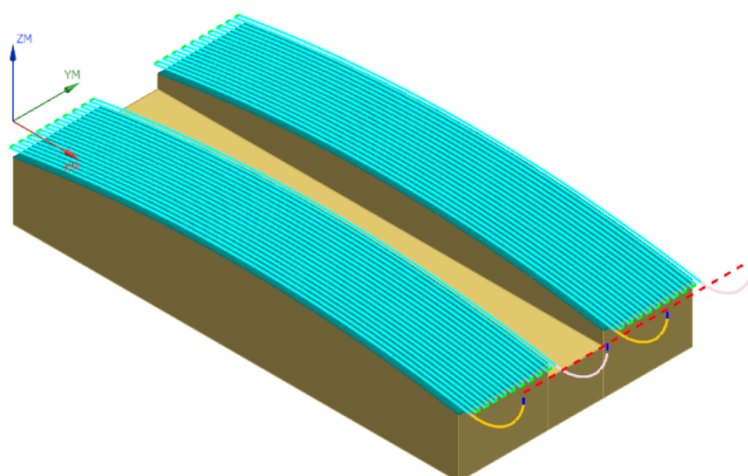




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΕ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**



**ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ  
ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

*"We can tell other people about - having faith. What we had faith in. What we found important enough to fight for. It's not whether you were right or wrong, but how much faith you were willing to have, that decides the future."*

From the man who made the impossible possible

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ολοκληρώνεται και η πορεία μου ως φοιτητής στο Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την καθοδήγηση και την άμεση βοήθεια που μου παρείχε τα τελευταία τρία χρόνια. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους πρώην προπτυχιακούς φοιτητές Α. Σίδερη και Μ. Αντωνίου για την συνεργασία μας και τη συμβολή τους στην παρούσα εργασία. Επίσης ευχαριστώ τους νέους φίλους που έκανα στο εργαστήριο και συγκεκριμένα τους Βαγγέλη Νικολιδάκη, Μίλτο Καμπάκη και Χαρά Ευσταθείου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στους παλιούς μου φίλους Νίκο Αναγνωστάκη και Δημήτρη Κωνσταντάκη για όλες τις ωραίες στιγμές που είχαμε αυτά τα επτά χρόνια. Ξεχωριστές ευχαριστίες οφείλω στη Μαρία για τη στήριξη, την υπομονή και την αγάπη της. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου για τη συνεχή υποστήριξη που μου παρέχει.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας .....	1
1.2 Δομή της εργασίας .....	1
<b>2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Βελτιστοποίηση μονοπατιών σε φραιζάρισμα τριών αξόνων .....	3
2.2 Βελτιστοποίηση μονοπατιών σε φραιζάρισμα πέντε αξόνων .....	12
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....</b>	<b>20</b>
3.1 Εξοπλισμός πειραμάτων .....	20
3.1.1 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco .....	20
3.1.2 Συσκευή προρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco .....	21
3.1.3 Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642 .....	21
3.1.4 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης Kennametal .....	22
3.1.5 Δυναμόμετρο Kistler .....	22
3.1.6 Τραχύμετρο Diavite Compact .....	23
3.2 Εκτέλεση πειραμάτων .....	24
3.3 Αποτελέσματα .....	28
<b>4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....</b>	<b>33</b>
4.1 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου .....	33
4.1.1 Γεωμετρία κατεργαζόμενου τεμαχίου .....	33
4.1.2 Εργαλείο κοπής .....	34
4.1.3 Μονοπάτι εργαλείου από λογισμικό CAD/CAM .....	34
4.2 Βασικοί υπολογισμοί του μοντέλου .....	35
4.2.1 Διακριτοποίηση επιφάνειας .....	36
4.2.2 Υπολογισμός κάθετου διανύσματος και κέντρου σε κάθε στοιχείο .....	36
4.2.3 Εξαγωγή σημείων CL από το NC αρχείο και υπολογισμός σημείων CC .....	37
4.2.4 Εύρεση γωνιών $\phi$ και $\omega$ και υπολογισμός ταχύτητας περιστροφής εργαλείου .....	38
4.2.5 Εύρεση κατεύθυνσης κοπής .....	40
4.2.6 Διαδικασία βελτιστοποίησης .....	42
4.3 Αποτελέσματα μοντέλου .....	45
<b>5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ .....</b>	<b>48</b>
5.1 Δημιουργία γεωμετρίας και NC αρχείων από το Siemens NX 11.0 .....	48
5.2 Πρόγραμμα βελτιστοποίησης τροχιάς εργαλείου Optipath .....	50
5.3 Πειραματική διαδικασία και εξοπλισμός .....	53
5.4 Αποτελέσματα τραχυμετρήσεων .....	54
<b>6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>56</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>57</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Οι κατεργασίες μορφοποίησης με αφαίρεση υλικού αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων, είτε άμεσα από την κατεργασία μεταλλικών υλικών, είτε έμμεσα μέσω της κατασκευής καλουπιών, για την παραγωγή προϊόντων τόσο από μη μεταλλικά υλικά, όσο και για την παραγωγή προϊόντων πολύπλοκης γεωμετρίας από μεταλλικά υλικά μέσω χύτευσης ή άλλων διαμορφωτικών μεθόδων. Τις τελευταίες δεκαετίες το υψηλό κόστος των κατεργασιών αυτών, επέβαλε την αναζήτηση μεθόδων αύξησης της παραγωγικότητας, η οποία ισοδυναμεί με βέλτιστη επιλογή των χρησιμοποιούμενων συνθηκών κοπής και ταυτόχρονη χρήση της μέγιστης ισχύος των σύγχρονων εργαλειομηχανών. Παράλληλα, ο σφοδρός ανταγωνισμός ανάμεσα στις κατασκευάστριες εταιρείες και το άνοιγμα των αγορών, επέτειναν την ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγικότητα και καλύτερη ποιότητα και αξιοπιστία των προϊόντων. Από την άλλη πλευρά οι τεχνολογίες αυτοματοποίησης στον χώρο της παραγωγής με τις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές CNC και τα συστήματα CAD/CAM, απαιτούν με τη σειρά τους υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, οι οποίοι δυστυχώς δεν μπορούν να αξιοποιηθούν, διότι η επιλογή των τεχνολογικών παραμέτρων των κατεργασιών βασίζεται απλά στην εμπειρία των μηχανικών παραγωγής.

Προκειμένου λοιπόν η σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία να επιτύχει αύξηση της παραγωγικότητας με χαμηλό κόστος, αλλά και να διασφαλίσει την άριστη ποιότητα των προϊόντων της, οφείλει να κάνει βέλτιστη χρήση του συστήματος εργαλειομηχανή – κοπτικό εργαλείο – κατεργαζόμενο τεμάχιο σε συνδυασμό με κατάλληλη επιλογή των τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας. Δεδομένου επίσης ότι οι σύγχρονες εργαλειομηχανές και τα υλικά των κοπτικών εργαλείων έχουν βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό τα τελευταία χρόνια, το κύριο βάρος πέφτει τόσο στην επιλογή των βέλτιστων τεχνολογικών παραμέτρων κοπής πριν από την κατεργασία, όσο και στην υιοθέτηση κατάλληλων μετροτεχνικών μεθόδων ελέγχου των παραγόντων της κοπής κατά την κατεργασία, οι οποίες διασφαλίζουν την ποιότητα του προϊόντος.

Το αντικείμενο της προτεινόμενης μεταπτυχιακής εργασίας αφορά τις κατεργασίες κοπής με αφαίρεση υλικού με φραιζάρισμα με κονδυλοφόρα εργαλεία σφαιρικής απόληξης, οι οποίες αποτελούν μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μηχανουργικές κατεργασίες αποπεράτωσης στη βιομηχανία. Για τη βέλτιστη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας, ιδιαίτερα σε κοπές πολυαξονικών επιφανειών με περιορισμένων δυνατοτήτων ψηφιακά κέντρα κατεργασίας, στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια μεθοδολογία προσδιορισμού βέλτιστων τροχιών του κοπτικού εργαλείου λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική κλίση του εργαλείου ως προς την κατεργασμένη επιφάνεια σε κάθε θέση της. Η επιλογή των συνθηκών γίνεται μέσα από βάση τεχνολογικών πληροφοριών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και περιλαμβάνει τις προκύπτουσες δυνάμεις κοπής και τραχύτητες επιφανειών για μεγάλη ποικιλία συνθηκών κατεργασίας.

### 1.2 Δομή εργασίας

Το **κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή όπου παρουσιάζεται ο σκοπός και το αντικείμενο της εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 2** γίνεται μια βιβλιογραφική αναφορά στη βελτιστοποίηση μονοπατιών με εργαλεία σφαιρικής απόληξης τόσο σε κατεργασίες τριών αξόνων όσο και σε πέντε αξόνων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθόδους αλλά και στα μοντέλα βελτιστοποίησης που ανέπτυξαν διάφοροι ερευνητές.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η δημιουργία της βάσης δεδομένων του μοντέλου. Η βάση αυτή αποτελείται από πειράματα τραχύτητας και δυνάμεων κοπής για διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Το **κεφάλαιο 4** αναφέρεται στο μοντέλο υπολογισμού των βέλτιστων τροχιών και στο μοντέλο πολυκριτήριας βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε.

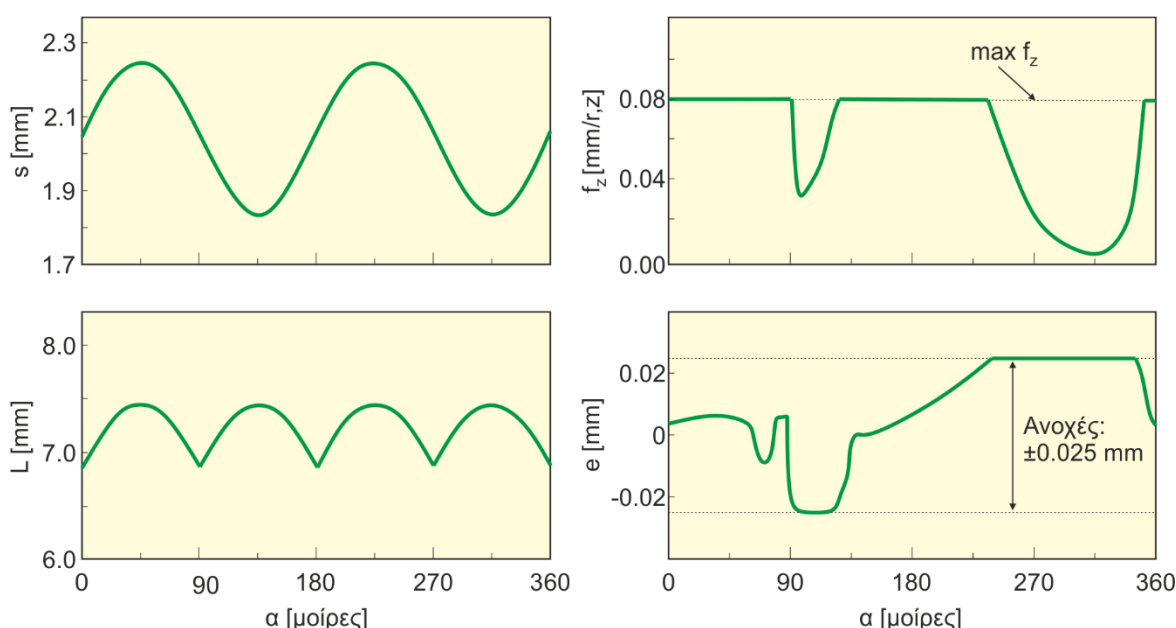
Τέλος στο **κεφάλαιο 5** γίνεται η πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου βελτιστοποίησης. Η παράμετρος ελαχιστοποίησης ήταν μόνο η τραχύτητα της επιφάνειας.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η βελτιστοποίηση μονοπατιών σε κατεργασίες φραιζάρισμα στο φραιζάρισμα με εργαλεία σφαιρικής απόληξης. Ο τρόπος με τον οποίο τα σύγχρονα συστήματα CAD/CAM εξαγωγή τον κώδικα NC γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις διαστάσεις του τεμαχίου αγνοώντας όλες τις τεχνολογικές παραμέτρους της κατεργασίας. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να δημιουργήσουν μονοπάτια που να προσαρμόζονται στις συνθήκες κοπής και σε όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προς κατεργασία τεμαχίου. Ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι το εργαλείο στο οποίο βασίστηκαν πολλοί. Συνδυάζοντας λοιπόν τις γνώση τις κλασικής θεωρίας κοπής, των συστημάτων παραγωγής με υπολογιστή (CAM) και των μεθόδων βελτιστοποίησης ανοίγεται ένα νέο κεφάλαιο στις μηχανουργικές κατεργασίες, η βελτιστοποίηση μονοπατιών (toolpath optimization). Η βελτιστοποίηση μπορεί να υπάρξει τόσο σε φραιζάρισμα τριών όσο και σε πέντε αξόνων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διάφορων ερευνητών στο πεδίο αυτό. Οι προσεγγίσεις διαφέρουν μεταξύ τους και γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι παράμετροι βελτιστοποίησης είναι πάρα πολλοί. Η κατεύθυνση της βελτιστοποίησης εξαρτάται από τις προτιμήσεις του κάθε μηχανικού και τις ιδιότητες που επιθυμεί να έχει το μονοπάτι.

