον ακόλουθο <u>πίνακα 4.3</u>.

	ΕΛΚΤΙΚΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ									
			ANTI	РОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
9	0,6	0,3	-0,2	-5	0	53,71	26,86	107,91		
10	0,3	0,3	-0,2	-5	0	35,89	23,93	72,75		
11	0,6	0,6	-0,2	-5	0	83,98	52	146,97		
12	0,3	0,6	-0,2	-5	0	49,07	41,02	101,07		
21	0,6	0,3	-0,6	-5	0	107,91	55,18	172,2		
22	0,3	0,3	-0,6	-5	0	69,82	48,1	129,39		
23	0,6	0,6	-0,6	-5	0	163,33	107,42	250,49		
24	0,3	0,6	-0,6	-5	0	98,39	88,38	179,2		
			OMO	РРОП	0					
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]		
49	0,6	0,3	0,2	-5	0	73,97	-94,73	176,76		
50	0,3	0,3	0,2	-5	0	42,24	-56,4	109,37		
51	0,6	0,6	0,2	-5	0	85,69	-132,32	214,36		
52	0,3	0,6	0,2	-5	0	49,8	-83,98	143,55		
61	0,6	0,3	0,6	-5	0	141,36	-145,26	228,03		
62	0,3	0,3	0,6	-5	0	79,59	-88,62	148,93		
63	0,6	0,6	0,6	-5	0	172,12	-221,19	282,23		
64	0,3	0,6	0,6	-5	0	95,21	-133,54	185,55		

Πίνακας 4.3: Μετρήσεις δυνάμεων στο ελκτικό φραιζάρισμα

4.5 Πλάγιο φραιζάρισμα

Στο πλάγιο φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου έχει κλίση ω κάθετη στη φορά της πρόωσης, ενώ η κλίση φ ισούται με μηδέν.



Σχήμα 4.5: Αντίρροπο και ομόρροπο πλάγιο φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του πλάγιου φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον ακόλουθο <u>πίνακα 4.4</u>.

			ΠΛΑΓΙΟ ΦΙ	PAIZA	ΡΙΣΜΑ	A		
			ANTI	РОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
29	0,6	0,3	-0,2	0	5	76,9	16,36	104,61
30	0,3	0,3	-0,2	0	5	37,84	20,75	61,04
31	0,6	0,6	-0,2	0	5	100,59	42,48	142,58
32	0,3	0,6	-0,2	0	5	47,85	35,16	82,52
41	0,6	0,3	-0,6	0	5	136,47	37,6	161,62
42	0,3	0,3	-0,6	0	5	68,12	35,16	91,8
43	0,6	0,6	-0,6	0	5	188,72	85,94	221,19
44	0,3	0,6	-0,6	0	5	91,06	66,41	130,86
			OMO	РРОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
77	0,6	0,3	0,2	0	5	68,12	-66,65	114,75
78	0,3	0,3	0,2	0	5	31,25	-33,45	63,48
79	0,6	0,6	0,2	0	5	77,88	-97,66	137,21
80	0,3	0,6	0,2	0	5	34,91	-55,18	74,22
89	0,6	0,3	0,6	0	5	141,36	-89,11	176,76
90	0,3	0,3	0,6	0	5	67,14	-49,07	88,38
91	0,6	0,6	0,6	0	5	180,42	-176,76	219,73
92	0,3	0,6	0,6	0	5	81,54	-101,56	113,77

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις δυνάμεων στο πλάγιο φραιζάρισμα

4.6 Πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου έχει κλίση φ κατά τη φορά της πρόωσης καθώς και κλίση ω κάθετη στη φορά της πρόωσης.



Σχήμα 4.6 : Αντίρροπο και ομόρροπο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον <u>πίνακα 4.5</u> που ακολουθεί.

			ΠΛΑΓΙΟ ΔΙΑΤΡΗΤ	IKO 4	PAIZA	ΑΡΙΣΜΑ		
			ANTI	РОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
25	0,6	0,3	-0,2	5	5	115,97	-54,44	146,48
26	0,3	0,3	-0,2	5	5	65,43	-37,6	73,24
27	0,6	0,6	-0,2	5	5	148,93	-59,81	178,22
28	0,3	0,6	-0,2	5	5	77,88	-48,83	106,45
37	0,6	0,3	-0,6	5	5	176,03	-78,86	169,43
38	0,3	0,3	-0,6	5	5	89,36	-59,81	101,07
39	0,6	0,6	-0,6	5	5	251,71	-109,13	224,12
40	0,3	0,6	-0,6	5	5	126,46	-99,85	129,39
			OMO	РРОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
81	0,6	0,3	0,2	5	5	65,43	-26,86	126,46
82	0,3	0,3	0,2	5	5	36,38	25,63	73,73
83	0,6	0,6	0,2	5	5	94,97	-53,71	162,6
84	0,3	0,6	0,2	5	5	48,34	46,87	96,19
93	0,6	0,3	0,6	5	5	125	52,73	184,57
94	0,3	0,3	0,6	5	5	64,7	49,56	117,19
95	0,6	0,6	0,6	5	5	203,86	101,81	265,14
96	0,3	0,6	0,6	5	5	44,43	-19,53	74,71

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις δυνάμεων στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

4.7 Πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου έχει κλίση φ αντίθετη στη φορά της πρόωσης καθώς και κλίση ω κάθετη στη φορά της πρόωσης.



Σχήμα 4.7: Αντίρροπο και ομόρροπο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Fx, Fy και Fz, στην περίπτωση του πλάγιου ελκτικού φραιζαρίσματος, παρουσιάζονται στον ακόλουθο <u>πίνακα 4.6</u>.

			ΠΛΑΓΙΟ ΕΛΚΤΙΚ	(Ο ΦF	PAIZAF	ΝΣΜΑ		
			ANTI	РОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
33	0,6	0,3	-0,2	-5	5	51,27	35,16	112,79
34	0,3	0,3	-0,2	-5	5	30,52	30,27	77,64
35	0,6	0,6	-0,2	-5	5	78,86	60,79	159,18
36	0,3	0,6	-0,2	-5	5	40,77	50,78	106,45
45	0,6	0,3	-0,6	-5	5	101,07	64,45	162,11
46	0,3	0,3	-0,6	-5	5	54,44	57,13	111,33
47	0,6	0,6	-0,6	-5	5	144,29	120,12	239,26
48	0,3	0,6	-0,6	-5	5	72,27	98,63	161,13
			OMO	РОП	0			
α/α	t _z [mm]	t _{xy} [mm]	f _z [mm/στροφή,δόντι]	φ [°]	ω [°]	Fx [Nt]	Fy [Nt]	Fz [Nt]
73	0,6	0,3	0,2	-5	5	59,08	-94,73	138,67
74	0,3	0,3	0,2	-5	5	25,39	-53,22	71,78
75	0,6	0,6	0,2	-5	5	66,89	-133,54	166,99
76	0,3	0,6	0,2	-5	5	27,83	-77,15	97,66
85	0,6	0,3	0,6	-5	5	108,94	-153,08	164,55
86	0,3	0,3	0,6	-5	5	53,96	-93,26	103,52
87	0,6	0,6	0,6	-5	5	134,52	-229,98	220,21
88	0,3	0,6	0,6	-5	5	59,57	-138,18	135,74

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις δυνάμεων στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

5.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής είναι η μεθοδολογία απόκρισης επιφάνειας (Response Surface Methodology). Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί την ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis) και την ανάλυση διασποράς (Analysis of Variance, ANOVA) για τη δημιουργία μιας εξίσωσης βάσει των παραγόντων που χρησιμοποιούνται.

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, πολλά στατιστικά λογισμικά πακέτα έχουν δημιουργηθεί κάνοντας τις παραπάνω μεθόδους εύκολες στη χρήση τους και με άμεσα αποτελέσματα. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιείται το λογισμικό Minitab 15 Statistical Software.

5.1.1 Ανάλυση παλινδρόμησης

Ανάλογα με την περίπτωση, η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Πρόβλεψη της τιμής της απόκρισης.
- Σύνοψη μεγάλου αριθμού δεδομένων για την εύρεση καμπυλών.
- Επιλογή ενός μαθηματικού προτύπου που να εξηγεί το σύστημα. Η προσέγγιση αυτή του συστήματος θα εκφράζει το θεωρητικό νόμο που προκύπτει από τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά πρότυπα παλινδρόμησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα την περίπτωση. Μια σχετικά απλή μορφή που χρησιμοποιείται στην ανάλυση παλινδρόμησης είναι αυτή του γραμμικού προτύπου:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$
(5.1)

Ένα άλλο πρότυπο είναι αυτό της αλληλεπίδρασης όπου παρουσιάζονται γινόμενα μεταξύ των παραγόντων, δηλαδή αλληλεπιδράσεις:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{ii} X_i X_i + \varepsilon$$
(5.2)

Ακόμη ένα πρότυπο είναι αυτό της δεύτερης τάξης, όπου οι παράγοντες επιδρούν, τόσο προσθετικά όπως στο γραμμικό, τόσο πολλαπλασιαστικά όπως της αλληλεπίδρασης, όσο και τετραγωνικά:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{ii} X_i X_i + \beta_{11} X_1^2 + \varepsilon$$
 (5.3)

Στο πρότυπο αυτό οι παράγοντες επιδρούν στην απόκριση προσθετικά, πολλαπλασιαστικά και τετραγωνικά.

Η επιλογή του προτύπου παλινδρόμησης γίνεται με βάση τον επιδιωκόμενο σκοπό της ανάλυσης, τις απαιτήσεις του αναλυτή καθώς και την εμπειρία του.

5.1.2 Ανάλυση διασποράς

Μια καμπύλη προσαρμογής προσεγγίζει τέλεια τα δεδομένα μόνο στην περίπτωση που αυτά τα σημεία βρίσκονται εξαρχής πάνω της. Σε κάθε άλλη περίπτωση η καλύτερη δυνατή προσαρμογή των δεδομένων γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Mean Square). Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται μια καμπύλη τέτοια ώστε τα δεδομένα της απόκρισης Yi να έχουν το μικρότερο δυνατό άθροισμα τετραγωνικών αποκλίσεων από αυτήν.

Η ακρίβεια της προσαρμογής μπορεί να μελετηθεί, εάν πρώτα αναλυθεί η μεταβλητότητα των δεδομένων Yi. Αυτό γίνεται με την ανάλυσης διασποράς,

$$SST = SSR + SSE \tag{5.4}$$

όπου:

 SST (Sum of Squares Total) είναι το μέτρο ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων y_i και ισούται με:

$$SST = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$$
(5.5)

 SSR (Sum Squares due to Regression) είναι το άθροισμα των τετραγώνων που οφείλεται στην παλινδρόμηση και εκφράζει μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \overline{y})^2$$
(5.6)

 SSE (Sum Squares due to Error) είναι το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων και οφείλεται στα σφάλματα:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$$
(5.7)

Στις παραπάνω εξισώσεις y_i είναι οι τιμές των παρατηρήσεων (απόκρισης), \hat{y}_i είναι η προσαρμοσμένη τιμή και \overline{y} είναι η μέση τιμή του δείγματος. Επιπλέον ορίζεται ο συντελεστής προσδιορισμού (r²), ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέτρο της ακρίβειας της προσαρμογής:

$$r^2 = \frac{SSR}{SST}$$
(5.8)

Όσο μεγαλύτερο ποσοστό ολικής μεταβλητότητας έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, τόσο ο λόγος αυτός είναι πλησιέστερος στη μονάδα.