### 2.1 Βελτιστοποίηση μονοπατιών σε φραιζάρισμα τριών αξόνων

Οι **Feng και Su [1]** επικεντρώθηκαν στη βελτιστοποίηση μονοπατιών επιλέγοντας μια κατάλληλη κατεύθυνση πρόωσης και πρόωσης ανά περιστροφής και δόντι ( $f_z$ ). Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του χρόνου κατεργασίας το οποίο πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένους περιορισμούς όπως το ύψος ακίδας (scallop height) στην κατεργασμένη επιφάνεια, τις αποκλίσεις της κατεργασμένης επιφάνειας από την πραγματική ( $e$ ) και την τήρηση μιας τιμής  $f_z$  κάτω από ένα συγκριμένο όριο. Η κατεύθυνση της πρόωσης αποτελεί μεταβλητή του προβλήματος. Η επιλογή της κατάλληλης κατεύθυνσης της πρόωσης είναι αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης του ύψους ακίδας. Η εκλογή του βέλτιστου  $f_z$  προκύπτει από ένα αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων κοπής το οποίο λαμβάνει υπόψη του τις αποκλίσεις της επιφάνειας.



Σχήμα 2.1: Αποτελέσματα μοντέλου συναρτήσεως της γωνίας  $\alpha$

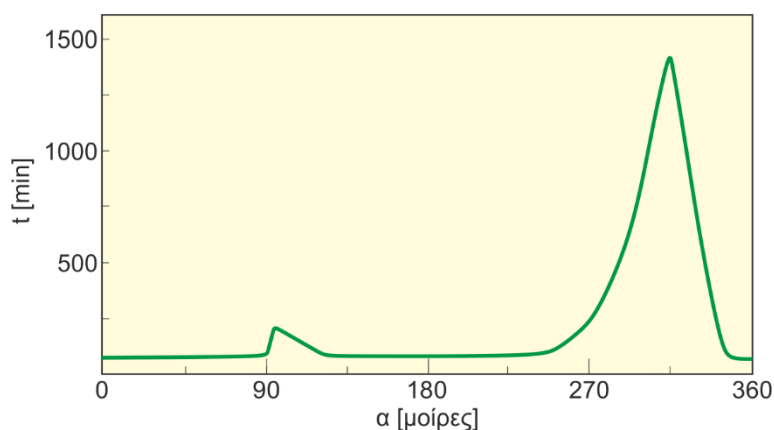
πως αναφέρθηκε νωρίτερα, η κατεύθυνση της πρόωσης αλλά και το  $f_z$  αποτελούν μεταβλητές του προβλήματος αυτού. Ως προς την κατεύθυνση της πρόωσης, το εργαλείο μπορεί να πραγματοποιήσει παλινδρομικές κινήσεις (zig-zag) ή κινήσεις μιας κατεύθυνσης (zig). Η μορφή αυτή των μονοπατιών απαιτεί τον προσδιορισμό της απόστασης των παράλληλων τροχιών σε μια κατεύθυνση κάθετη της πρόωσης. Η νέα αυτή παράμετρος ονομάζεται μήκος βήματος (s). Το μήκος βήματος επηρεάζει άμεσα το ύψος ακίδας και έτσι μεγάλη τιμή του πρώτου μπορεί να μειώσει τον χρόνο κατεργασίας αλλά μπορεί να έχει και ως αποτέλεσμα μεγάλο ύψος ακίδας στη νεοκατεργασμένη επιφάνεια και τελικά ένα προϊόν που δεν τηρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Το  $f_z$  είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από την πραγματική, το οποίο προκαλείται από τις δυνάμεις που ενεργούν στο μηχανισμό της κοπής.

Ο υπολογισμός του χρόνου κατεργασίας απαιτεί αρχικά την εύρεση της κατάλληλης κατεύθυνσης πρόωσης. Στη συνέχεια ορίζεται το μέγιστο δυνατό μήκος βήματος που ικανοποιεί τον περιορισμό του ύψους ακίδας λαμβάνοντας υπόψιν την γεωμετρία του εργαλείου και την κατεύθυνση της πρόωσης. Με αυτό τον τρόπο ορίζεται το μήκος κοπής. Με την επιλογή της βέλτιστης τιμής του  $f_z$  υπολογίζεται ο χρόνος κατεργασίας. Η δημιουργία των μονοπατιών γίνεται με την προβολή τους στο επίπεδο XY του απολύτου συστήματος συντεταγμένων και έτσι καθορίζεται το μήκος τους. Στη συνέχεια επεκτείνονται οι τροχιές αυτές σε μία απόσταση ίση με τη διάμετρο του εργαλείου.

Η στρατηγική φραιζαρίσματος απαιτεί την παλινδρομική κίνηση του εργαλείου όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η κατεύθυνση των τροχιών αυτών μπορεί να είναι υπό γωνία  $\alpha$  σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων.

Για τον υπολογισμό του μήκος βήματος χρησιμοποιείται ένα σχετικό σύστημα συντεταγμένων η αρχή του οποίου βρίσκεται στο κάτω άκρο του εργαλείου και ο άξονας z συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής του εργαλείου. Σε ένα επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση της πρόωσης γίνεται ο υπολογισμός του μήκους βήματος. Παράλληλα υπολογίζεται και το ύψος ακίδας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο δε δίνουν μία μοναδική λύση. Στο σχήμα 2.1 γίνεται φανερό πως η μεταβλητή του προβλήματος, η κατεύθυνση της πρόωσης, δεν είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσει ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα. Αντ' αυτού οι ερευνητές προτείνουν διάφορους συνδυασμούς λύσεων για διαφορετικά πλάνα παραγωγής. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ο χρόνος κατεργασίας

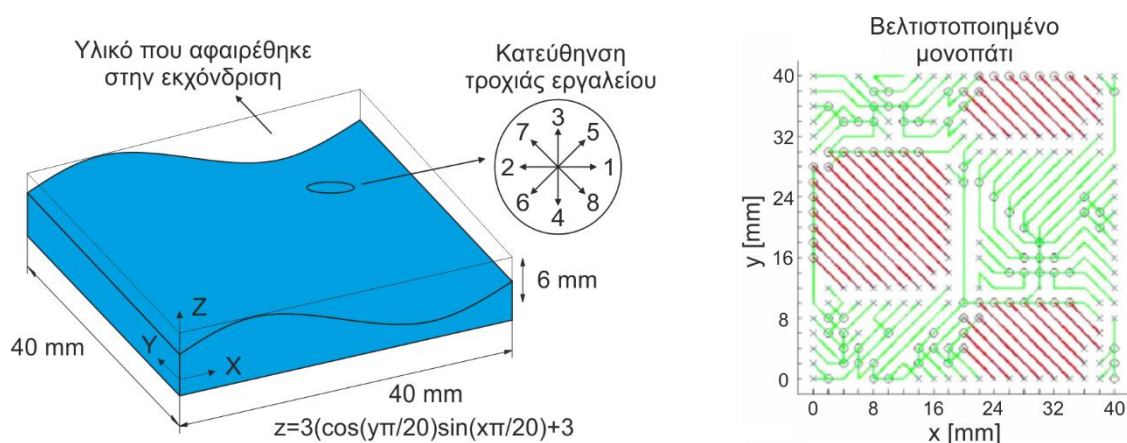


Σχήμα 2.2: Χρόνος κατεργασίας συναρτήσεως της γωνίας  $\alpha$

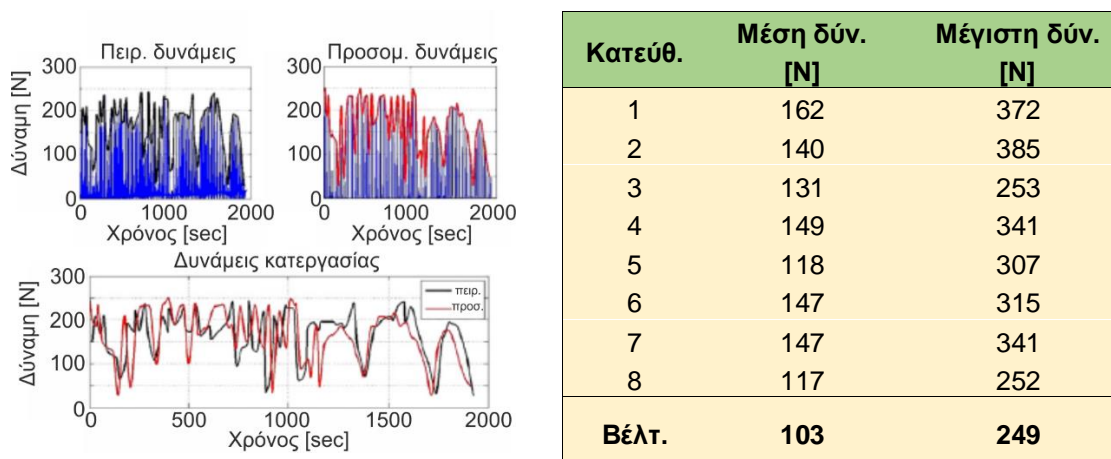


Ο **Lazoglu [2]** και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο ελαχιστοποιεί τις δυνάμεις (μέση τιμή) που δέχεται το εργαλείο στην κατεργασία. Η πρόωση ανά περιστροφή και δόντι, η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος του εργαλείου, το ακτινικό βάθος κοπής καθώς και η δύναμη που προκύπτει σε κάθε κίνηση οριοθετούνται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών και αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Η στρατηγική φρεζαρίσματος είναι παλινδρομική (zig zag) με δυνατότητα κίνησης σε οκτώ διαφορετικές κατευθύνσεις.