Προέλευση μεταβλητότητας	Βαθμοί ελευθερίας DF (degrees of freedom)	Άθροισμα τετραγώνων SS (Sum of Squares)	Μέσο τετράγωνο MS (Mean Square)	Τιμή της F
Παλινδρόμηση	ν	SSR	SSR/v	SSR/s ²
Υπόλοιπα	n-2	SSE	s ² =SSE/(n-2)	
Ολική	n-2+v	SST		

Πίνακας 5.1: Ενδεικτικός πίνακας ανάλυσης διασποράς

5.2 Λογισμικό Minitab

Το λογισμικό Minitab είναι ένα στατιστικό πακέτο εύκολο στη χρήση. Τα δεδομένα εισάγονται σε ένα πεδίο (Worksheet) όμοιο με λογιστικό φύλλο του excel όπου στην πρώτη γραμμή ο χρήστης μπορεί να δώσει το όνομα του εκάστοτε παράγοντα και στις ακόλουθες αριθμημένες γραμμές εισάγει τις αντίστοιχες τιμές των παραγόντων. Τα αποτελέσματα του προγράμματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη, προβάλλονται στο πεδίο που φέρει την ονομασία Session. Όλες οι αριθμητικές και συγκριτικές μέθοδοι καθώς και πράξεις μεταξύ των δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κλήση από την κύρια γραμμή μενού.

> Minita	ab - Untitled																		
<u> </u>	<u>E</u> dit D <u>a</u> ta	<u>C</u> alc <u>S</u> tat	<u>G</u> raph Ed	itor <u>T</u> ools	<u>W</u> indow	<u>H</u> elp													
) 🚅 🖬	🚑 %	be e l ka		1 I M		2 🗊 🛛 🕫	; 🖷 🗟 🕻) 💈 🗐 🕇	14										
$\int f_{\mathcal{H}} \left - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \prod_{i=1}^{i} \int_{0}^{i} \frac{f_{i}^{i}}{i} \right \overset{\mathcal{O}}{\longrightarrow} \overset{\mathcal{O}}{\longrightarrow} \left \overset{\mathcal{O}}{\longrightarrow} \right $																			
NTOON · UM																			
C Session																			
Welcome to Minitab, press F1 for help.													-						
percome to minitan, press fi for merp.																			
•																			•
Wo	rksheet 1 ***																		
+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C1 ^
3																			
4																			
5																			
6																			
6 7 8																			
6 7 8 9																			
6 7 8 9 10																			
6 7 8 9 10 11																			
6 7 8 9 10 11 11																			
6 7 8 9 10 11 11 12 12	e (#) [• •

Σχήμα 5.1: Περιβάλλον Minitab

Ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη, μπορούν να παρουσιαστούν διαγράμματα συσχετίσεως παραγόντων, γραφικές παραστάσεις, καμπύλες κατανομών, κ.λ.π..

5.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Αρχικά εισάγονται οι τιμές των συνθηκών κοπής και των πειραματικά μετρούμενων τιμών δυνάμεων κοπής. Ως παράγοντες πρόβλεψης της δύναμης κοπής χρησιμοποιήθηκαν το αξονικό βάθος κοπής (tz), το ακτινικό βάθος κοπής (txy) και η πρόωση ανά δόντι (fz). Οι γωνίες κλίσης (φ και ω) του κοπτικού εργαλείου δε λαμβάνονται υπόψη καθότι τα επιθυμητά αποτελέσματα διαχωρίζονται σύμφωνα με τη στρατηγική του φραιζαρίσματος που ακολουθήθηκε. Επίσης, έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιώντας τη σύμβαση ότι αρνητικές τιμές πρόωσης ανά δόντι απευθύνονται σε αντίρροπο φραιζάρισμα ενώ αντίθετα οι θετικές τιμές στο ομόρροπο.

Εάν χρησιμοποιούνταν μόνο οι ανωτέρω τρεις συνθήκες κοπής ως παράγοντες πρόβλεψης, το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης θα παρήγαγε μια εξίσωση η οποία δε θα ταίριαζε αρκετά καλά στα δεδομένα ή θα είχε μικρό διάστημα εμπιστοσύνης για τον κάθε παράγοντα. Σε ακόμα χειρότερη περίπτωση, είναι δυνατόν οι παράγοντες να μην μπορούν να δώσουν αποτέλεσμα.

Για το λόγο αυτό, με βάση την εμπειρία, μερικές φορές και την τύχη, κατασκευάζονται περισσότεροι παράγοντες ως συνδυασμός των αρχικών παραγόντων εφαρμόζοντας απλές μαθηματικές σχέσεις, όπως αυτές του πολλαπλασιασμού και της διαίρεσης. Οι νέοι παράγοντες δοκιμάζονται στην ανάλυση παλινδρόμησης και επιλέγονται μόνο αυτοί που δίνουν μεγάλο διάστημα εμπιστοσύνης και ικανοποιητικό μοντέλο πρόβλεψης.

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C1
	tz	txy	fz	Rz	tz*txy	tz*fz	txy*fz	tz^2	txy^2	fz^2	1/tz	1/txy	1/fz	tz/txy	tz/fz	txy/tz	txy/fz	fz/tz	fz/t
1	0,6	0,3	-0,2	7,49	0,18	-0,12	-0,06	0,36	0,09	0,04	1,66667	3,33333	-5,00000	2,0	-3,0	0,5	-1,5	-0,33333	-0,66
2	0,3	0,3	-0,2	7,21	0,09	-0,06	-0,06	0,09	0,09	0,04	3,33333	3,33333	-5,00000	1,0	-1,5	1,0	-1,5	-0,66667	-0,66
3	0,6	0,6	-0,2	13,57	0,36	-0,12	-0,12	0,36	0,36	0,04	1,66667	1,66667	-5,00000	1,0	-3,0	1,0	-3,0	-0,33333	-0,33
4	0,3	0,6	-0,2	14,36	0,18	-0,06	-0,12	0,09	0,36	0,04	3,33333	1,66667	-5,00000	0,5	-1,5	2,0	-3,0	-0,66667	-0,33
5	0,6	0,3	-0,6	7,74	0,18	-0,36	-0,18	0,36	0,09	0,36	1,66667	3,33333	-1,66667	2,0	-1,0	0,5	-0,5	-1,00000	-2,00
6	0,3	0,3	-0,6	8,74	0,09	-0,18	-0,18	0,09	0,09	0,36	3,33333	3,33333	-1,66667	1,0	-0,5	1,0	-0,5	-2,00000	-2,00
7	0,6	0,6	-0,6	15,05	0,36	-0,36	-0,36	0,36	0,36	0,36	1,66667	1,66667	-1,66667	1,0	-1,0	1,0	- <mark>1</mark> ,0	-1,00000	-1,00
8	0,3	0,6	-0,6	14,94	0,18	-0,18	-0,36	0,09	0,36	0,36	3,33333	1,66667	-1,66667	0,5	-0,5	2,0	-1,0	-2,00000	-1,00
9	0,6	0,3	0,2	10,65	0,18	0,12	0,06	0,36	0,09	0,04	1,66667	3,33333	5,00000	2,0	3,0	0,5	1,5	0,33333	0,66
10	0,3	0,3	0,2	10,99	0,09	0,06	0,06	0,09	0,09	0,04	3,33333	3,33333	5,00000	1,0	1,5	1,0	1,5	0,66667	0,66
11	0,6	0,6	0,2	15,17	0,36	0,12	0,12	0,36	0,36	0,04	1,66667	1,66667	5,00000	1,0	3,0	1,0	3,0	0,33333	0,33
12	0.0	0.0	0.0	10 07	n 10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.04	ວ ວວວວວ	1 00007	£ 00000	0 5	1 5	2.0	2 0	0 00007	0 05 4

Σχήμα 5.2: Κατασκευασμένοι παράγοντες

Αφού κατασκευαστούν οι νέοι παράγοντες τους οποίους εκτιμά ο χρήστης ότι απαιτούνται, εφαρμόζεται ανάλυση παλινδρόμησης. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης παλινδρόμησης δείχνει το μέσον της τιμής P (P-value) το πόσο σημαντικός είναι ο κάθε ένας παράγοντας, δηλαδή τη συνεισφορά του για τη δημιουργία της καμπύλης των δεδομένων που προσεγγίζει. Μικρές τιμές P σηματοδοτούν ότι οι παράγοντες είναι σημαντικοί και ισχύουν για υψηλό διάστημα εμπιστοσύνης. Αν κάποιος παράγοντας έχει μεγάλη τιμή P, τότε αυτός είτε αφαιρείται από την ανάλυση παλινδρόμησης, είτε δοκιμάζεται υψωμένος σε μεγαλύτερη τάξη. Το αποτέλεσμα καθορίζεται από τη στιγμή που ο χρήστης θεωρεί ότι είναι εντός των επιθυμητών ορίων.

Interactions Plot			x
C1 tz C2 txy C3 fz C4 φ C5 ω C6 Fx (N)	* III	Responses: 'Fx (N)' Factors: tz txv fz	A
С7 Fy (Ń) C8 Fz (N) C9 Σтратηγική C10 tz*tz C11 txy*txy	-	Display full interaction plot matrix	Ŧ
Select Help		Option: OK Cance	s el

Σχήμα 5.3: Επιλογή απόκρισης και παραγόντων στην ανάλυση παλινδρόμησης

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο που προαναφέρθηκε παρήχθησαν οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο των δυνάμεων κοπής ανάλογα με τη στρατηγική φραιζαρίσματος που ακολουθήθηκε. Για την κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί παράγοντες που να δίνουν την καλύτερη δυνατή πρόβλεψη.

Για τη σωστή αξιολόγηση του αποτελέσματος, κατά την ανάλυση παλινδρόμησης, παράγονται τέσσερα διαγράμματα όπως φαίνονται στο <u>σχήμα 6.1</u>. Το πρώτο (πάνω αριστερά) δείχνει την κεντρική γραμμή στην οποία τα δεδομένα πρέπει όσο το δυνατόν να πλησιάζουν πάνω της, καθώς και τη διασπορά των δεδομένων. Στο δεύτερο διάγραμμα (πάνω δεξιά) παρουσιάζονται τα δεδομένα στο χώρο. Για αξιόπιστα αποτελέσματα τα δεδομένα πρέπει να είναι διασκορπισμένα στον χώρο. Στο τρίτο διάγραμμα (κάτω αριστερά) παρουσιάζεται η κατανομή των δεδομένων. Για να ισχύει η τυχαιότητα τα δεδομένα πρέπει να ακολουθούν όσο το δυνατόν περισσότερο την κανονική (Gaussian) κατανομή. Στο τελευταίο διάγραμμα (κάτω δεξιά) γίνεται ορατό αν τα δεδομένα ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη στατιστική ή όχι.



Σχήμα 6.1: Διαγράμματα ανάλυσης παλινδρόμισης

Τέλος, δημιουργούνται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κύριων παραγόντων (tz, txy, fz) σε σχέση με τις 3 συνιστώσες των δυνάμεων κοπής (Fx, Fy, Fz), από τα οποία διεξάγονται χρήσιμα στατιστικά συμπεράσματα για το πως επιδρά ο κάθε παράγοντας στις δυνάμεις κοπής.