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων και τη δημιουργία του μονοπατιού, το κατεργαζόμενο τεμάχιο χωρίζεται σε  $n \times m$  κόμβους. Κάθε κόμβος λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή δύναμης σε σχέση με το γειτονικό του. Μέθοδοι βελτιστοποίησής όπως του πλανόδιου πωλητή αλλά και προσεγγίσεις με τανύοντα δέντρα δοκιμάστηκαν για την επίλυση του προβλήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα τη μέση δύναμη όλου του δέντρου και τη μέση δύναμη μιας διαδρομής. Ο αλγόριθμος του πλανόδιου πολίτη φέρει χειρότερα αποτελέσματα λόγω της μικρής ελευθερίας κίνησης στους κόμβους. Έτσι αλγόριθμοι όπως του Prim εξασφαλίζουν δέντρα ελάχιστου κόστους στα οποία η άφιξη σε ένα κόμβο γίνεται μόνο μια φορά. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται διαδρομές τέτοιες ώστε το εργαλείο να μην περάσει δεύτερη φορά. Ο αλγόριθμος επίσης διασφαλίζει ότι η κάθε τροχιά του εργαλείου θα πρέπει να ξεκινά εκτός του τεμαχίου. Σε αντίθετη περίπτωση οι δυνάμεις είναι μεγάλες.

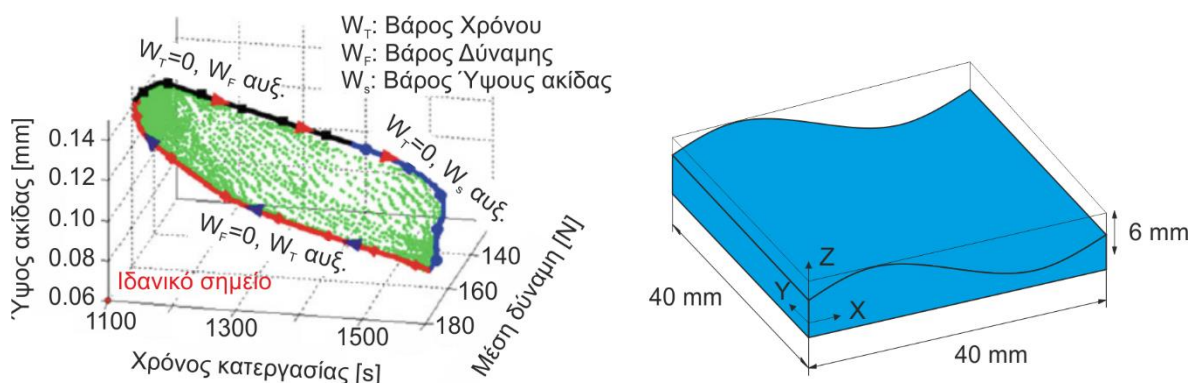


Σχήμα 2.3: Πειραματικό μοντέλο και κατευθύνσεις τροχιάς εργαλείου (αριστερά), βελτιστοποιημένο μονοπάτι (δεξιά)



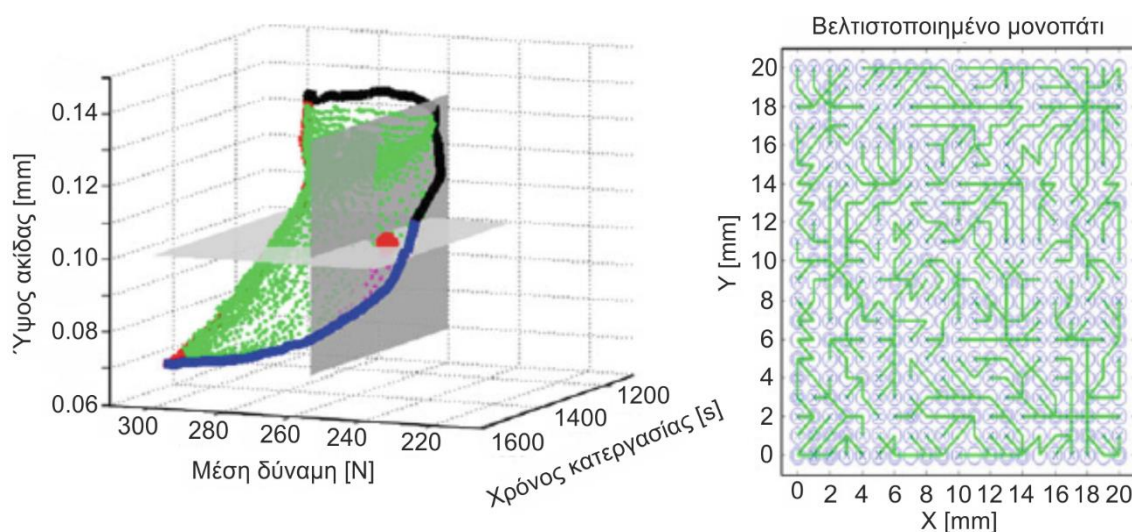
Σχήμα 2.4: Δυνάμεις στην κατεργασία για το βελτιστοποιημένο μονοπάτι (αριστερά), πίνακας δυνάμεων για όλα τα πειράματα (δεξιά)

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε κράμα αλουμινίου Al7039 διαστάσεων 40mm x 40mm x 14mm. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο 17mm με δύο κοπτικές ακμές και γωνία ελίκωσης 30 μοίρες. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 600rpm και πρόωση 48mm/min. Το μέγεθος του κάθε στοιχείου του πλέγματος είχε ακμή 62.5μm. Το ακτινικό βάθος κοπής ήταν στα 2mm. Εκτός από το βελτιστοποιημένο μονοπάτι, οι ερευνητές πραγματοποίησαν άλλα οκτώ πειράματα. Η στρατηγική φραιζαρίσματος σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν μονής κίνησης (zig) σε οκτώ διαφορετικές γωνίες.



Σχήμα 2.5: Μέτωπο pareto και επίδραση βαρών στις παραμέτρους (αριστερά), πειραματική επιφάνεια ελεύθερης μορφής (δεξιά)

Ο **Manav [3]** και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης που αφορά τις προκύπτουσες δυνάμεις, το ύψος ακίδας και τον χρόνο κατεργασίας. Συγκεκριμένα, συνέθεσαν ένα πρόβλημα πολυκριτήριας βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα τη μέση δύναμη που δέχεται το εργαλείο, το μέσο ύψος ακίδας και τον συνολικό χρόνο κατεργασίας μέσα σε ένα εύρος τιμών και με την εισαγωγή βαρών σε κάθε ένα από τα κριτήρια. Η πολυκριτήρια προσέγγιση εξασφαλίζει τις βέλτιστες λύσεις που βρίσκονται στο μέτωπο pareto. Επίσης με τις κατάλληλες τιμές στα βάρη η μέθοδος είναι σε θέση να ελαχιστοποιεί κάθε κριτήριο ξεχωριστά ή και μαζί ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιθυμεί να έχει ο χρήστης κάθε φορά για το μονοπάτι που δημιουργεί.



Σχήμα 2.6: Μέτωπο pareto με τους περιορισμούς (αριστερά), βελτιστοποιημένο μονοπάτι με τη μέθοδο της πολυκριτήριας βελτιστοποίησης (δεξιά)

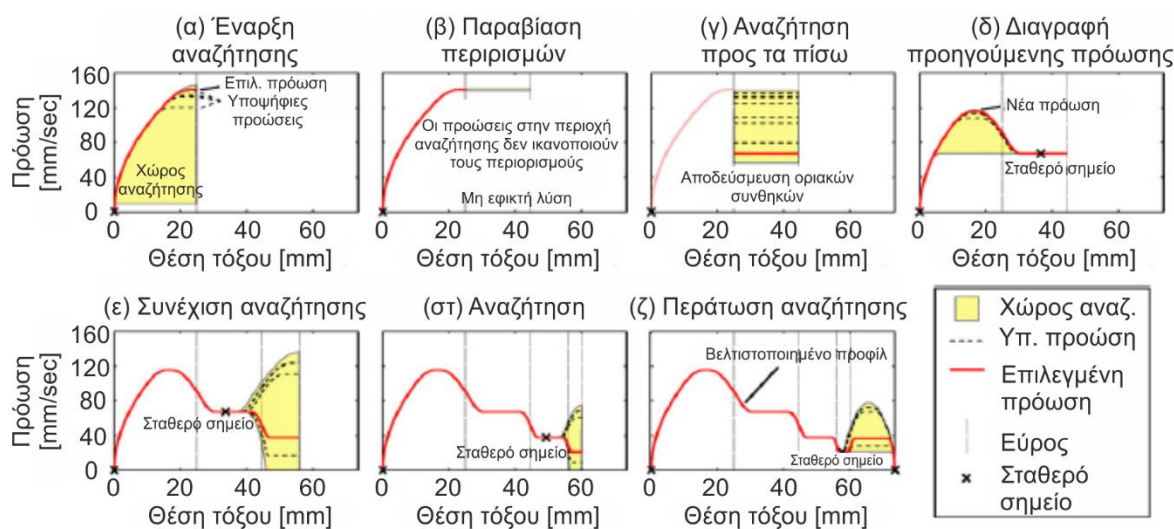
Η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\min z(x) = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m (\lambda_k w_{ki}) x_i$$

όπου  $w$  είναι το βάρος για κάθε εναλλακτική (μέση δύναμη, μέση ύψος ακίδα, χρόνος κατεργασίας) και  $\lambda$  είναι ένα άλλο βάρος που αντιπροσωπεύει το κάθε κριτήριο σε κάθε ακμή του μετώπου pareto. Στο σχήμα 2.5 φαίνονται οι τιμές των εναλλακτικών και το μέτωπο pareto στον χώρο των εφικτών λύσεων καθώς και η μορφή της επιφάνειας.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε εργαλείο σφαιρικής απόληξης από καρβίδιο διαμέτρου 12mm της εταιρίας Sandvik με γωνία έλικας 30 μοίρες. Το υλικό κατεργασίας ήταν Al7039 με διαστάσεις 40mm x 40mm x 6mm. Για την εύρεση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε δυναμόμετρο 3 συνιστωσών ενώ η μέτρηση του ύψους ακίδας και του προφίλ της επιφάνειας έγινε μέσω ενός CMM οργάνου. Ως προς τους περιορισμούς του προβλήματος η μέση δύναμη πρέπει να είναι μικρότερη από 260N, το μέσο ύψος ακίδας μικρότερο από 100μm και στην αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται ο χρόνος. Τα βάρη που δόθηκαν ήταν τα εξής: μέση δύναμη 85%, μέσο ύψος ακίδας 11% και χρόνος κατεργασίας 4%. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται το βελτιστοποιημένο μονοπάτι και ο νέος χώρος λύσεων με του περιορισμούς.

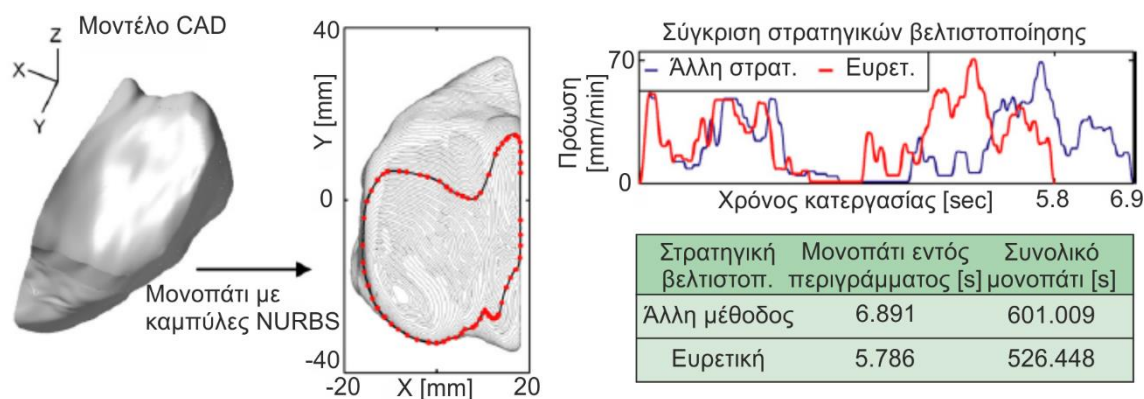
Οι **Erkorkmaz και Heng [4]** ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της πρόωσης μονοπατιών βασιζόμενα σε καμπύλες NURBS. Αφορμή αυτής της προσέγγισης ήταν η αναγκαιότητα ελαχιστοποίησης του χρόνου κατεργασίας και των αποκλίσεων της κατεργασμένης επιφάνειας από την πραγματική σε προϊόντα ή καλούπια που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και στην εμβιομηχανική. Έτσι οι ερευνητές ανέπτυξαν μια ευρετική τεχνική για την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας με την επιλογή κατάλληλης τιμής πρόωσης σε κάθε τμήμα του μονοπατιού. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε μονοπάτια από καμπύλες NURBS αλλά και σε άλλα μονοπάτια παραμετρικής μορφής. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο σχετίζεται με την εύρεση υποψήφιων προώσεων και το δεύτερον με τον έλεγχο παραβίασης των περιορισμών του προβλήματος (περιορισμοί ροπής ατράκτου, αποκλίσεις επιφάνειας, ταλαντώσεις) που μπορεί να έχουν αυτές οι προώσεις. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η ευρετική μέθοδος μέσα από ένα παράδειγμα.



Σχήμα 2.7: Ευρετική τεχνική βελτιστοποίησης της πρόωσης



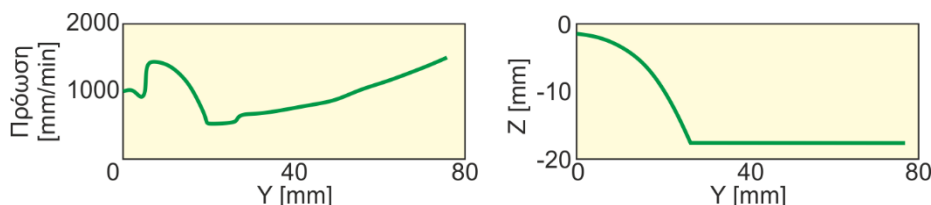
Η αποτελεσματικότητα της ευρετικής μεθόδου συγκρίθηκε με άλλες τεχνικές για την κατεργασία της επιφάνειας ενός εμφυτεύματος για τον ανθρώπινο οργανισμό. Το αντικείμενο ήταν δύο φορές μεγαλύτερο από το πραγματικό του μέγεθος για διευκόλυνση της κατεργασίας. Το υλικό κατεργασίας ήταν από κερί ενώ για την επιτάχυνση της μεθόδου, οι τροχιές του εργαλείου ήταν πολύ αραιές μεταξύ τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως ο χρόνος κατεργασίας του περιγράμματος που φαίνεται στο [σχήμα 2.8](#) μειώθηκε κατά 16% σε σχέση με ένα άλλο βελτιστοποιημένο μονοπάτι. Επίσης και ο συνολικός χρόνος κατεργασίας μειώθηκε κατά 12%.



Σχήμα 2.8: Κατεργασία εμφυτεύματος με καμπύλες NURBS, σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης και χρόνοι κατεργασίας

Ο **Chu [5]** και οι ομάδα του ασχολήθηκαν και αυτή με τη βελτιστοποίηση της πρόωσης σε κατεργασίες φινιρίσματος. Το μοντέλο τους λαμβάνει υπόψη τη σχέση εργαλείου-τεμαχίου στο φραιζάρισμα (κάθετο, ελκτικό, διατρητικό, οξύ και αμβλύ) και στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας. Ανάλογα με τη σχέση του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο, το αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής οι ταλαντώσεις του συστήματος διαφοροποιούνται κάνοντας δύσκολη την εύρεση κατάλληλων τιμών για την πρόωση.

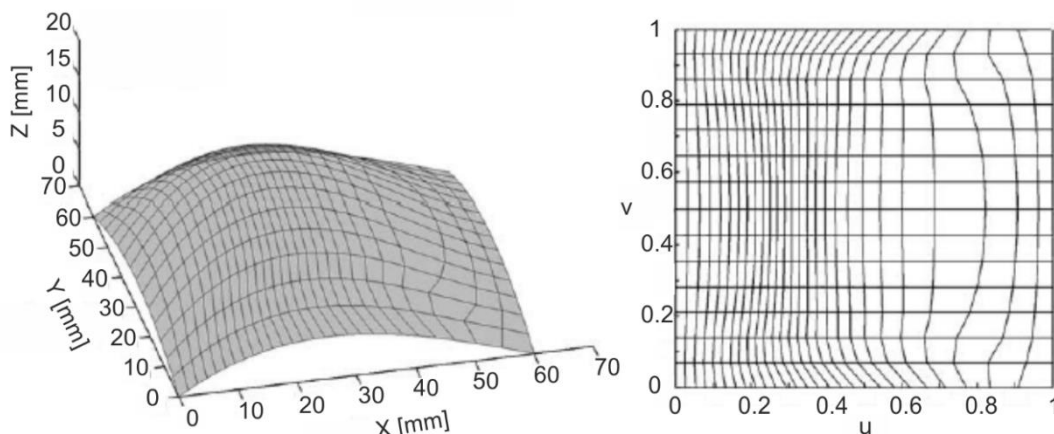
Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα. Το υλικό κατεργασίας ήταν κράμα ψευδάργυρου ( $H_B$  90~100) και χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την παραγωγή καλουπιών. Το εργαλείο ήταν κονδύλι σφαιρικής απόληξης, ολόσωμο από καρβίδιο του βολφραμίου. Τα πειράματα αυτά έδειξαν πως για αξονικό βάθος κοπής 0.5mm, ακτινικό βάθος κοπής 0.8mm και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 3000rpm η κατεργασία είναι σταθερή και δε δημιουργούνται ταλαντώσεις. Στο [σχήμα 2.9](#) παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη πρόωση στο μονοπάτι και η γεωμετρία στην οποία εφαρμόστηκε. Η κίνηση γίνεται στον άξονα Y.



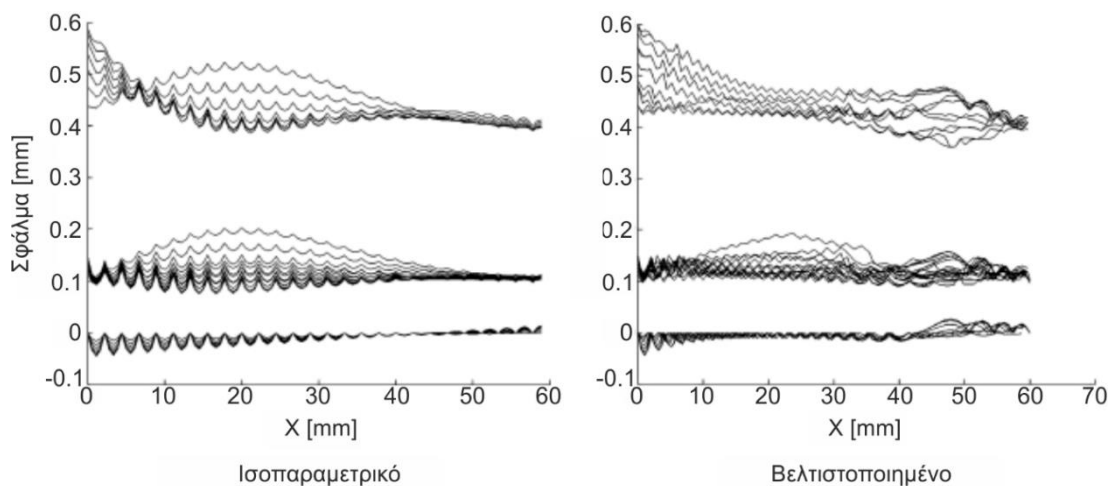
Σχήμα 2.9: Βελτιστοποιημένη πρόωση για ελαχιστοποίηση του χρόνο (αριστερά) και η τροχιά του εργαλείου (δεξιά)

Ο **He [6]** και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την τροχιά του εργαλείου που στηρίζεται στον επαναπροσδιορισμό των κόμβων που συνθέτουν μια επιφάνεια. Η διακριτοποίηση των επιφανειών στα σύγχρονα συστήματα CAD γίνεται με βάση

τον ισοπαραμετρικό καταμερισμό των κόμβων πάνω σε μια επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του ύψους ακίδας από περιοχή σε περιοχή θέτοντας μερικές φορές την ποιότητα επιφάνεια ακατάλληλη ως προς τις προδιαγραφές. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, οι ερευνητές πρότειναν μια προσέγγιση στην οποία η επιφάνεια διακριτοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε στις περιοχές που παρατηρείται μεγάλη καμπυλότητα το πλέγμα να είναι πυκνό ενώ στις περιοχές με μικρή καμπυλότητα το αντίστροφο, λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση του ίδιου αριθμού κόμβων σε σχέση με μια ισοπαραμετρική επιφάνεια. Έτσι η αποδοτικότητα του μονοπατιού είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις καθώς ο αριθμός των σημείων από τους οποίους αποτελείται είναι ο ίδιος. Το θετικό της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της κατεργασμένης επιφάνειας από την επιθυμητή. Στο σχήμα 2.10 φαίνεται η διακριτοποίηση σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάζεται.



Σχήμα 2.10: Διακριτοποίηση επιφάνειας βελτιστοποιημένης μεθόδου στο διάνυσμα κόμβων



Σχήμα 2.11: Σφάλματα αποκλίσεων της επιφάνειας στις δύο περιπτώσεις

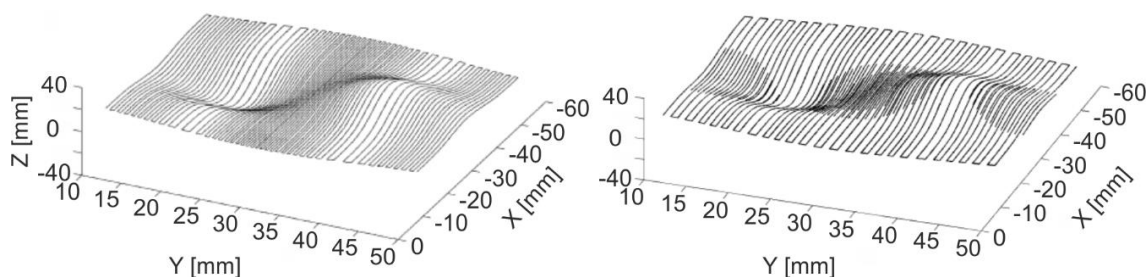
Για τη διαδικασία των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 16mm. Τα δύο μονοπάτια, το ισοπαραμετρικό και το βελτιστοποιημένο, εφαρμόστηκαν στην ίδια επιφάνεια. Στο σχήμα 2.11 φαίνονται οι αποκλίσεις τις επιφάνειας. Είναι φανερό ότι λόγω της αλλαγής της καμπυλότητας τα θετικά σφάλματα, που παράγονται λόγω της ακίδας που δημιουργείται σε όλη την επιφάνεια, είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Δε συμβαίνει το ίδιο όμως στα αρνητικά σφάλματα καθώς οι κόμβοι του βελτιστοποιημένου μονοπατιού είναι συγκεντρωμένοι σε περιοχές υψηλής καμπυλότητας και έτσι είναι χαμη-

λότερα σε σχέση ισοπαραμετρικό μονοπάτι όπου οι κόμβοι είναι σε σταθερές θέσεις παρεμβαλλόμενες γραμμικά. Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο αριθμός των κόμβων καθώς και η αποδοτικότητα των δύο μονοπατιών είναι ίδια, το βελτιστοποιημένο μονοπάτι είναι καλύτερο από το ισοπαραμετρικό.