\geq	Min	itab - I	МЕТ. П	<mark>Л. О-А</mark> .	MPJ														
	<u>F</u> ile	<u>E</u> dit	D <u>a</u> ta	<u>C</u> alc	<u>S</u> tat	<u>G</u> raph	E <u>d</u> itor	<u>T</u> ools	Window	<u>H</u> el	р								
	🖻 🕻	. 6	5 X	Eg 🧯	B	asic Stati	istics	•	<u>8</u> 0	26	ε.	+£ 🖬	ا 🗟 (D 🖻	Ē	*e I	۲I	T 🖬	8
-	£		ş "I., ,		<u>R</u>	egressio	n	×.	Reg 🙀	ressior	n								
-	1.00		3 114411 1		A	NOVA		•	∠Step	wise									
					<u>D</u>	OE		•	🚮 Best	Subse	ets								
	▶ 7	Γ□	\circ	、 • I	<u>c</u>	ontrol C	harts	•	Eitte	ed Line	e Plot.								
	ണ്ടം				S	<u>)</u> uality To	ools	•	& Part	ial Lea	ast Sau	Jares							
	<u>985</u> , 36	ssion			R	e <u>l</u> iability	/Surviva	→	·→8										
					N	<u>/</u> ultivaria	te	•	<mark>-∕</mark> _B Bina	ary <u>L</u> og	gistic F	Regressi	ion						
	Reg	sidua		s for	т	ime <u>S</u> erie	es	•	<mark>_∕₀ O</mark> rd	inal Lo	ogistic	: Regress	sion						
					I	ables		+	<u> </u>	ninal L	Logisti	ic Regre	ssion.						
	Inte	eract:	ion Pi	lot fo	<u>N</u>	lonparan	netrics	•											
					E	DA		+											
					P	ower and	d Sample	e Size 🕨											

Σχήμα 6.2: Ανάλυση παλινδρόμησης στο λογισμικό Minitab

Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας για όλες τις περιπτώσεις φραιζαρίσματος που μελετήθηκαν.

6.2 Κάθετο φραιζάρισμα

<u>6.2.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το κάθετο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη χ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 41, 2 - 27, 1t_z - 76, 3t_{xy} + 3, 5f_z - 179f_{z^2} + 278t_z t_{xy} + 24, 4t_z f_z - 34, 2t_{xy} f_z + 474f_{z^2}t_z + 207f_{z^2}t_{xy} - 12, 7f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το κάθετο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.1</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	41,16	19,18	2,15	0,085
tz	-27,11	38,18	-0,71	0,509
txy	-76,27	38,18	-2,00	0,102
fz	3,52	20,86	0,17	0,872
fz*fz	-178,93	45,88	-3,90	0,011
tz*txy	278,06	74,85	3,71	0,014
tz*fz	24,42	25,11	0,97	0,375
txy*fz	-34,18	25,11	-1,36	0,232
fz*fz*tz	474,27	70,17	6,76	0,001
fz*fz*txy	207,34	70,17	2,95	0,032
fz*fz*fz	-12,71	39,23	-0,32	0,759
S=6,73647	R-S	q=99,1%	R-Sq(a	dj)=97,4%

Πίνακας 6.1: Ανάλυση παλινδρόμησης στο κάθετο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.3</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.3: Διαγράμματα κάθετου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.2 και 6.3.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	26326,2	2632,6	58,01	0,000
Residual Error	5	226,9	45,4		
Total	15	26553,1			

Πίνακας 6.2: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	13391,1
txy	1	2937,1
fz	1	81,1
fz*fz	1	6689,6
tz*txy	1	626,3
tz*fz	1	42,9
txy*fz	1	84,1

fz*fz*tz	1	2073,0
fz*fz*txy	1	396,2
fz*fz*fz	1	4,8

Πίνακας 6.3: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.4</u>.



Σχήμα 6.4: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από τα αποτελέσματα του κάθετου φραιζαρίσματος είναι ορατό στις χαμηλές τιμές πρόωσης η δύναμη κοπής είναι μικρότερη, τόσο στο αντίρροπο, όσο και στο ομόρροπο φραιζάρισμα. Επίσης, η αύξηση των παραγόντων του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της δύναμης κοπής.

<u>6.2.2 Δύναμη κοπής Fy</u>

Για το κάθετο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη γ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fy (N) = 3,4-17,1t_z - 5,6t_{xy} + 10,2f_z - 63t_z t_{xy} - 194t_z f_z - 199t_{xy} f_z$$
$$-38,6f_{z^2}t_z + 33,9f_{z^2}t_{xy} + 263f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το κάθετο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.4</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	3,36	27,12	0,12	0,905
tz	-17,11	59,48	-0,29	0,783
txy	5,63	59,48	0,09	0,928
fz	10,23	33,59	0,30	0,771
tz*txy	-63,0	120,5	-0,52	0,620
tz*fz	-194,00	40,43	-4,80	0,003
txy*fz	-198,65	40,43	-4,91	0,003
fz*fz*tz	-38,63	81,98	-0,47	0,654
fz*fz*txy	33,87	81,98	0,41	0,694
fz*fz*fz	263,03	63,17	4,16	0,006
S=10,848	81 R-S	Sq=97,6%	R-Sq(adj	j)= 94 ,1%

Πίνακας 6.4: Ανάλυση παλινδρόμησης στο κάθετο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.5</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.5: Διαγράμματα κάθετου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.5 και 6.6.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	9	29335,1	3259,5	27,70	0,000
Residual Error	6	706,1	117,7		
Total	15	30041,2			

Πίνακας 6.5: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	1018,7
txy	1	91,7
fz	1	20575,2
tz*txy	1	32,2
tz*fz	1	2709,7
txy*fz	1	2841,1
fz*fz*tz	1	6,1
fz*fz*txy	1	20,1
fz*fz*fz	1	2040,3

Πίνακας 6.6: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.6</u>.



Σχήμα 6.6: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται η δύναμη Fy (- δηλώνει τη φορά της δύναμης), τόσο στο αντίρροπο όσο και στο ομόρροπο φραιζάρισμα ενώ όσο τα βάθη κοπής αυξάνονται και οι δυνάμεις κοπής Fy.

<u>6.2.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το κάθετο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη γ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$F_{z}(N) = 29,3+66,3t_{z}-26,5t_{xy}+45,4f_{z}-127f_{z^{2}}+252t_{z}t_{xy}+52,9t_{z}f_{z}+6,1t_{xy}f_{z}$$
$$+397f_{z^{2}}t_{z}+155f_{z^{2}}t_{xy}-203f_{z^{3}}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το κάθετο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.7</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	29,29	23,67	1,24	0,271
tz	66,34	47,12	1,41	0,218
txy	-26,55	47,12	-0,56	0,598
fz	45,36	25,74	1,76	0,138
fz*fz	-127,40	56,63	-2,25	0,074
tz*txy	252,28	92,38	2,73	0,041
tz*fz	52,89	30,99	1,71	0,149
txy*fz	6,12	30,99	0,20	0,851
fz*fz*tz	396,72	86,61	4,58	0,006
fz*fz*txy	155,10	86,61	1,79	0,133
fz*fz*fz	-203,44	48,42	-4,20	0,008
S=8,314	53 R-S	Sq=99,1%	R-Sq(ad	j)= 97,4%

Πίνακας 6.7: Ανάλυση παλινδρόμησης στο κάθετο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.7</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.7: Διαγράμματα κάθετου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.8 και 6.9.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	38888,3	3888,8	56,25	0,000
Residual Error	5	345,7	69,1		
Total	15	39233,9			

Πίνακας 6.8: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	24188,0
txy	1	5012,6
fz	1	86,0
fz*fz	1	5989,2
tz*txy	1	515,5
tz*fz	1	201,4
txy*fz	1	2,7
fz*fz*tz	1	1450,5
fz*fz*txy	1	221,7
fz*fz*fz	1	1220,5

Πίνακας 6.9: Ανάλυση διασποράς στο κάθετο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.8</u>.



Σχήμα 6.8: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω διαγράμματος παρατηρείται ότι με την αύξηση της πρόωσης αυξάνει η δύναμη τόσο στο ομόρροπο όσο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα, ενώ αύξησή της παρατηρείται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

6.3 Διατρητικό φραιζάρισμα

<u>6.3.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη χ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 47,5-9,7t_z - 48,2t_{xy} - 30,3f_z - 169f_{z^2} + 319t_zt_{xy} - 86,6t_zf_z - 36,7t_{xy}f_z + 363f_{z^2}t_z + 441f_{z^2}t_{xy} + 152f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.10</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	47,52	18,42	2,58	0,049
tz	-9,72	36,67	-0,27	0,802
txy	-48,22	36,67	-1,31	0,246
fz	-30,26	220,03	-1,51	0,191
fz*fz	-169,29	44,07	-3,84	0,012
tz*txy	319,36	71,89	4,44	0,007

S=6,47033	R-Sq=99,6%		R-Sq(ad	j)=97,88%
fz*fz*fz	152,10	37,68	4,04	0,010
fz*fz*txy	440,60	67,40	6,54	0,001
fz*fz*tz	363,05	67,40	5,29	0,003
txy*fz	-36,71	24,11	-1,52	0,188
tz*fz	-86,57	24,11	-3,59	0,016

Πίνακας 6.10: Ανάλυση παλινδρόμησης στο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.9</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.9: Διαγράμματα διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.11 και 6.12</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	51919,3	5191,9	124,02	0,000
Residual Error	5	209,3	41,9		
Total	15	52128,6			

Πίνακας 6.11: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	15366,7
txy	1	12136,9
fz	1	4111,4
fz*fz	1	15155,5
tz*txy	1	826,1
tz*fz	1	539,6
txy*fz	1	97,0
fz*fz*tz	1	1214,7
fz*fz*txy	1	1789,1
fz*fz*fz	1	682,3

Πίνακας 6.12: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.10</u>.



Σχήμα 6.10: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από τα αποτελέσματα του διατρητικού φραιζαρίσματος είναι ορατό ότι με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται, τόσο στο ομόρροπο, όσο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα, η δύναμη κοπής. Επίσης, αύξηση της δύναμης παρατηρείται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

<u>6.3.2 Δύναμη κοπής Fy</u>

Για το διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη γ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fy(N) = -465 + 130t_z + 212t_{xy} + 213f_z - 208f_{z^2} - 639t_zt_{xy} - 212t_zf_z - 138t_{xy}f_z$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.13</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	-46,50	82,31	-0,56	0,588
tz	130,0	172,2	0,76	0,472
txy	212,2	172,2	1,23	0,253
fz	212,88	79,61	2,67	0,028
fz*fz	-20,79	51,05	-0,41	0,695
tz*txy	-638,9	363,0	-1,76	0,116
tz*fz	-211,6	121,8	-1,74	0,120
txy*fz	-138,0	121,8	-1,13	0,290
S=36,6706	R-Sq=77,2%		R-Sq(adj)=57,3%	

Πίνακας 6.13: Ανάλυση παλινδρόμησης στο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.11</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.11: Διαγράμματα διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.14 και 6.15.
Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	7	28928	4133	3,87	0,038
Residual Error	8	85,39	1067		
Total	15				

Πίνακας 6.14: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	8928
txy	1	2040
fz	1	9882
fz*fz	1	177
tz*txy	1	3306
tz*fz	1	3224
txy*fz	1	1371

Πίνακας 6.15: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.12</u>.