Ο **Ding [7]** και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο (adaptive iso-planar toolpath generation algorithm) στον οποίο οι προς κατεργασία επιφάνειες χωρίζονται σε περιοχές σε σχέση με την κλίση που έχουν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μήκους του μονοπατιού. Με αυτόν τον τρόπο οι κάθετες τροχιές στην κατεύθυνση της πρόωσης είναι πιο πυκνές σε περιοχές όπου η κλίση της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη και αραιές σε αντίθετη περίπτωση. Ακόμα και σήμερα, η δημιουργία των μονοπατιών του εργαλείου από τα συστήματα CAD/CAM γίνεται με κριτήριο τις διαστάσεις του τεμαχίου (iso-planar algorithm). Το γεγονός αυτό έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα: σε περιοχές με μεγάλη κλίση το ύψος ακίδας είναι μεγαλύτερο σε σχέση με περιοχές μικρής κλίσης καθιστώντας την κατεργασία αναξιόπιστη.

Η στρατηγική του αλγορίθμου αυτού είναι να χωρίσει την επιφάνεια σε διαφορετικές περιοχές όπου κάθε μια έχει διαφορετικό εύρος κλίσης. Για τις περιοχές όπου οι κλίσεις είναι μεγάλες, οι γωνίες μεταξύ των κάθετων διανυσμάτων της επιφάνειας και των τεμνόμενων επιπέδων είναι μικρότερες. Ως εκ τούτου, τα διαστήματα των τεμνόμενων επιπέδων που χρειάζονται για τη δημιουργία των νέων σημείων της τροχιάς του εργαλείου είναι μικρότερα. Για τις περιοχές όπου οι κλίσεις της επιφάνειας είναι μικρές, οι γωνίες μεταξύ των κάθετων διανυσμάτων της επιφάνειας και των τεμνόμενων επιπέδων είναι μεγαλύτερες. Σε αυτή την περίπτωση, εφαρμόζονται μεγαλύτερα διαστήματα τεμνόμενων επιπέδων. Με τον τρόπο αυτό το ακτινικό βάθος κοπής προσαρμόζεται στην κλίση της επιφάνειας με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά.

Ο αλγόριθμος αυτός έχει δύο παραλλαγές. Στην πρώτη παραλλαγή (*Region-by-region toolpath*) η δημιουργία του μονοπατιού γίνεται σε κάθε περιοχή ξεχωριστά και κατεργάζεται ξεχωριστά. Η κατεργασία περατώνεται όταν όλες οι επιμέρους επιφάνειες έχουν κατεργαστεί. Στη δεύτερη παραλλαγή (*Global-local toolpath*) η δημιουργία του μονοπατιού γίνεται αρχικά σε όλη την επιφάνεια και το διάστημα των τεμνόμενων επιπέδων είναι μεγάλο. Το γεγονός αυτό προκαλεί σε περιοχές μεγάλης κλίσης μεγάλο ύψος ακίδας. Για το λόγο αυτό το μονοπάτι πυκνώνεται, τοπικά πλέον, σε περιοχές μεγάλης κλίσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται 2 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την ορθότητα του μοντέλου. Η μορφή του μονοπατιού στις δύο παραλλαγές φαίνεται στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Παραλλαγές αλγορίθμου βελτιστοποίησης, Region-by-region (αριστερά) και Global-local (δεξιά)

Στο πρώτο πείραμα η επιφάνεια κοπής αποτελείται από κυρτές και κοίλες περιοχές. Το μονοπάτι έχει παλινδρομική κατεύθυνση στο xy επίπεδο (zigzag). Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σφαιρικής μορφής διαμέτρου 3mm. Η παραλλαγή του αλγορίθμου που

επιλέχθηκε ήταν η *Region-by-Region* και συγκρίθηκε με μια κοινή μέθοδο από ένα σύστημα CAD/CAM (iso-planar). Τρεις παραλλαγές του ίδιου μονοπατιού δημιουργήθηκαν για ύψος ακίδας 0.05, 0.03 και 0.01 αντίστοιχα. Στο δεύτερο πείραμα η παραλλαγή του αλγορίθμου που επιλέχθηκε ήταν η *global-local*. Για να είναι η σύγκριση αντικειμενική, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν καθώς και η μορφή της επιφάνειας ήταν ίδιοι με το πρώτο πείραμα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στο πρώτο πείραμα το μήκος του μονοπατιού μειώθηκε κατά 18%. Αυτό συνέβη γιατί ο αλγόριθμος είναι πιο αποδοτικός σε επιφάνειες με μεγάλες κλίσεις. Και για τις τρεις περιπτώσεις διαφορετικού ύψους ακίδας αυτό το ποσοστό είναι περίπου το ίδιο. Στο δεύτερο πείραμα η ποιότητα της επιφάνειας ήταν καλύτερη σε σχέση με το πρώτο. Η μείωση του μήκους όμως ήταν 16%. Αυτό έγινε επειδή ο αλγόριθμος του δεύτερου πειράματος δημιουργεί επιπλέον τροχιές σε περιοχές υψηλής κλίσης. Τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων φαίνονται στο πίνακα 2.1.

Μήκος μονοπατιού [mm]	Ύψος ακίδας [mm]		
	0.05	0.03	0.01
Περιοχή υψηλής κλίσης	1682.4	2146.6	3641.8
Περιοχή χαμηλής κλίσης	2109.75	2675.9	4549.1
Συνολικό μήκος <i>Region-by-region</i> παραλλαγής	3792.15	4822.5	8190.9
Συνολικό μήκος iso-planar παραλλαγής	4599.4	5929	10215
Μείωση μήκους	807.25	1106.5	2024.1
Ποσοστό μείωσης [%]	17.56	18.7	19.8
Μήκος μονοπατιού [mm]	Ύψος ακίδας [mm]		
	0.05	0.03	0.01
Περιοχή υψηλής κλίσης	1001.7	1290.1	2212.4
Περιοχή χαμηλής κλίσης	2861.9	3671.6	6329.1
Συνολικό μήκος <i>Global-local</i> παραλλαγής	3863.6	4961.7	8541.5
Συνολικό μήκος iso-planar παραλλαγής	4599.4	5929.0	10215
Μείωση μήκους	735.8	967.3	1673.5
Ποσοστό μείωσης [%]	16	16.3	16.4

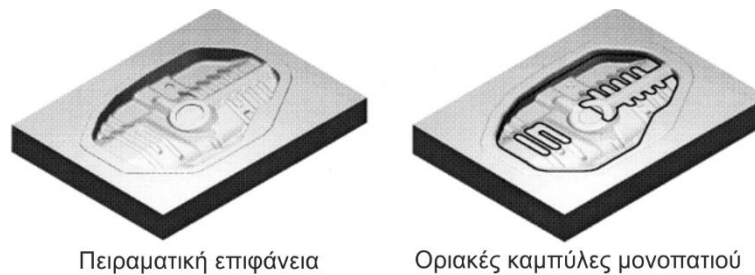
Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα πρώτου και δεύτερου πειράματος

Οι **Park και Choi [8]** ασχολήθηκαν με την ελαχιστοποίηση των κινήσεων τοποθέτησης και απομάκρυνσης του εργαλείου (G00 Engage/Retract movements) από το τεμάχιο σε παλινδρομικά μονοπάτια (zigzag). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπολογίζει αρχικά την βέλτιστη γωνία του μονοπατιού στο επίπεδο xy. Στη συνέχεια υπολογίζονται και ελαχιστοποιούνται τα διάφορα τμήματα του μονοπατιού και τέλος τα τμήματα αυτά συνδέονται μεταξύ του μέσο γρήγορων τοποθετήσεων του εργαλείου. Ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί τα ακόλουθα:

- Ελαχιστοποίηση των κινήσεων τοποθέτησης και επαναφοράς εργαλείου. Ο αριθμός αυτός πρέπει να ελαχιστοποιηθεί γιατί ο χρόνος κατεργασίας αυξάνεται καθώς το εργαλείο βρίσκεται στον αέρα (air-cut) και επειδή προκαλούνται αστοχίες πάνω στην επιφάνεια από την τοποθέτηση του εργαλείου.
- Ελαχιστοποίηση των τμημάτων του μονοπατιού. Γενικά στο τέλος μιας τροχιάς η πρόωση πρέπει μειώνεται για την αποφυγή εσφαλμένης επαφής του εργαλείου με το τεμάχιο. Για να αυξηθεί η παραγωγικότητα τα τμήματα πρέπει να ελαχιστοποιούνται.
- Μεγιστοποίηση του μέσου μήκους του κάθε τμήματος του μονοπατιού. Η αύξηση του μήκους βελτιώνει την ποιότητα της επιφάνειας καθώς επιτρέπει σταθερή τιμή της πρόωσης.

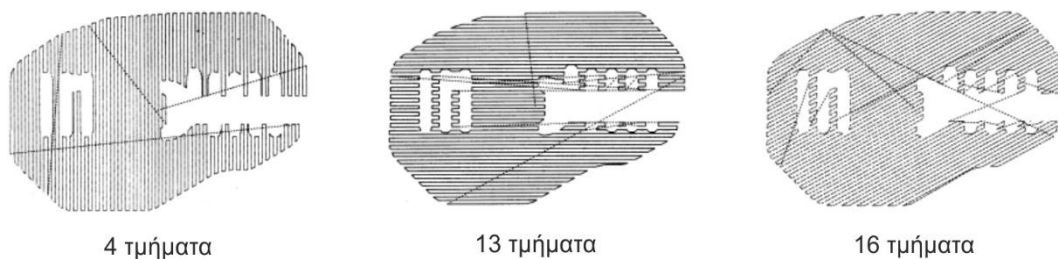


- Τεχνολογικές απαιτήσεις. Το βελτιστοποιημένο μονοπάτι θα πρέπει να προσαρμόζεται σε διάφορους τεχνολογικούς περιορισμούς και απαιτήσεις όπως η στρατηγική φραιζαρίσματος (μονής κατεύθυνσης, παλινδρομικής κατεύθυνσης) καθώς και η φορά κοπής (ομόρροπο ή αντίρροπο φραιζάρισμα).



Σχήμα 2.13: Μήτρα κατεργασίας (αριστερά), τα όρια του μονοπατιού (δεξιά)

Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του σχήματος 2.13. Στο σχήμα φαίνεται μια μήτρα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή δεξαμενών καυσίμων για επιβατικά αυτοκίνητα. Η κατεργασία της μήτρας έγινε με εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 20mm. Στο σχήμα 2.14 φαίνονται βελτιστοποιημένα μονοπάτια διαφορετικής γωνίας κλίσης μονοπατιού που αποτελούνται από 4, 13 και 16 τμήματα αντίστοιχα. Τα πειράματα έδειξαν πως ο χρόνος κατεργασίας για τα επιμέρους μονοπάτια ήταν 38, 41 και 42min.



Σχήμα 2.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τρία διαφορετικά μονοπάτια

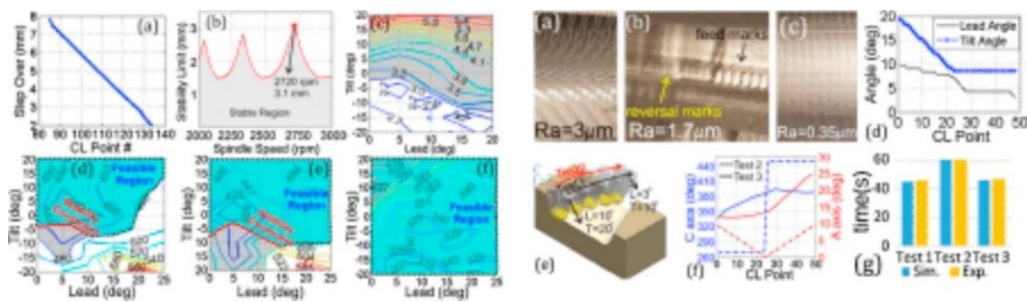
## 2.2 Βελτιστοποίηση μονοπατιών σε φραιζάρισμα πέντε αξόνων

Ο **Tunc [9]** και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψιν του τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δημιουργημένων μονοπατιών όπως είναι η περιοχή της επιφάνειας η οποία κατεργάζεται και οι συνοριακές περιοχές της αλλά και τα κάθετα διανύσματα πάνω σε αυτή. Επίσης παράμετροι του μοντέλου θεωρούνται οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται, οι δυνάμεις που δέχεται το εργαλείο και η δυναμική της κίνησης της εργαλειομηχανής.

Η προσέγγιση που προτείνουν οι ερευνητές βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας δοθέντος ενός μονοπατιού. Ο χρόνος αυτός αλλά και οι δυνάμεις κοπής επηρεάζονται άμεσα από την περιστροφή του τραπεζιού (4<sup>ος</sup> και 5<sup>ος</sup> άξονας της φραιζας) και έτσι μελετάται αν η αποφυγή αυτών των κινήσεων είναι δυνατή. Περιορισμός του προβλήματος οι δυνάμεις κοπής. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως ένας γράφος και έτσι ο αλγόριθμος του Dijkstra χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της διαδρομής με το μικρότερο κόστος. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων το υλικό κατεργασίας ήταν Al7075. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 16mm με 4 κοπτικές ακμές και η στρατηγική φραιζαρίσματος ήταν μονής κατεύθυνσης (zig). Το ακτινικό βάθος κοπής ήταν 6-8mm και το αξονικό βάθος κοπής 3mm. Επειδή δε χρησιμοποιήθηκε ψυκτικό στην κατεργασία επιλέχθηκε χαμηλή ταχύτητα κοπής που αντιστοιχεί σε 2720 rpm. Ο περιορισμός της



κατεργασίας και κατ' επέκταση του προβλήματος βελτιστοποίησης ήταν ότι οι δυνάμεις κοπής δε θα έπρεπε να ξεπερνούν τα 500N.



Σχήμα 2.15: Αποτελέσματα των πειραμάτων

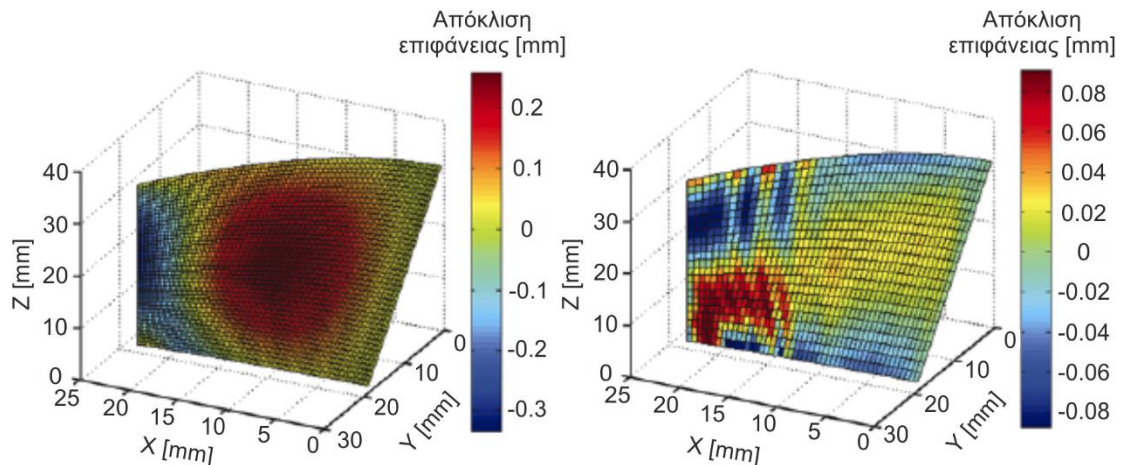
Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν 3 σενάρια κοπής. Το πρώτο σενάριο αντιπροσωπεύει το αρχικό μονοπάτι, όπως βγήκε από ένα πρόγραμμα CAM. Η κίνηση του εργαλείου σε αυτό το μονοπάτι γίνεται στους 3 άξονες της μηχανής. Στο σχήμα 2.15 φαίνεται πως στο τεμάχιο, μετά την κατεργασία, υπάρχουν αστοχίες λόγω ταλαντώσεων. Στο δεύτερο σενάριο το αρχικό μονοπάτι τροποποιείται έτσι ώστε οι γωνίες  $\phi$  και  $\omega$  να είναι 0. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο ο 4<sup>ος</sup> και 5<sup>ος</sup> άξονας της εργαλειομηχανής είχαν επιστραφεί κατά 19° και 180° αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι η κατεργασία ήταν αρκετά σταθερή στο τελικό τεμάχιο παρατηρήθηκαν σημάδι αστοχίας λόγω ταλαντώσεων. Επίσης ο χρόνος κατεργασίας ήταν κατά 40% μεγαλύτερος από το πρώτο σενάριο λόγω της αργής κίνησης των περιστροφικών αξόνων της μηχανής. Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο το μονοπάτι δημιουργήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την ευστάθεια της κατεργασίας, τις δυνάμεις κοπής και την ομαλότητα της κίνησης των δύο περιστροφικών αξόνων της μηχανής. Το σενάριο αυτό παρουσίασε την καλύτερη ποιότητα επιφάνειας αλλά ο χρόνος κατεργασίας ήταν μόνο 2% μεγαλύτερος από το πρώτο σενάριο. Συγκρίνοντας το με το δεύτερο σενάριο παρατηρείται ότι οι κινήσεις των αξόνων είναι πιο ομαλές και ο χρόνος κατεργασίας μικρότερος κατά 30%. Όλα αυτά φαίνονται στο σχήμα 2.15.

Οι **Ding και Zhu [10]** ασχολήθηκαν με την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της κατεργασμένης επιφάνειας από την πραγματική. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές όρισαν μια συνάρτηση για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ της επιφάνειας που δημιουργείται από το μονοπάτι του εργαλείου με την επιφάνεια σχεδίασης. Η προσέγγιση με σειρά Taylor δεύτερας τάξης επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό. Στη συνέχεια ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται ως

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^n [d_{p_i, S_{axis}}^S(w) - r]^2$$

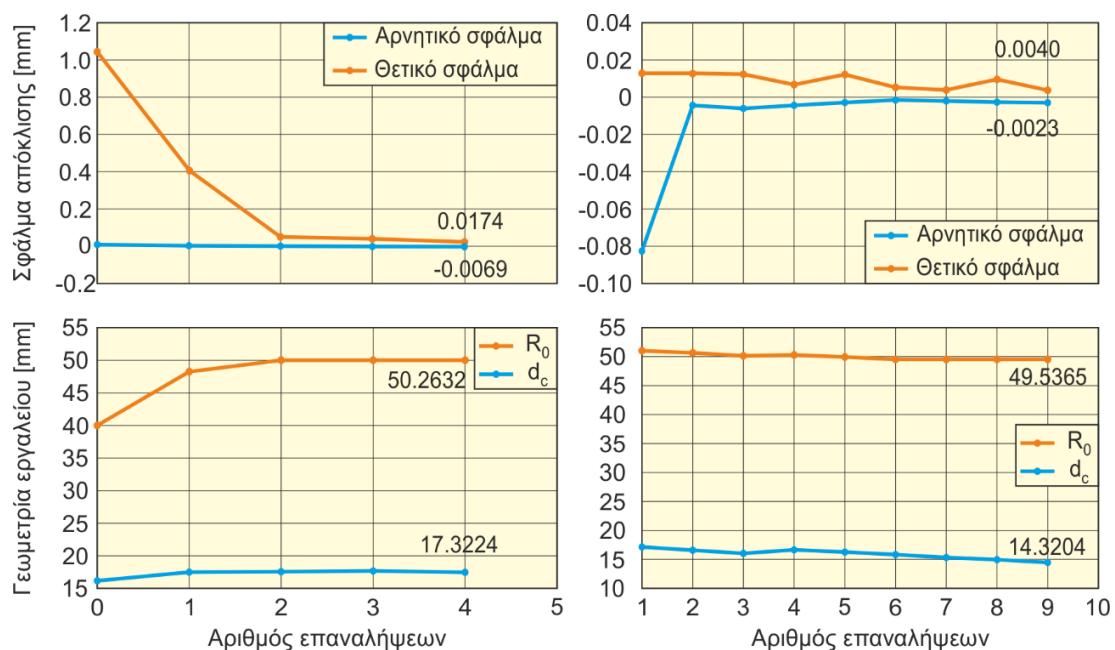
όπου  $n$  τα σημεία δειγματοληψίας,  $d_{p_i, S_{axis}}^S(w)$  η κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο επιπέδων στο σημείο  $i$  και στην παράμετρο  $w$  του διανύσματος κόμβου και  $r$  η ακτίνα καμπυλότητας του σφαιρικού εργαλείου. Το πρόβλημα δεν έχει περιορισμούς. Ο αλγόριθμος περατώνεται όταν η διαφορά των αποστάσεων μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει μικρότερη από μια ποσότητα  $\epsilon$  (κριτήριο σύγκλισης). Για την ορθότητα της μεθόδου πραγματοποιήθηκαν 2 πειράματα. Στο πρώτο το μονοπάτι του εργαλείου δεν ήταν βελτιστοποιημένο, ενώ στο δεύτερο ήταν, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε νωρίτερα. Ένα εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 10mm επιλέχθηκε και για τις δύο κατεργασίες. Για τη δημιουργία του μονοπατιού στο δεύτερο πείραμα ένα δείγμα 10.000 σημείων (100 στην κατεύθυνση  $u$  και 100 στην  $v$ ) επιλέχθηκε από την πραγματική επιφάνεια. Στο σχήμα 2.16

παρουσιάζεται η κατανομή των σφαλμάτων και στα δύο πειράματα. Το μέγιστο θετικό σφάλμα μειώθηκε από 0.172 σε 0.068mm και το μέγιστο αρνητικό από 0.228 σε 0.067mm.



Σχήμα 2.16: Κατανομή γεωμετρικών σφαλμάτων στην κατεργασμένη επιφάνεια, μονοπάτι από σύστημα CAM (αριστερά), βελτιστοποιημένο μονοπάτι (δεξιά)

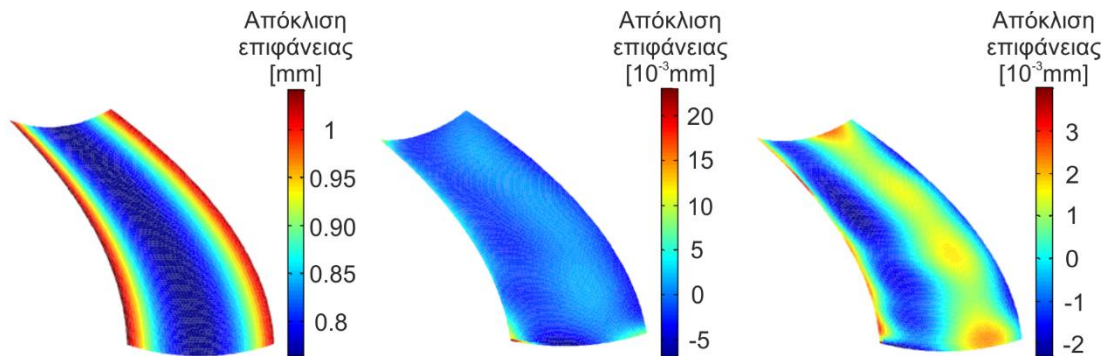
Οι ίδιοι ερευνητές [11], λίγα χρόνια μετά, επέκτειναν τη μέθοδό τους υπολογίζοντας και τα βέλτιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει το κοπτικό εργαλείο για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων απόκλισης. Η βελτιστοποίηση του εργαλείου έχει νόημα σε κατεργασίες πέντε αξόνων στις οποίες η κοπή δε γίνεται μόνο στη μύτη του εργαλείου αλλά και στην έλικά του (flank milling). Στην περίπτωση που υπάρχει το μονοπάτι του εργαλείου, η βελτιστοποίηση αφορά μόνο το εργαλείο και τα νέα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα έχει. Στην περίπτωση που η γεωμετρία του εργαλείου είναι καθορισμένη, βελτιστοποιείται μόνο το μονοπάτι. Τέλος είναι δυνατή η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και του εργαλείου αλλά και του μονοπατιού.