Σχήμα 6.12: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής όπως αντίστοιχα αύξηση προκαλείται και με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.3.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη z διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$F_{z}(N) = 43,1+103t_{z}+12,5t_{xy}-16,7f_{z}-100f_{z^{2}}+250t_{z}t_{xy}-2,0t_{z}f_{z}+58,2t_{xy}f_{z}$$
$$+181f_{z^{2}}t_{z}+298f_{z^{2}}t_{xy}+15,3f_{z^{3}}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.16</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	43,06	13,92	3,09	0,027
tz	102,64	27,71	3,70	0,014
txy	12,49	27,71	0,45	0,671
fz	-16,71	15,14	-1,10	0,320
fz*fz	-99,95	33,30	-3,00	0,030
tz*txy	249,58	54,32	4,59	0,006
tz*fz	-2,01	18,22	-0,11	0,915
txy*fz	58,15	18,22	3,19	0,024
fz*fz*tz	180,55	50,93	3,55	0,016
fz*fz*txy	297,58	50,93	5,84	0,002
fz*fz*fz	15,25	28,47	0,54	0,615
S=4,88902	R-Sq=99,7%		R-Sq(a	dj)=99,2%

Πίνακας 6.16: Ανάλυση παλινδρόμησης στο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 7.13</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.13: Διαγράμματα διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.17 και 6.18.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	42818,1	4281,8	179,14	0,000
Residual Error	5	119,5	23,9		
Total	15	42937,6			

Πίνακας 6.17: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	22691,7
txy	1	12230,7
fz	1	587,5
fz*fz	1	5436,5
tz*txy	1	504,6
tz*fz	1	0,3
txy*fz	1	243,5
fz*fz*tz	1	300,4
fz*fz*txy	1	816,1
fz*fz*fz	1	6,9

Πίνακας 6.18: Ανάλυση διασποράς στο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.14</u>.



Σχήμα 7.14: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα η αύξηση της πρόωσης οδηγεί στην αύξηση της δύναμης κοπής, τόσο κατά το αντίρροπο, όσο και στο ομόρροπο φραιζάρισμα. Παράλληλα αύξηση παρατηρείται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

6.4 Ελκτικό φραιζάρισμα

<u>6.4.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη χ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 28,0+8,6t_z - 33,8t_{xy} + 22,0f_z - 44,4f_{z^2} + 176t_zt_{xy} + 50,8t_zf_z - 57,1t_{xy}f_z + 316f_{z^2}t_z + 176f_{z^2}t_{xy} - 24,9f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.19</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	27,99	11,47	2,44	0,059
tz	8,60	22,83	0,38	0,722
txy	-33,82	22,83	-1,48	0,199
fz	22,00	12,47	1,76	0,138
fz*fz	-44,38	27,44	1,62	0,167

S=4,02902	R-Sq=99,7%		R-Sq(a	dj)=99,1%
fz*fz*fz	-24,95	23,36	-1,06	0,336
fz*fz*txy	176,15	41,97	4,20	0,009
fz*fz*tz	316,04	41,97	7,53	0,001
txy*fz	-57,08	15,02	-3,80	0,013
tz*fz	50,77	15,02	3,38	0,020
tz*txy	175,67	44,77	3,92	0,011

Πίνακας 6.19: Ανάλυση παλινδρόμησης στο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.15</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.15: Διαγράμματα ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.20 και 6.21.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	25650,7	2565,1	158,02	0,000
Residual Error	5	81,2	16,2		
Total	15	25731,8			

Πίνακας 6.20: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	8193,0
txy	1	2330,5
fz	1	385,2
fz*fz	1	12847,1
tz*txy	1	250,0
tz*fz	1	185,6
txy*fz	1	234,6
fz*fz*tz	1	920,5
fz*fz*txy	1	285,9
fz*fz*fz	1	18,4

Πίνακας 6.21: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.15</u>.



Σχήμα 6.15: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αύξηση της πρόωσης οδηγεί στην αύξηση της δύναμης Fy, τόσο στο αντίρροπο όσο και στο ομόρροπο ελκτικό φραιζάρισμα. Επίσης, αύξηση της δύναμης παρατηρείται και με την αύξηση στα δύο βάθη κοπής.

<u>6.4.2 Δύναμη κοπής Fy</u>

Για το ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη γ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$Fy (N) = -5, 2 - 29, 6t_z + 7, 7t_{xy} - 81, 5f_z + 33, 8f_{z^2} - 58t_z t_{xy} - 255t_z f_z - 311t_{xy} f_z$ $-118f_{z^2}t_z - 14f_{z^2}t_{xy} + 421f_{z^3}$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.22</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	-5,23	32,55	-0,16	0,879
tz	-29,64	64,79	-0,46	0,667
txy	7,71	64,79	0,12	0,910
fz	-81,48	35,39	-2,30	0,070
fz*fz	33,79	77,86	0,43	0,682
tz*txy	-58,4	127,0	-0,46	0,665
tz*fz	-254,92	42,61	-5,98	0,002
txy*fz	-311,46	42,61	-7,31	0,001
fz*fz*tz	-118,3	119,1	-0,99	0,366
fz*fz*txy	-14,0	119,1	-0,12	0,991
fz*fz*fz	420,59	66,57	6,32	0,001
S=11,4322	R-Sq=99,6%		R-Sq(ad	dj)=98,7%

Πίνακας 6.22: Ανάλυση παλινδρόμησης στο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.16</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.16: Διαγράμματα ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.23 και 6.24.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	145706	14571	111,49	0,000
Residual Error	5	653	131		
Total	15	146359			

Πίνακας 6.23: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	2278
txy	1	164
fz	1	125953
fz*fz	1	272
tz*txy	1	28
tz*fz	1	4679
txy*fz	1	6985
fz*fz*tz		129
fz*fz*txy		2
fz*fz*fz		5217

Πίνακας 6.24: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.17</u>.



Σχήμα 6.17: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται επίσης πως η δύναμη κοπής αυξάνει με την αύξηση της πρόωσης και για ομόρροπο και για αντίρροπο φραιζάρισμα, ενώ αντίστοιχα αύξηση έχουμε και με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.4.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη z διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fz (N) = 32,7 + 100t_z + 32,4t_{xy} + 123f_z + 20,4f_{z^2} + 167t_zt_{xy} + 101t_zf_z - 44,8t_{xy}f_z + 184f_{z^2}t_z + 208f_{z^2}t_{xy} - 374f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.25</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	32,74	20,83	1,57	0,177
tz	100,09	41,46	2,41	0,061
txy	32,38	41,46	0,78	0,470
fz	123,19	22,65	5,44	0,003
fz*fz	20,37	49,82	0,41	0,700
tz*txy	167,28	81,28	2,06	0,095
tz*fz	100,91	27,26	3,70	0,014
txy*fz	-44,77	27,26	-1,64	0,161
fz*fz*tz	183,91	76,20	2,41	0,061

fz*fz*txy	207,71	76,20	2,73	0,041
fz*fz*fz	-346,72	42,60	-8,14	0,000
S=7,31489	R-Sq=99,5%		R-Sq(ad	dj)=98,4%

Πίνακας 6.25: Ανάλυση παλινδρόμησης στο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.18</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.18: Διαγράμματα ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.26 και 6.27.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	49264,9	4926,5	92,07	0,000
Residual Error	5	267,5	53,5		
Total	15	49532,5			

Πίνακας 6.26: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	16201,5
txy	1	8013,8
fz	1	3860,3
fz*fz	1	15830,7
tz*txy	1	226,7

tz*fz	1	733,1
txy*fz	1	144,3
fz*fz*tz	1	311,7
fz*fz*txy	1	397,6
fz*fz*fz	1	3545,3

Πίνακας 6.27: Ανάλυση διασποράς στο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.19</u>.



Σχήμα 6.19: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής, και στο ομόρροπο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα. Επίσης αύξηση παρατηρείται κα με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

6.5 Πλάγιο φραιζάρισμα

<u>6.5.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το πλάγιο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη χ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 23,0+33,4t_z - 61,4t_{xy} - 21,2f_z - 104f_{z^2} + 205t_zt_{xy} + 3,9t_zf_z - 35,6t_{xy}f_z + 436f_{z^2}t_z + 212f_{z^2}t_{xy} + 90,6f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.28</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	23,05	14,24	1,62	0,167
tz	33,40	28,35	1,18	0,292
txy	-61,41	28,35	-2,17	0,083
fz	-21,23	15,49	-1,37	0,229
fz*fz	-104,50	34,07	-3,07	0,028
tz*txy	204,86	55,59	3,69	0,014
tz*fz	3,88	18,64	0,21	0,843
txy*fz	-35,61	18,64	-1,91	0,114
fz*fz*tz	436,12	52,11	8,37	0,000
fz*fz*txy	212,32	52,11	4,07	0,010
fz*fz*fz	90,59	29,13	3,11	0,027
S=5,00289	R-Sq=99,6%		R-Sq(a	dj)=98,9%

Πίνακας 6.28: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.20</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.20: Διαγράμματα πλάγιου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.29 και 6.30</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	35554,7	3555,5	142,05	0,000
Residual Error	5	125,1	25,0		
Total	15	35679,8			

Πίνακας 6.29: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	16304,1
txy	1	1930,9
fz	1	107,5
fz*fz	1	14369,4
tz*txy	1	339,9
tz*fz	1	1,1
txy*fz	1	91,3
fz*fz*tz	1	1752,9
fz*fz*txy	1	415,4
fz*fz*fz	1	242,0

Πίνακας 6.30: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.21</u>.



Σχήμα 6.21: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πλάγιου φραιζαρίσματος, με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται και η δύναμη κοπής όπως αυξάνεται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

<u>6.5.2 Δύναμη κοπής Fy</u>

Για το πλάγιο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη γ διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fy (N) = 3,4-38,9t_z + 14,4t_{xy} - 8,8f_z + 59,9f_{z^2} - 43t_z t_{xy} - 204t_z f_z - 314t_{xy} f_z$$

-53f_2t_z -126f_2t_{xy} + 300f_3

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 7.31</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	3,39	30,91	0,11	0,917
tz	-38,94	61,53	-0,63	0,555
txy	14,41	61,53	0,23	0,824
fz	-8,82	33,61	-0,26	0,804
fz*fz	59,91	73,94	0,81	0,455
tz*txy	-43,4	120,6	-0,36	0,733
tz*fz	-204,27	40,46	-5,05	0,004
txy*fz	-313,53	40,46	-7,75	0,001
fz*fz*tz	-53,4	113,1	-0,47	0,656
fz*fz*txy	-125,9	113,1	-1,11	0,316
fz*fz*fz	300,43	63,22	4,75	0,005
S=10,8562	R-Sq=99,3%		R-Sq(a	dj)=97,8%

Πίνακας 6.31: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.22</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.22: Διαγράμματα πλάγιου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.32 και 6.33.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	80857,1	8085,7	68,61	0,000
Residual Error	5	589,3	117,9		
Total	15	81446,4			

Πίνακας 6.32: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	1722,7
txy	1	330,9
fz	1	65695,6
fz*fz	1	176,9
tz*txy	1	15,3
tz*fz	1	3004,2
txy*fz	1	7077,5
fz*fz*tz	1	26,3
fz*fz*txy	1	146,0
fz*fz*fz	1	2661,8

Πίνακας 6.33: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.23</u>.



Σχήμα 6.23: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, η δύναμη κοπής αυξάνεται τόσο στο ομόρροπο, όσο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα με την αύξηση της πρόωσης. Επίσης, αύξηση στη δύναμη παρατηρείται και με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.5.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το πλάγιο φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη z διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$F_{z} (N) = 21,7 + 84,5t_{z} - 13,4t_{xy} + 0,14f_{z} - 81,7f_{z^{2}} + 184t_{z}t_{xy} + 47,2t_{z}f_{z} - 48,8t_{xy}f_{z} + 356f_{z^{2}}t_{z} + 194f_{z^{2}}t_{xy} - 2,3f_{z^{3}}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.34</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	21,660	7,998	2,71	0,042
tz	84,47	15,92	5,31	0,003
txy	-13,41	15,92	-0,84	0,438
fz	0,135	8,698	0,02	0,988
fz*fz	-81,69	19,13	-4,27	0,008
tz*txy	184,17	31,22	5,90	0,002
tz*fz	47,17	10,47	4,50	0,006

txy*fz	-48,78	10,47	-4,66	0,006
fz*fz*tz	355,73	29,26	12,16	0,000
fz*fz*txy	193,59	29,26	6,62	0,001
fz*fz*fz	-2,32	16,36	-0,14	0,893
S=2,80938	R-Sq=99,9%		R-Sq(ad	dj)=99,7%

Πίνακας 6.34: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.24</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.24: Διαγράμματα πλάγιου φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.35 και 6.36.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	38033,4	3803,3	481,89	0,000
Residual Error	5	39,5	7,9		
Total	15	38072,9			

Πίνακας 6.35: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	20476,2
txy	1	4213,3
fz	1	5,8
fz*fz	1	11220,1
tz*txy	1	274,7
tz*fz	1	160,2
txy*fz	1	171,3
fz*fz*tz	1	1166,2
fz*fz*txy	1	345,4
fz*fz*fz	1	0,2

Πίνακας 6.36: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.25</u>.



Σχήμα 6.25: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πλάγιου φραιζαρίσματος, με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται και η δύναμη κοπής όπως αυξάνεται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

6.6 Πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

<u>6.6.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη x διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 82, 2 - 79, 8t_z - 156t_{xy} - 73, 9f_z - 206f_{z^2} + 488t_z t_{xy} - 9, 4t_z f_z - 69, 4t_{xy} f_z + 610f_{z^2}t_z + 220f_{z^2}t_{xy} + 185f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.37</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	82,24	47,07	1,75	0,141
tz	-79,77	93,70	-0,85	0,433
txy	-156,12	93,70	-1,67	0,157
fz	-73,89	51,19	-1,44	0,209
fz*fz	-206,4	112,6	-1,83	0,126
tz*txy	488,3	183,7	2,66	0,045
tz*fz	-9,37	61,62	-0,15	0,885
txy*fz	-69,37	61,62	-1,13	0,311
fz*fz*tz	610,4	172.2	3,54	0,016
fz*fz*txy	219,9	172,2	1,28	0,258
fz*fz*fz	184,70	96,28	1,92	0,113
S=16,5344	R-Sq=97,6%		R-Sq(a	dj)=92,7%

Πίνακας 6.37: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.26</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.26 : Διαγράμματα πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.38 και 6.39</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	55122,1	5512,2	20,16	0,002
Residual Error	5	1366,9	273,4		
Total	15	56489,0			

Πίνακας 6.38: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	24721,3
txy	1	4169,3
fz	1	7601,1
fz*fz	1	11460,8
tz*txy	1	1931,6
tz*fz	1	6,3
txy*fz	1	346,4
fz*fz*tz	1	3433,4
fz*fz*txy	1	445,8
fz*fz*fz	1	1006,1

Πίνακας 6.39: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.27</u>.



Σχήμα 6.27: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, η δύναμη κοπής αυξάνεται τόσο στο ομόρροπο, όσο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα με την αύξηση της πρόωσης. Επίσης, αύξηση στη δύναμη παρατηρείται και με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.6.2 Δύναμη κοπής Fy</u>

Για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη y διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fy (N) = 107 - 287t_z - 119t_{xy} + 29f_z - 227f_{z^2} + 238t_zt_{xy} + 139t_zf_z + 67t_{xy}f_z + 722f_{z^2}t_z - 177f_{z^2}t_{xy} - 30f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.40</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	107,4	107,6	1,00	0,364
tz	-286,7	214,1	-1,34	0,238
txy	-118,6	117,0	-0,55	0,604
fz	28,7	257,4	0,25	0,816
fz*fz	-227,0	419,8	-0,88	0,418
tz*txy	238,1	140,8	0,57	0,595
tz*fz	138,9	140,8	0,99	0,369
txy*fz	67,5	393,6	0,48	0,652

fz*fz*tz	721,5	396,6	1,83	0,126
fz*fz*txy	-177,4	393,6	-0,45	0,671
fz*fz*fz	-29,7	220,0	-0,13	0,898
S=37,7859	R-Sq=87,2%		R-Sq(a	dj)=61,6%

Πίνακας 6.40: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.28</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.28: Διαγράμματα πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.41 και 6.42</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	48678	4868	3,41	0,094
Residual Error	5	7139	1428		
Total	15	55817			

Πίνακας 6.41 : Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	448
txy	1	791
fz	1	40019

fz*fz	1	130
tz*txy	1	459
tz*fz	1	1388
txy*fz	1	328
fz*fz*tz	1	4798
fz*fz*txy	1	290
fz*fz*fz	1	26

Πίνακας 6.42: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.29</u>.



Σχήμα 6.29: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, η δύναμη κοπής αυξάνεται τόσο στο ομόρροπο, όσο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα με την αύξηση της πρόωσης. Επίσης, αύξηση στη δύναμη παρατηρείται και με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.6.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη z διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fz (N) = 68,5 + 2t_z - 99t_{xy} - 54,4f_z - 63f_{z^2} + 449t_zt_{xy} + 108t_zf_z - 58,8t_{xy}f_z + 408f_{z^2}t_z - 6f_{z^2}t_{xy} + 100f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.43</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	68,4	66,81	1,02	0,352
tz	1,8	133,0	0,01	0,990
txy	-98,8	133,0	-0,74	0,491
fz	-54,36	72,65	-0,75	0,488
fz*fz	-62,8	159,8	-0,39	0,711
tz*txy	449,0	260,7	1,72	0,146
tz*fz	107,62	87,45	1,23	0,273
txy*fz	-58,80	87,45	-0,67	0,531
fz*fz*tz	408,2	244,4	1,67	0,156
fz*fz*txy	-6,4	244,4	-0,03	0,980
fz*fz*fz	100,1	136,6	-,73	0,497
S=23,4662	R-Sq=94,0%		R-Sq(a	dj)=82 ,1%

Πίνακας 6.43: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.30</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.30: Διαγράμματα πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.44 και 6.45</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	43329,5	4332,9	7,87	0,017
Residual Error	5	2753,3	550,7		
Total	15	46082,8			

Πίνακας 6.44: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	29330,8
txy	1	3740,9
fz	1	0,7
fz*fz	1	5709,7
tz*txy	1	1632,8
tz*fz	1	833,9
txy*fz	1	248,9
fz*fz*tz	1	1535,7
fz*fz*txy	1	0,4
fz*fz*fz	1	295,8

Πίνακας 6.45: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο διατρητικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.31</u>.



Σχήμα 6.31: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος, με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται και η δύναμη κοπής όπως αυξάνεται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

6.7 Πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

<u>6.7.1 Δύναμη κοπής Fx</u>

Για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη x διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fx (N) = 20,6+12,4t_z - 49,6t_{xy} - 2,2f_z - 52,7f_{z^2} + 189t_zt_{xy} + 19,9t_zf_z - 48,8t_{xy}f_z + 305f_{z^2}t_z + 115f_{z^2}t_{yy} + 33,6f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.46</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	20,59	12,75	1,62	0,167
tz	12,38	25,37	0,49	0,646
txy	-49,61	25,37	-1,96	0,108
fz	-2.22	13,86	-0,16	0,879
fz*fz	-52,72	30,49	-1,73	0,144
tz*txy	189,08	49,75	3,80	0,013
tz*fz	19,90	16,69	1,19	0,287
txy*fz	-48,82	16,69	-2,93	0,033
fz*fz*tz	304,66	46,64	6,53	0,001
fz*fz*txy	114,97	46,64	2,47	0,057
fz*fz*fz	33,60	26,07	1,29	0,254
S=4,47726	R-Sq=9	99,5%	R-Sq(ad	j)=98,5%

Πίνακας 6.46: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.32</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.32: Διαγράμματα πλάγιου ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι πίνακες 6.47 και 6.48.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	19409,6	1941,0	96,83	0,000
Residual Error	5	100,2	20,0		
Total	15	19509,8			

Πίνακας 6.47: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	9033,1
txy	1	1230,8
fz	1	56,9
fz*fz	1	7588,6
tz*txy	1	289,6
tz*fz	1	28,5
txy*fz	1	171,6
fz*fz*tz	1	855,4
fz*fz*txy	1	121,8
fz*fz*fz	1	33,3

Πίνακας 6.48: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fx παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.33</u>.



Σχήμα 6.33: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα του πλάγιου ελκτικού φραιζαρίσματος, με την αύξηση της πρόωσης αυξάνεται και η δύναμη κοπής όπως αυξάνεται και με την αύξηση του ακτινικού και αξονικού βάθους κοπής.

6.7.2 Δύναμη κοπής Fy

Για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη ν διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$$Fy (N) = -1, 7 - 30, 6t_z + 21, 5t_{xy} - 88, 5f_z + 19, 9f_{z^2} - 77t_z t_{xy} - 273t_z f_z - 319t_{xy} f_z$$
$$-104f_{z^2}t_z - 21f_{z^2}t_{xy} + 425f_{z^3}$$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.49</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	-1,66	35,49	-0,05	0,964
tz	-30,56	70,65	-0,43	0,683
txy	21,47	70,65	0,30	0,773
fz	-85,52	38m60	-2,22	0,078
fz*fz	19,94	84,91	0,23	0,824
tz*txy	-76,6	138,5	-0,55	0,604
tz*fz	-272,54	46,46	-5,87	0,002

S=12,4665	R-Sq=99,5%		R-Sq(ad	dj)=98,6%
fz*fz*fz	424,54	72,59	5,85	0,002
fz*fz*txy	-21,0	129,9	-0,16	0,878
fz*fz*tz	-103,7	129,9	-0,80	0,461
txy*fz	-319,10	46,46	-6,87	0,001

Πίνακας 6.49: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.34</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.34: Διαγράμματα πλάγιου ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.50 και 6.51</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	165945	16595	106,78	0,000
Residual Error	5	777	155		
Total	15	166722			

Πίνακας 6.50: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	2647
txy	1	106
fz	1	144511
fz*fz	1	535
tz*txy	1	48
tz*fz	1	5348
txy*fz	1	7332
fz*fz*tz	1	99
fz*fz*txy	1	4
fz*fz*fz	1	5315

Πίνακας 6.51: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fy παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.35</u>.



Σχήμα 6.35: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής, και στο ομόρροπο και στο αντίρροπο φραιζάρισμα. Επίσης αύξηση παρατηρείται κα με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

<u>6.7.3 Δύναμη κοπής Fz</u>

Για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα, η εξίσωση που προκύπτει για τη δύναμη κοπής, κατά τη z διεύθυνση, από την ανάλυση παλινδρόμησης είναι η ακόλουθη:

$F_{z} (N) = 24,3+93,0t_{z}+10,4t_{xy}+22,2f_{z}-15,8f_{z^{2}}+197t_{z}t_{xy}+40,9t_{z}f_{z}-57,6t_{xy}f_{z}$ $+131f_{z^{2}}t_{z}+222f_{z^{2}}t_{xy}-69,6f_{z^{3}}$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα παρουσιάζονται στον παρακάτω <u>πίνακα 6.52</u>.