Σχήμα 2.17: Αποτελέσματα. γραμμικό (αριστερά) και minmax πρόβλημα (δεξιά)

Το πρόβλημα της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης προσεγγίστηκε τόσο σαν ένα minmax πρόβλημα όσο και σαν ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού όπου η δυσκολία επίλυσης

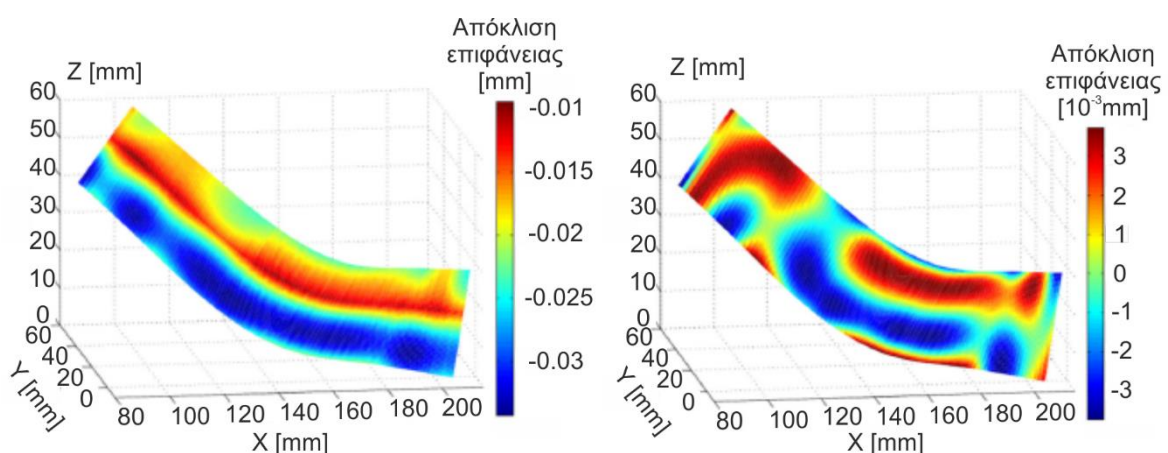
είναι μικρότερη. Στο [σχήμα 2.17](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων και ο χρόνος σύγκλισης. Οι παράμετροι  $R_0$  και  $d_c$  καθορίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου. Στη γραμμική βελτιστοποίηση το μέγιστο αρνητικό σφάλμα συγκλίνει στα 0.0069mm και το μέγιστο θετικό στα 0.0174mm ενώ στη  $\min\max$  βελτιστοποίηση το μέγιστο αρνητικό σφάλμα συγκλίνει στα 0.0023mm και το μέγιστο θετικό στα 0.004mm. Η κατανομή των σφαλμάτων απόκλισης στην επιφάνεια φαίνεται στο [σχήμα 2.18](#).



Σχήμα 2.18: Κατανομή σφαλμάτων απόκλισης της επιφάνειας, χωρίς βελτιστοποίηση (αριστερά), γραμμική βελτιστοποίηση (κέντρο) και  $\min\max$  βελτιστοποίηση (δεξιά)

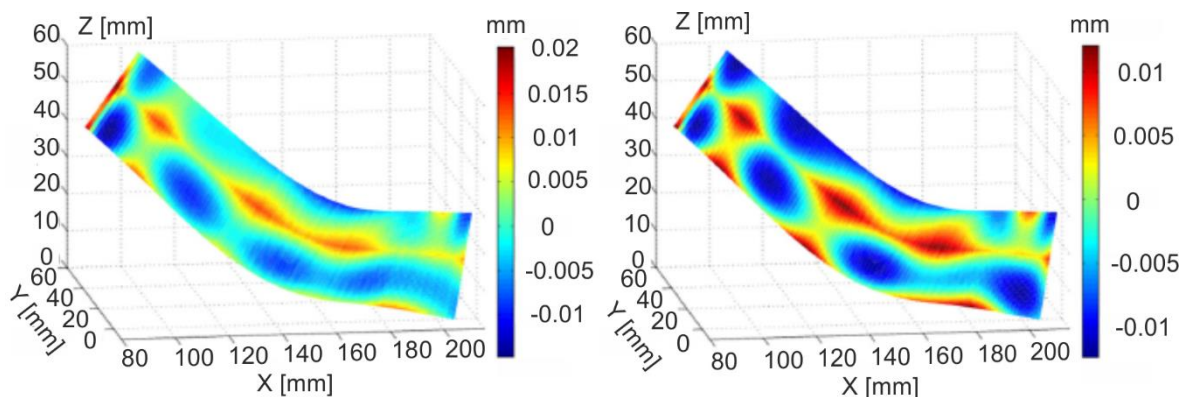
Οι **Li και Zhu [12]** βελτίωσαν σημαντικά τα μοντέλα [10] και [11] προσθέτοντας και το φαινόμενο Runout στη βελτιστοποίηση της τροχιάς του εργαλείου. Το φαινόμενο αυτό είναι αναπόφευκτο στις κατεργασίες κοπής επηρεάζοντας την ακρίβεια της. Το εργαλείο που μελετήθηκε ήταν κωνικό σφαιρικής απόληξης.

Για την επαλήθευση του μοντέλου έγιναν αρχικά δύο πειράματα. Στο πρώτο, το φαινόμενο Runout αγνοήθηκε ενώ στο δεύτερο συμπεριλήφθηκε στη βελτιστοποίηση. Και στις δύο περιπτώσεις το φαινόμενο προσεγγίστηκε σαν ένα  $\min\max$  πρόβλημα. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν κωνικό. Στο [σχήμα 2.19](#) φαίνονται τα αποτελέσματα. Το μέγιστο θετικό σφάλμα μειώθηκε από τα 0.0037 στα 0mm ενώ το μέγιστο αρνητικό σφάλμα αυξήθηκε από τα 0.0037 στα 0.03429mm. Από τα αποτελέσματα γίνεται φανερό πως το φαινόμενο επηρεάζει την τροχιά του εργαλείου καθιστώντας έτσι την κατεργασία ποιοτικά κακή. Τα αρνητικά σφάλματα δίνουν χώρο για περαιτέρω βελτιστοποίηση του μοντέλου.



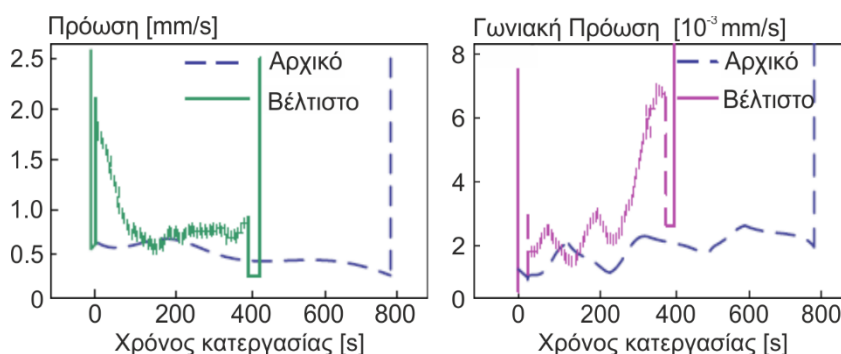
Σχήμα 2.19: Κατανομή σφαλμάτων απόκλισης της επιφάνειας, επίδραση φαινομένου Runout (αριστερά), ελαχιστοποίηση φαινομένου Runout (δεξιά)

Μια νέα σειρά προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε στην οποία το εργαλείο που επιλέχθηκε είχε διάμετρο 6.028mm και γωνία κωνικότητας 4.978 μοίρες. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξασφαλίζουν την αποφυγή του φαινομένου Runout. Στην πρώτη προσομοίωση η μέθοδος βελτιστοποίησης ήταν γραμμική ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος min-max-min. Στο σχήμα 2.20 παρουσιάζεται η κατανομή των σφαλμάτων απόκλισης της επιφάνειας για τις δύο μεθόδους, συμπεριλαμβανομένου και του φαινομένου Runout στο μοντέλο. Στη γραμμική βελτιστοποίηση το μέγιστο θετικό σφάλμα αυξήθηκε από 0 σε 0.02013mm ενώ το μέγιστο αρνητικό μειώθηκε από 0.03429 σε 0.01467mm και το απόλυτο σφάλμα έτσι μειώθηκε κατά 41.29%. Στη min-max-min βελτιστοποίηση το μέγιστο θετικό σφάλμα και το μέγιστο αρνητικό μειώθηκαν σε 0.01206 και 0.01238mm αντίστοιχα. Το απόλυτο σφάλμα σε σχέση με τη γραμμική μέθοδο μειώθηκε κατά 38.50%.



Σχήμα 2.20: Κατανομή σφαλμάτων απόκλισης της επιφάνειας με ελαχιστοποίηση φαινομένου Runout και τροχιάς εργαλείου, γραμμική βελτιστοποίηση (αριστερά) και min-max-min βελτιστοποίηση (δεξιά)

Ο **Zhang [13]** ανέπτυξε ένα μοντέλο το οποίο ελαχιστοποιεί τις δυνάμεις του εργαλείου και τον χρόνο κατεργασίας δεδομένου ενός υπάρχοντος μονοπατιού. Στην κατεργασία πολυαξονικών επιφανειών η πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής είναι μια πρόκληση λόγω της γεωμετρικής δυσκολίας του υπολογισμού του απαραμόρφωτου αποβλήτου και της μορφής του εργαλείου. Επίσης οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται από τις δυνάμεις επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας. Ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται με βάση τη γωνία του άξονα του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο και με το αξονικό βάθος κοπής. Σκοπός του μοντέλου είναι να προσαρμόσει κατάλληλα την πρόωση του εργαλείου με τέτοιον τρόπο ώστε οι δυνάμεις να ελαχιστοποιούνται. Η πρόωση δύναται να αλλάζει τιμή στη διάρκεια της κατεργασίας προκειμένου να ισχύουν τα παραπάνω.



Σχήμα 2.21: Αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης στον χρόνο κατεργασίας

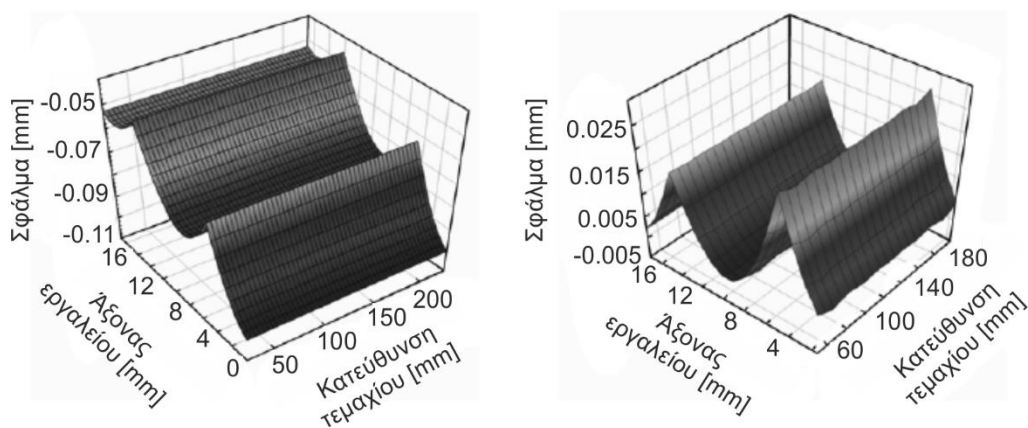


Μια πτερωτή κατασκευάστηκε για την επαλήθευση του μοντέλου. Το υλικό κατεργασίας ήταν Al6061 και το εργαλείο που επιλέχθηκε ήταν κονδύλι σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 10mm. Ο G κώδικας παράχθηκε από ένα εμπορικό λογισμικό CAD/CAM και η βελτιστοποίηση βασίστηκε πάνω σε αυτόν. Στο [σχήμα 2.21](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Ο χρόνος κατεργασίας μειώθηκε κατά 45% μετά τη βελτιστοποίηση. Οι πιο μεγάλες αλλαγές στην πρόωση παρατηρήθηκαν στην αρχή και στο τέλος της κατεργασίας.