Predictor	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	24,30	22,17	1,10	0,323
tz	93,00	44,12	2,11	0,089
txy	10,42	44,12	0,24	0,823
fz	22,20	24,10	0,92	0,399
fz*fz	-15,83	53,03	-0,30	0,777
tz*txy	196,69	86,51	2,27	0,072
tz*fz	40,88	29,02	1,41	0,218
txy*fz	-57,59	29,02	-1,98	0,104
fz*fz*tz	131,02	81,10	1,62	0,167
fz*fz*txy	222,47	81,10	2,74	0,041
fz*fz*fz	-69,62	45,34	-1,54	0,185
S=7,78556	R-Sq=99,1%		R-Sq(a	dj)=97,3%

Πίνακας 6.52: Ανάλυση παλινδρόμησης στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Στο <u>σχήμα 6.36</u> που έπεται είναι ορατή η κατανομή των δεδομένων και το ότι τα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή του διαγράμματος διασποράς.



Σχήμα 6.36: Διαγράμματα πλάγιου ελκτικού φραιζαρίσματος

Από την ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι <u>πίνακες 6.53 και 6.54</u>.

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	10	32984,0	3298,4	54,42	0,000
Residual Error	5	303,1	60,6		
Total	15	33287,1			

Πίνακας 6.53: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Source	DF	Seq SS
tz	1	15532,0
txy	1	7405,9
fz	1	212,5
fz*fz	1	8403,8
tz*txy	1	313,4
tz*fz	1	120,3
txy*fz	1	238,8
fz*fz*tz	1	158,2
fz*fz*txy	1	456,1
fz*fz*fz	1	142,9

Πίνακας 6.54: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την δύναμη κοπής Fz παρουσιάζονται στο επόμενο <u>σχήμα 6.37</u>.



Σχήμα 6.37: Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την δύναμη κοπής

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής, και στο ομόρροπο και στο αντίρροπο πλάγιο ελκτικό φραιζάρισμα. Επίσης αύξηση της δύναμης παρατηρείται κα με την αύξηση του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής.

7. ΣΥΝΟΨΗ

Οι στρατηγικές του σχεδιασμού πειραμάτων αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στην συσχέτιση παραγόντων και την εύρεση αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Σύμφωνα με τις στρατηγικές αυτές μπορεί να βρεθεί το κατά πόσο επηρεάζουν την εκάστοτε απόκριση του συστήματος που μελετάται.

Ο συνδυασμός μιας απλής αριθμητικής μεθόδου, της ανάλυσης παλινδρόμησης, με τα πειραματικά δεδομένα των δυνάμεων κοπής, παράγουν τη μεθοδολογία απόκρισης επιφάνειας (RSM), η οποία αποδεικνύεται μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδος πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναπτύχτηκε ένα μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων κοπής και παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο επιδρά ο κάθε παράγοντας κοπής στις δυνάμεις αυτές καθώς και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων μεταξύ τους. Η επίτευξη αυτού του στόχου έγινε, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τη χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments) σε ντουραλουμίνιο Al7075 T6.

Με το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να προβλεφθεί η τιμή των δυνάμεων κοπής ανάλογα με το συνδυασμό των συνθηκών κοπής που επιλέγει ο χρήστης. Στη συνέχεια με κατάλληλη μελέτη τόσο των επιδράσεων των κυρίων παραγόντων, όσο και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους μπορεί να επιτευχθεί όσο το δυνατόν πιο βέλτιστη κατεργασία κοπής με κριτήριο τη μέγιστη τιμή των δυνάμεων κοπής.

Μέσω των αποτελεσμάτων της εργασίας, είναι ορατό ότι οι δυνάμεις κοπής μπορούν να προβλεθούν σε έναν αρκετά μεγάλο βαθμό, πάνω από 90%, μέσω του μοντέλου RSM, με τη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης. Η επάρκεια των μαθηματικών μοντέλων που προέκυψαν από την ανάλυση παλινδρόμησης εξετάστηκε στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Ο πίνακας ANOVA που χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση αυτή φαίνεται παρακάτω για την περίπτωση της δύναμης Fz του πλάγιου φραιζαρίσματος.

Source	DF	SS	MS	F	Ρ
Regression	10	38033,4	3803,3	481,89	0,000
Residual Error	5	39,5	7,9		
Total	15	38072,9			

Πίνακας 7.1: Ανάλυση διασποράς στο πλάγιο φραιζάρισμα

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία, η τιμή του Ρ είναι 0 με ακρίβεια τρίτου δεκαδικού και επομένως αποδεικνύεται η υψηλή συσχέτιση μεταξύ των συμμετεχόντων παραγόντων στα μαθηματικά μοντέλα και της απόκρισης.

Ένας επιπλέον τρόπος που επιβεβαιώνει την ικανότητα των μαθηματικών μοντέλων να δίνουν ακριβείς τιμές αποτελεί είναι η παράμετρος R-sq(adj), η οποία μετράει τη μεταβλητότητα στην απόκριση που μπορεί να εξηγηθεί από τους χρησιμοποιούμενους παράγοντες αλλά και τις δευτέρου βαθμούς αλληλεπιδράσεις τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις της παρούσας εργασίας, η παράμετρος είναι πολύ πάνω από 90%, 99,7% στη περίπτωση του πλάγιου φραιζαρίσματος που παρουσιάστηκε παραπάνω, με αποτέλεσμα να επιβεβαιώνεται η επάρκεια των μαθηματικών μοντέλων και πάλι.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Groover M.P., 2004. Fundamentals of modern manufacturing: materials processes and systems. New York, Society of Manufacturing Engineers (2nd edition), Wiley.

[2] Πετρόπουλος Π., 1986. Μαθήματα Μηχανολογικής Τεχνολογίας - Θεωρία και Τεχνολογία Μηχανουργικών Κατεργασιών των Μετάλλων (Τεύχος 2).

[3] Tlusty J., Smith S., 1985. Forced Vibration, Chatter, Accuracy in High Speed Milling, 362-368.

[4] Babin T.S., Lee M.J., Sutherland J.W., Kapoor S.G., 1985. A model for end milling surface topography, 362-368.

[5] Shinobo K., Toshikatsu Y., Masatoshi H., 1976. Characteristics of cutting force in plain milling operation using a helical cutter, 117-124.

[6] Hann V., 1983. Kinetik des Schaftfrasens. Dissertation, TH Aachen.

[7] Taylor F.W., 1907. On the art of Cutting Metals, 31-350.

[8] Kronenberg M., 1954. Grundzuege der Zerspanungslehre.

[9] Victor H., 1969. Schnittkrafttberechnungen fuer das Abspanen von Metallen, 317-327

[10] Kienzle O., 1952. Die Bestimmung von Kraeften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen, 299-305.

[11] Victor H., 1956. Beitrag zur Kenntnis der Schnittkraefte beim Drehen.

[12] Kamm H., 1956. Beitrag zur Optimierung des Messerkopfraesens.

[13] Friedrich H., 1914. Ueber die Waermevorgaenge beim spanschneiden und die vorteilhaftesten Schnittgeschwinnding-keiten, 379-383, 417-422, 454-458.

[14] Klein w., 1938. Versuch einer einheitlichen Darstellung der Kraefteverhaeltnissse bei ver schiedenen Zerspanungsarten.

[15] Zorew N.N., 1966. Metal cutting mechanics.

[16] Richter A., 1952. Die Zerspankraefte beim Drehen im Bereich des Fliesspans, 72, 631.

[17] Sadowy M., 1969. Bestimmung eines Schnittkraftgesetzes fuer das Drehen und Hobeln durch Variation der Parameter, 1160-1166.

[18] Klicpera U., 1976. Uberwachung des Werkzeugverschleisses mit Hilfe der Zerspankraftrichtung.

[19] Victor H., 1956. Beitrag zur Kenntnis der Schnittkraefte beim Drehen, Hobeln ung Bohren.

[20] Victor H.R., 1976. Zerspankraft, Werkzeugbeanspruchung und Verschleiss beim Fraesen mit Hartmetall.

[21] Koening W., Langhammer K., 1972. Zusammenhang zwischen Schnittkraft, Verschleiss und Oberflaechenguete bei der spanenden Bearbeitung im Hinblick auf eine adaptive Prozessregelung. Westdeutscher Verlag.

[22] Kamm H., 1977. Beitrag zur Optimierung des Messerkopfraesens. Dissertation, TH Karlsruhe.

[23] Koening W., Essel K., 1976. Spezifische Schnittkraftwerte fuer die Zespanung metallischer Werkstoffe. Verlag Stahleisen.

[24] Witte L., 1980. Zerspankraefte beim Drehen und Bohren. Dissertation, TH Aachen.

[25] Gyggax P.E., 1980. Experimental Full Cut Milling Dynamics. Annals Of the CIRP Vol, 61-66.

[26] Christoffel K., 1984. Werkzeugueberwachung beim Bohren und Fraesen. Dissertation, TH Aachen.

[27] Kronenberg M., 1963. Grundzuege der Zerspanungslehre. Springer-Verlag, Band 2.

[28] Kronenberg M., 1963. Grundzuege der Zerspanungslehre. Springer-Verlag, Band 3.

[29] Cheng K., 2009. Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices, 22-30

[30] Merchant E., 1944. Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Placticity Conditions in Orthogonal Cutting.

[31] Kienzle O., 1952. Die Bestimmung von Kraeften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen, 299-305.

[32] Sulzer G., 1980. Vermeidung vor Schneidradern aus Hartmetall beim Walzstoben. Arbeitstagung "Zahnrad und Getriebeuntersuchungen", WZL RWTH Aachen.

[33] Bouzakis K., 1976. Erhohung der Wirtschaflichkeit beim Walzstoben durch Optimierung des Zerspanprozesses und der Werkzeugauslegung. Dissertation, TH Aachen.

[34] Bouzakis K., 1980. Konzept und technologische Grundlangen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungs daten beim Walzfrasen. Habilitation TH Aachen.

[35] Bouzakis K., 1979. Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Zerspan-Kaftkomponenten beim Walzfrasen", 943-950, 1016-1026.

[37] Merchant E., 1983. Modelling of Cutting Force Pulsation in Face-Milling, Cornell University.

[38] Armarego, E.J.A., Whitfield, R.C., 1985. Computer based modeling of popular machining operations for force and power predictions, Annals of the CIRP 34, 65–69.

[39] Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A., 1996. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data, Trans. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 216–224.

[40] Altintas, Y., 2000. Manufacturing Automation, Cambridge University Press.

[41] Αντωνιάδης Α., 2011. Μηχανουργική Τεχνολογία: Κατεργασίες κοπής (Τεύχος Β΄).
[42] White B. and Houshyar A., 1992. Quality and optimum parameter selection in metal cutting. Computers in Industry, 20, 87-98.

[43] Hiziroglu S. and Kosonkorn P., 2006. Evaluation of surface roughness of Thai medium density fiberboard (MDF). Building and Environment, 41, 527-533.

[44] Sharma V.S., Dhiman S., Sehgal R. and Sharma S.K., 2008. Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks. Journal of Intelligent Manufacturing, 19, 473-483.

[45] Sandvik Coromant, 1996. Modern Metal Cutting – a practical handbook. Fair Lawn NJ, Sandvik Coromant.

[46] Kiliçkap E., Çakir Q., Aksoy M. and Ínan A., 2005. Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenized SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 862-867.

[47] Grzesik W., 2008. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. Wear, 265, 327-335.

[48] Chen J.S.B., Huang Y.K. and Chen M.S., 2005. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 1070-1076.