Ο **Guo [14]** και οι συνεργάτες του ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση μονοπατιών ελαχιστοποιώντας και αυτοί το φαινόμενο Runout. Στο μοντέλο αυτό οι παράμετροι που πειράζουν το μοντέλο είναι τέσσερις με ποιο σημαντικές τη γωνία κλίσης του τεμαχίου με το εργαλείο και το μήκος του εργαλείου. Για τη μείωση του φαινομένου αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (least square optimization).

Στο πενταξονικό φραιζάρισμα, οι διακυμάνσεις των δυνάμεων κοπής που προκαλούνται από το φαινόμενο Runout είναι αναπόφευκτες και η αντιστάθμιση του σφάλματος είναι αναγκαία για τη στιβαρότητα της κατεργασίας. Επίσης τα γεωμετρικά σφάλματα που προκύπτουν πηγάζουν τόσο από φαινόμενο Runout όσο και από την ίδια την απόκλιση του εργαλείου με την επιφάνεια λόγω τροχιάς εργαλείου. Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι το μοντέλο βελτιστοποίησης απαιτεί την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των δύο σφαλμάτων σε μια σύνθετη γραμμική συνάρτηση.

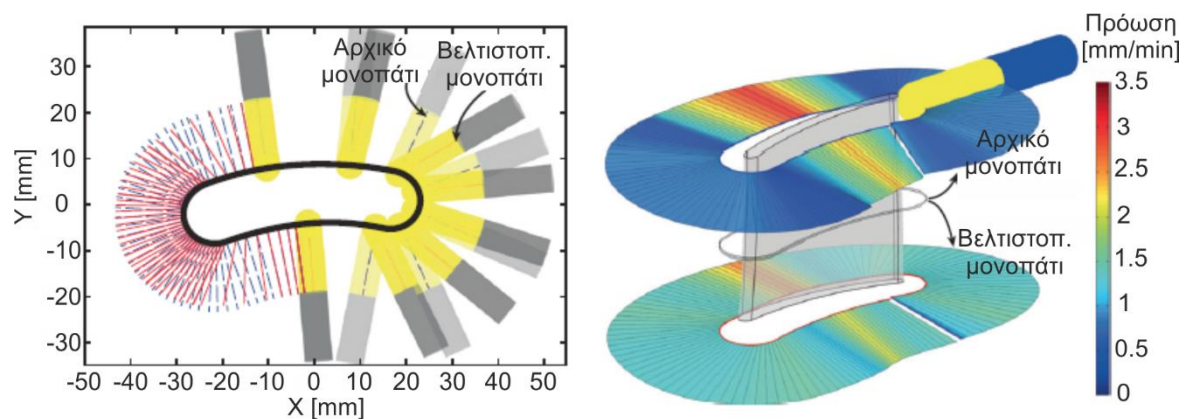
Στο [σχήμα 2.22](#) φαίνονται τα γεωμετρικά σφάλματα πριν και μετά τη βελτιστοποίηση. Το σφάλμα μειώθηκε από 0.11σε 0.025mm, δηλαδή κατά 77.3%. Γίνεται φανερό πως το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι σε θέση να μειώσει τα γεωμετρικά σφάλματα λόγω του φαινομένου Runout σημαντικά. Τα ύψη των κορυφών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση είναι ίδια. Ωστόσο, το μεγαλύτερο σφάλμα πριν τη βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στο κατώτερο σημείο του εργαλείου ενώ μετά στη μέση του άξονα του εργαλείου.



Σχήμα 2.22: Σφάλματα επιφάνειας, με φαινόμενο Runout (αριστερά), βελτιστοποιημένο (δεξιά)

Ο **Beudaert [15]** και οι συνεργάτες του προσπάθησαν να εξομαλύνουν την τροχιά του εργαλείου σε κατεργασίες 5 αξόνων έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η πραγματική πρόωση και να μειωθεί ο χρόνος κατεργασίας. Σε κατεργασίες υψηλής ταχύτητας, η πραγματική πρόωση είναι συχνά χαμηλότερη από την προγραμματισμένη. Η μείωση αυτή της πρόωσης οφείλεται κυρίως στα φυσικά όρια των μηχανισμών κίνησης και επηρεάζει τον χρόνο κατεργασίας καθώς και την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Αν η τροχιά του εργαλείου

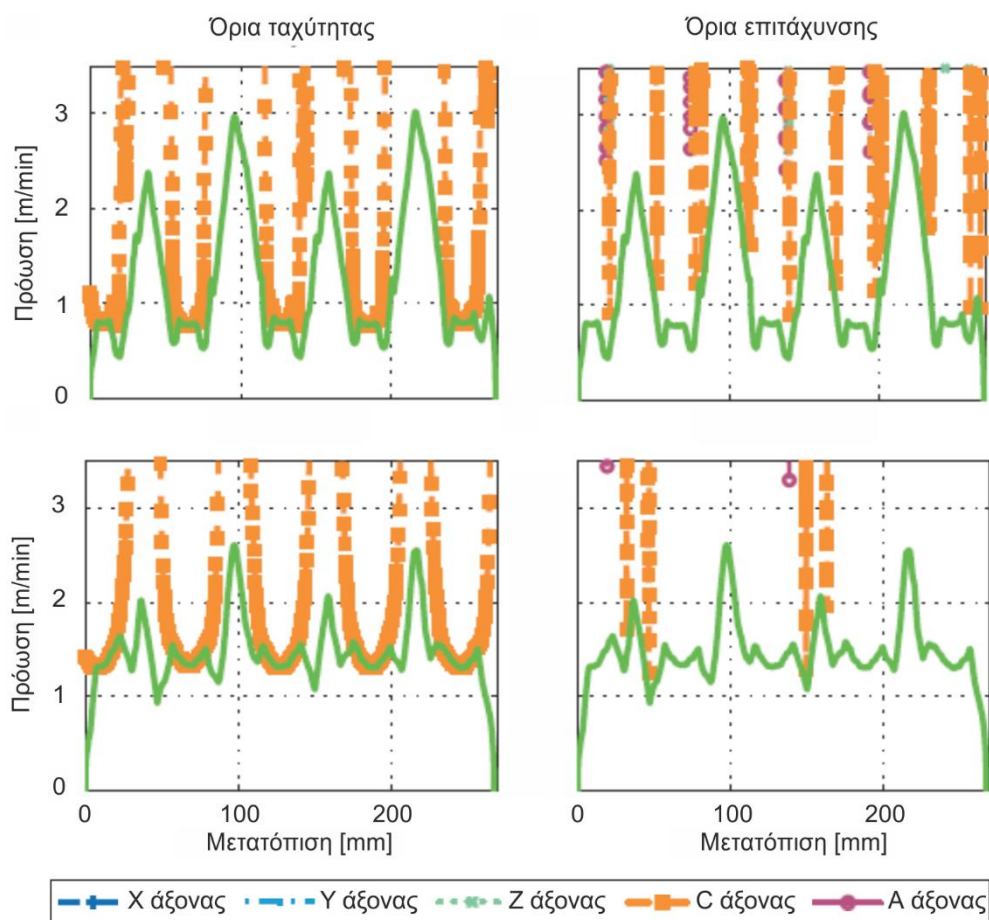
παρουσιάζει απότομες γεωμετρικές παραλλαγές η πρόωση πρέπει να μειωθεί ώστε να προσαρμοστεί στους περιορισμούς που θέτουν οι μηχανισμοί κίνησης της εργαλειομηχανής που είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Τα όρια της ταχύτητας και της επιτάχυνσης επιτρέπουν τον υπολογισμό της μέγιστης εφικτής πρόωσης που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των περιοχών όπου η τροχιά του εργαλείου πρέπει να εξομαλυνθεί. Έτσι ξεκινώντας από ένα δεδομένο μονοπάτι εργαλείου, ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε πραγματοποιεί την παραπάνω διαδικασία. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε για το φινίρισμα δύο διαφορετικών γεωμετριών. Η προγραμματισμένη πρόωση ορίστηκε στα 5000mm/min.



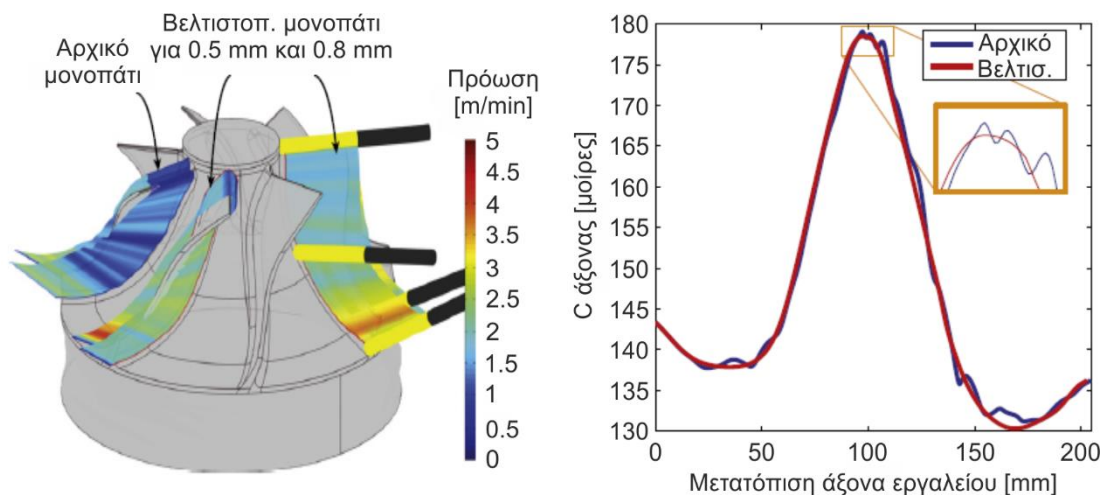
Σχήμα 2.23: Διόρθωση του άξονα εργαλείου στο βελτιστοποιημένο μονοπάτι (αριστερά), μεταβολή της πρόωσης στο αρχικό και στο βελτιστοποιημένο μονοπάτι (δεξιά)

Το πρώτο πείραμα αφορούσε την κατεργασία μιας αεροτομής. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν όριζαν το ύψος ακίδας ίσο με 0.01mm, τη γωνία  $\phi$  ίση με  $0^\circ$  και τη γωνία  $\omega$  ίση με  $5^\circ$ . Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 10mm. Η γεωμετρία της αεροτομής, το αρχικό αλλά και το βελτιστοποιημένο μονοπάτι του εργαλείου παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.23](#). Στο [σχήμα 2.24](#) φαίνεται η αλλαγή της πρόωσης σε σχέση με την ταχύτητα και την επιτάχυνση των κινητήρων της μηχανής. Από ο [σχήμα](#) φαίνεται πως ο κύριος περιορισμός της πρόωσης προέρχεται από την ταχύτητα του άξονα C. Στην πραγματικότητα η στρατηγική του φραιζαρίσματος οδηγεί στην εκτεταμένη χρήση του άξονα C καθώς το εργαλείο περιστρέφεται γύρο από το κομμάτι και κατ' επέκταση γύρο από αυτόν τον άξονα. Η μέθοδος βελτιστοποίησης αλλάζει την κίνηση του άξονα του εργαλείου για να αυξήσει την πρόωση και έτσι από το [σχήμα](#) φαίνεται ότι η πρόωση αγγίζει τα όρια της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