[49] Kang M.C., Kim K.K., Lee D.W., Kim J.S. and Kim N.K., 2001. Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high-speed ball-end milling. International journal of Advanced Manufacturing Technology, 17, 323-329.

[50] Antoniadis A., Savakis C., Bilalis N. and Balouktsis A., 2003. Prediction of surface topomorphy and roughness in ball-end milling. International journal of Advanced Manufacturing Technology, 21, 965-971.

[51] Ko T.J., Kim H.S. and Lee S.S., 2001. Selection of the machining inclination angle in high speed bal end milling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17, 163-170.

[52] Quintana G., Ciurana J. DE and Ribatallada J., 2010. Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations. Materials and Manufacturing Processes, 25, 386-398.

[53] Quintana G., Garcia-Romeu M.L. and Ciurana J., 2011. Surface roughness monitoring application based on artificial neural network for ball end milling operations. Journal of Intelligent Manufacturing, 22, 607-617.

[54] Iqbal A., Ning H., Khan L., Liang N. and Ullah Dar N., 2008. Modelling the effect of cutting parameters in MQL-employed finish hard milling process using D-optimal method. *Journal of Materials Processing Technology*, 199, 379-390.

ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ

Δυνάμεις κοπής κατά τη χ-διεύθυνση

AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx			
6	0,3	0,3	0,2	0	0	31,74			
18	0,3	0,3	0,6	0	0	49,56			
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
54	0,3	0,3	0,2	0	0	33,45			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx				
8	0,3	0,6	0,2	0	0	45,65				
20	0,3	0,3	0,6	0	0	75,2				
	UPP									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
A/A 56	t z 0,3	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 0	ω 0	F _x 43,21				



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx				
5	0,6	0,3	0,2	0	0	61,4				
17	0,6	0,3	0,6	0	0	107,91				
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ										
OM	OPP	OIIC) ΚΑ	BE	10					
A/A	OPP t _z	t _{xy}	f _z	φ	ω	Fx				
OM A/A 53	OPP t _z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 0	ω 0	F _x 63,72				



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
7	0,6	0,6	0,2	0	0	86,91				
19	0,6	0,6	0,6	0	0	168,21				
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО					
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
55	0,6	0,6	0,2	0	0	82,76				
67	0,6	0,6	0,6	0	0	163,09				



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	F _x			
30	0,3	0,3	0,2	0	5	37,84			
42	0,3	0,3	0,6	0	5	68,12			
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
	OPP	ОПО	<u>) </u>	ΑΓΙ	0				
A/A	OPP tz	t _{xy}	Γ fz	φ	Ο ω	Fx			
A/A 78	0 PP t _z 0,3	опс t _{xy} 0,3) ПЛ f _z 0,2	Φ 0	Ο ω 5	F _x 31,25			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
32	0,3	0,6	0,2	0	5	47,85			
44	0,3	0,6	0,6	0	5	91,06			
OM	OPP	ОПО	ОΠΛ	ΑΓ	0				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
80	0,3	0,6	0,2	0	5	34,91			
92	0,3	0,6	0,6	0	5	81,54			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
31	0,6	0,6	0,2	0	5	100,59				
43	0,6	0,6	0,6	0	5	188,72				
OM	OPP	ОПО) ПЛ	ΑΓΙ	0					
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
79	0,6	0,6	0,2	0	5	77,88				
91	0,6	0,6	0,6	0	5	180,42				



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx			
29	0,6	0,3	0,2	0	5	76,9			
41	0,6	0,3	0,6	0	5	136,47			
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
OM	OPP	ОПС) ΠΛ		0				
OM A/A	OPP t _z	ОП(t _{xy}	<mark>f</mark> z	ΑΓ Ι φ	О З	Fx			
OM A/A 77	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,3	Ο ΠΛ f _z 0,2	ΑΓ φ	Ο ω 5	Fx 68,12			



AN ⁻	TIPP	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HTI	KO
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
2	0,3	0,3	0,2	5	0	68,36
14	0,3	0,3	0,6	5	0	97,17
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
58	0,3	0,3	0,2	5	0	48,83
70	0,3	0,3	0,6	5	0	78,61



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
4	0,3	0,6	0,2	5	0	98,39			
16	0,3	0,6	0,6	5	0	156,74			
OM	OPP	ОПО	ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
00									
60	0,3	0,6	0,2	5	0	70,56			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fx			
1	0,6	0,3	0,2	5	0	111,82			
13	0,6	0,3	0,6	5	0	168,95			
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
	UFF								
A/A	t _z	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
A/A 57	t z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 5	ω 0	Fx 78,37			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx				
3	0,6	0,6	0,2	5	0	160,4				
15	0,6	0,6	0,6	5	0	279,95				
OM										
	UFF	UIIC								
A/A	t _z	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx				
A/A 59	t z 0,6	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 0	Fx 113,77				



AN ⁻	TIPP	ОПС) ΕΛ	KΤΙ	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
10	0,3	0,3	0,2	5	0	35,89
22	0,3	0,3	0,6	5	0	69,82
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fx
50	0,3	0,3	0,2	5	0	42,24
62	0,3	0,3	0,6	5	0	79,59



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx		
12	0,3	0,6	0,2	5	0	49,07		
24	0,3	0,6	0,6	5	0	98,39		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
OM	OPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO			
OM A/A	OPP t _z	ОП(t _{xy}	Ο ΕΛ f _z	ΚΤΙ φ	ΚΟ 3	F _x		
OM A/A 52	OPP t _z 0,3	ОПС t _{xy} 0,6	Ο ΕΛ f _z 0,2	ΚΤΙ φ 5	ΚΟ ω 0	F _x 49,8		



AN'	ΓIPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
9	0,6	0,3	0,2	5	0	53,71
21	0,6	0,3	0,6	5	0	107,91
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KT	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
49	0,6	0,3	0,2	5	0	73,97



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΕΛ	KΤΙ	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
11	0,6	0,6	0,2	5	0	83,98
23	0,6	0,6	0,6	5	0	163,33
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
51	0,6	0,6	0,2	5	0	85,69
				_		



AN'	ΓΙΡΡ	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	F _x	
26	0,3	0,3	0,2	5	5	65,43	
38	0,3	0,3	0,6	5	5	89,36	
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΛΙΑΤΡΗΤΙΚΟ							
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO	
OM A/A	OPP tz	ОП(t _{xy}	Ο ΔΙΑ f _z	ATP φ	ω	KO Fx	
OM A/A 82	OPP t _z 0,3	ОПС t _{xy} 0,3	ο ΔΙΑ f _z 0,2	Φ	ΗΤ ω	KO Fx 36,38	



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HTI	KO
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
28	0,3	0,6	0,2	5	5	77,88
40	0,3	0,6	0,6	5	5	126,46
OM	OPP	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HT	KO
		0110				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
A/A 84	t _z 0,3	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _x 48,34



AN ⁻	TIPP	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HTI	KO
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
25	0,6	0,3	0,2	5	5	115,97
37	0,6	0,3	0,6	5	5	176,03
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
81	0,6	0,3	0,2	5	5	65,43
93	0,6	0,3	0,6	5	5	125



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΔΙΑ	\TP	HTI	KO		
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ε	Fx		
27	0,6	0,6	0,2	5	5	148,93		
39	0,6	0,6	0,6	5	5	251,71		
	UPP							
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx		
A/A 83	0,6	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _x 94,97		



AN'	TIPP	ОПС) ΕΛ	۷K.	TIK	0			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx			
34	0,3	0,3	0,2	5	5	30,52			
46	0,3	0,3	0,6	5	5	54,44			
OM	ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
		0110							
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx			
A/A 74	t _z 0,3	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _x 25,39			



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
36	0,3	0,6	0,2	5	5	40,77
48	0,3	0,6	0,6	5	5	72,27
OM	OPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fx
A/A 76	t _z 0,3	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _x 27,83



AN ⁻	TIPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fx
33	0,6	0,3	0,2	5	5	51,27
45	0,6	0,3	0,6	5	5	101,07
014		0 - 4			1/0	
OM	OPP	ОПО) ΕΛ	KTI	KÜ	
A/A	OPP tz	ОПС t _{xy}	J ΕΛ fz	φ	<u>κο</u>	Fx
ОМ А/А 73	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,3	Ο ΕΛ f _z 0,2	φ 5	ко з 5	Fx 59,08



AN	ΓIPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fx
35	0,6	0,6	0,2	5	5	78,86
47	0,6	0,6	0,6	5	5	144,29
OM	OPP	ОПС	<u>) Εν</u>	KTI	KO	
OM A/A	OPP t _z	ОПС t _{xy}	Γ _z	φ	ΚΟ ω	Fx
ОМ А/А 75	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,6	ο ΕΛ f _z 0,2	ΚΤΙ φ 5	ΚΟ ω 5	F _x 66,89



Δυνάμεις κοπής κατά τη γ-διεύθυνση

ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
6	0,3	0,3	0,2	0	0	6,84		
18	0,3	0,3	0,6	0	0	11,72		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
OM	OPP	ОПС) KA	ΘΕ	ТО			
OM A/A	OPP tz	ОПС t _{xy}	fz	φ	ΤΟ ω	Fy		
OM A/A 54	OPP t _z 0,3	ОПС t _{xy} 0,3	0 KA f _z 0,2	ΘΕ φ 0	το ω 0	F _y -20,02		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy			
8	0,3	0,6	0,2	0	0	19,04			
20	0,3	0,3	0,6	0	0	30,76			
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
56	0,3	0,6	0,2	0	0	-39,06			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy			
5	0,6	0,3	0,2	0	0	11,47			
17	0,6	0,3	0,6	0	0	15,14			
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy			
53	0,6	0,3	0,2	0	0	-46,87			
65	0,6	0,3	0,6	0	0	-56,40			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
7	0,6	0,6	0,2	0	0	28,08		
19	0,6	0,6	0,6	0	0	53,96		
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
55	0,6	0,6	0,2	0	0	-78,12		
67	0,6	0,6	0,6	0	0	-111,08		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
30	0,3	0,3	0,2	0	5	20,75		
42	0,3	0,3	0,6	0	5	35,16		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
	OPP	OIIC	אוו נ		U			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
A/A 78	t z 0,3	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 0	υ ω 5	F _y -33,45		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
32	0,3	0,6	0,2	0	5	35,16		
44	0,3	0,6	0,6	0	5	66,41		
OM	OPP	ОПО	О ПЛ	ΑΓ	0			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
80	0,3	0,6	0,2	0	5	-55,18		
92	0,3	0,6	0,6	0	5	-101,56		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
31	0,6	0,6	0,2	0	5	42,48		
43	0,6	0,6	0,6	0	5	85,94		
OM	OPP	ОПО	ОΠΛ	ΑΓ	0			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
79	0,6	0,6	0,2	0	5	-97,66		
91	0,6	0,6	0,6	0	5	-176,76		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy			
29	0,6	0,3	0,2	0	5	16,36			
41	0,6	0,3	0,6	0	5	37,6			
OM	ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy			
A/A 77	t _z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 0	ω 5	F _y -66,65			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
2	0,3	0,3	0,2	5	0	29,3			
14	0,3	0,3	0,6	5	0	43,46			
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy			
58	0,3	0,3	0,2	5	0	-16,85			
70	0,3	0,3	0,6	5	0	-33,94			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
4	0,3	0,6	0,2	5	0	35,4			
16	0,3	0,6	0,6	5	0	55,66			
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy			
60	0,3	0,6	0,2	5	0	-31,74			
72	0,3	0,6	0,6	5	0	-62,01			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
1	0,6	0,3	0,2	5	0	-47,85			
13	0,6	0,3	0,6	5	0	-64,7			
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ									
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
OM A/A	OPP t _z	ОП(t _{xy}	ο ΔΙΑ f _z	Φ	υ	KO Fy			
OM A/A 57	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,3	Ο ΔΙΑ f _z 0,2	Φ	ΗΤ ω	KO F _y -20,02			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
3	0,6	0,6	0,2	5	0	-51,51		
15	0,6	0,6	0,6	5	0	-77,39		
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	ΉT	IKO		
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
59	0,6	0,6	0,2	5	0	-44,16		
71	0,6	0,6	0,6	5	0	-126,22		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
10	0,3	0,3	0,2	5	0	29,93		
22	0,3	0,3	0,6	5	0	48,1		
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
50	0,3	0,3	0,2	5	0	-56,4		
62	0,3	0,3	0,6	5	0	-88,62		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
12	0,3	0,6	0,2	5	0	41,02		
24	0,3	0,6	0,6	5	0	88,38		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
	UPP	UIIC		I V I I				
A/A	t _z	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
A/A 52	t z 0,3	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 0	F _y -83,98		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
9	0,6	0,3	0,2	5	0	26,86		
21	0,6	0,3	0,6	5	0	55,18		
OM	OPP	ОПО) ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
49	0,6	0,3	0,2	5	0	-94,73		
61	0,6	0,3	0,6	5	0	-145,26		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
11	0,6	0,6	0,2	5	0	52		
23	0,6	0,6	0,6	5	0	107,42		
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
51	0,6	0,6	0,2	5	0	-132,32		
63	0,6	0,6	0,6	5	0	-221,19		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
26	0,3	0,3	0,2	5	5	37,6		
38	0,3	0,3	0,6	5	5	59,81		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO		
OM A/A	OPP t _z	ОПС t _{xy}	σ ΔΙΑ f _z	ATP φ	HTI 3	KO Fy		
OM A/A 82	OPP t _z 0,3	ОПС t _{xy} 0,3	ο ΔΙΑ f _z 0,2	4TP φ 5	ΗΤ ω 5	KO F _y -25,63		



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
28	0,3	0,6	0,2	5	5	-48,83			
40	0,3	0,6	0,6	5	5	-99,85			
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy			
84	0.3	0,6	0,2	5	5	46,87			
	- 1-								



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
25	0,6	0,3	0,2	5	5	-54,44		
37	0,6	0,3	0,6	5	5	-78,86		
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO		
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
81	0,6	0,3	0,2	5	5	-26,86		
93	0,6	0,3	0,6	5	5	52,73		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
27	0,6	0,6	0,2	5	5	-59,81		
39	0,6	0,6	0,6	5	5	-109,13		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
A/A 83	t _z 0,6	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _y -53,71		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
34	0,3	0,3	0,2	5	5	30,27		
46	0,3	0,3	0,6	5	5	57,13		
OM	OPP	ОПО) ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
74	0,3	0,3	0,2	5	5	-53,22		
86	0,3	0,3	0,6	5	5	-93,26		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
36	0,3	0,6	0,2	5	5	50,78		
48	0,3	0,6	0,6	5	5	98,63		
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fy		
76	0,3	0,6	0,2	5	5	-77,15		
88	0,3	0,6	0,6	5	5	-138,18		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ							
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy	
33	0,6	0,3	0,2	5	5	35,16	
45	0,6	0,3	0,6	5	5	64,45	
OM	OPP	ОПС	Ο ΕΛ	KTI	KO		
A / A							
AVA	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy	
73	t _z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 5	3 5	F _y -94,73	



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fy		
35	0,6	0,6	0,2	5	5	60,79		
47	0,6	0,6	0,6	5	5	120,12		
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fy		
75	0,6	0,6	0,2	5	5	-133,54		
87	0,6	0,6	0,6	5	5	-229,98		



<u>Δυνάμεις κοπής κατά τη z-διεύθυνση</u>

ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
6	0,3	0,3	0,2	0	0	54,20		
18	0,3	0,3	0,6	0	0	82,52		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
A/A 54	t _z 0,3	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 0	ω 0	F _z 70,31		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
8	0,3	0,6	0,2	0	0	77,15		
20	0,3	0,3	0,6	0	0	113,28		
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	TO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
56	0,3	0,6	0,2	0	0	93,26		
68	0,3	0,6	0,6	0	0	98,63		



AN'	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz			
5	0,6	0,3	0,2	0	0	98,15			
17	0,6	0,3	0,6	0	0	153,81			
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
53	0,6	0,3	0,2	0	0	133.79			
65	0,6	0,3	0,6	0	0	158,69			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΚΑΘΕΤΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
7	0,6	0,6	0,2	0	0	131,84		
19	0,6	0,6	0,6	0	0	213,38		
OM	OPP	ОПО) KA	ΘΕ	ТО			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
55	0,6	0,6	0,2	0	0	166,02		
67	0,6	0,6	0,6	0	0	227,54		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ										
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz				
30	0,3	0,3	0,2	0	5	61,04				
42	0,3	0,3	0,6	0	5	91,8				
OMO	OPP	ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz				
A/A 78	t _z 0,3	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 0	ω 5	Fz 63,48				



AN ⁻	TIPP	ОПС) ΠΛ	ΑΓΙ	0	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz
32	0,3	0,6	0,2	0	5	82,52
44	0,3	0,6	0,6	0	5	130,86
OM	OPP	ОПО	ЭΠΛ	ΑΓ	0	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz
80	0,3	0,6	0,2	0	5	74,22
92	03	0.6	0.6	0	5	113.77



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
31	0,6	0,6	0,2	0	5	142,58			
43	0,6	0,6	0,6	0	5	221,19			
OM	OPP	ОПО	ЭΠΛ	ΑΓ	0				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
79	0,6	0,6	0,2	0	5	137,21			
91	0,6	0,6	0,6	0	5	219,73			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΠΛΑΓΙΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
29	0,6	0,3	0,2	0	5	104,61		
41	0,6	0,3	0,6	0	5	161,62		
OM	OPP	ОПО	ОΠΛ	ΑΓ	0			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
77	0,6	0,3	0,2	0	5	114,75		
89	0.6	03	0.6	0	5	176 76		



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
2	0,3	0,3	0,2	5	0	93,26			
14	0,3	0,3	0,6	5	0	112,79			
OM	OPP	ОПО	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	t,	t	f	~	63	E			
		۰ху	۰z	Ψ	8	Γz			
58	0,3	•xy 0,3	0,2	Ψ 5	0	г _z 99,61			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
4	0,3	0,6	0,2	5	0	120,6			
16	0,3	0,6	0,6	5	0	160,16			
OM	OPP	ОПО) ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
60	0,3	0,6	0,2	5	0	138,67			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
1	0,6	0,3	0,2	5	0	153,32		
13	0,6	0,3	0,6	5	0	184,08		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO		
OM A/A	OPP t _z	ОПС t _{xy}	Γ _z	ATP φ	3 3	KO Fz		
ОМ А/А 57	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,3	ο ΔΙΑ f _z 0,2	4TP φ 5	ΗΤ ω 0	KO F _z 156,74		



AN'	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz			
3	0,6	0,6	0,2	5	0	191,41			
15	0,6	0,6	0,6	5	0	256,84			
OM	OPP	ОПО) ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	4								
	τ _z	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
59	τ _z 0,6	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 0	F _z 212,4			



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz
10	0,3	0,3	0,2	5	0	72,75
22	0,3	0,3	0,6	5	0	129,39
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO	
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz
50	0,3	0,3	0,2	5	0	109,37
62	0,3	0,3	0,6	5	0	148,93



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
12	0,3	0,6	0,2	5	0	101,07		
24	0,3	0,6	0,6	5	0	179,2		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
				N H	NO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
A/A 52	t _z 0,3	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 0	F _z 143,55		



AN ⁻	ΓΙΡΡ	ОПС) ΕΛ	KTI	KO								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz							
9	0,6	0,3	0,2	5	0	104							
21	0,6	0,3	0,6	5	0	172,85							
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KΤΙ	ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz							
A/A 49	t _z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 5	ω 0	F _z 176,76							



AN	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
11	0,6	0,6	0,2	5	0	146,97			
23	0,6	0,6	0,6	5	0	250,49			
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
51	0,6	0,6	0,2	5	0	214,36			
63	0,6	0,6	0,6	5	0	282,23			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
26	0,3	0,3	0,2	5	5	83,01		
38	0,3	0,3	0,6	5	5	101,07		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO		
OM A/A	OPP tz	ОПС t _{xy}	Ο ΔΙΑ f _z	ATP φ	ω	KO Fz		
OM A/A 82	OPP t _z 0,3	ОПС t _{xy} 0,3	ο ΔΙΑ f _z 0,2	4TP φ 5	ΗΤ ω 5	KO Fz 73,73		



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz			
28	0,3	0,6	0,2	5	5	106,45			
40	0,3	0,6	0,6	5	5	129,39			
OM	OPP	ОПО	ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
84	0,3	0,6	0,2	5	5	96,19			
96	0,3	0,6	0,6	5	5	74,71			



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz			
25	0,6	0,3	0,2	5	5	146,48			
37	0,6	0,3	0,6	5	5	169,43			
OM	OPP	ОПО) ΔΙΑ	\TP	HT	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz			
81	0,6	0,3	0,2	5	5	126,46			
93	0,6	0,3	0,6	5	5	184,57			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz		
27	0,6	0,6	0,2	5	5	178,22		
39	0,6	0,6	0,6	5	5	224,12		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΟ								
OM	OPP	ОПС	Ο ΔΙΑ	\TP	HT	KO		
OM A/A	OPP t _z	ОПС t _{xy}	Ο ΔΙΑ f _z	ΔTP φ	υ	KO Fz		
OM A/A 83	OPP t _z 0,6	ОПС t _{xy} 0,6	Ο ΔΙΑ f _z 0,2	Φ 5	ΗΤ ω	KO Fz 162,6		



AN ⁻	ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz			
34	0,3	0,3	0,2	5	5	77,64			
46	0,3	0,3	0,6	5	5	129,39			
OM	OPP	ОПО) ΕΛ	KTI	KO				
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz			
74	0,3	0,3	0,2	5	5	71,78			
86	0,3	0,3	0,6	5	5	103,52			



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz		
36	0,3	0,6	0,2	5	5	106,45		
48	0,3	0,6	0,6	5	5	161,13		
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
76	0,3	0,6	0,2	5	5	97,66		
88	0,3	0,6	0,6	5	5	135,74		



ΑΝΤΙΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ							
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	3	Fz	
33	0,6	0,3	0,2	5	5	112,79	
45	0,6	0,3	0,6	5	5	162,11	
OM	OPP	ОПО	Ο ΕΛ	KTI	KO		
A / A							
AVA	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz	
73	t _z 0,6	t _{xy} 0,3	f _z 0,2	φ 5	З 5	F _z 138,67	



AN'	TIPP	ОПС) ΕΛ	KTI	KO			
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	З	Fz		
35	0,6	0,6	0,2	5	5	159,18		
47	0,6	0,6	0,6	5	5	239,26		
ΟΜΟΡΡΟΠΟ ΕΛΚΤΙΚΟ								
		0110						
A/A	tz	t _{xy}	fz	φ	ω	Fz		
A/A 75	t _z 0,6	t _{xy} 0,6	f _z 0,2	φ 5	ω 5	F _z 166,99		

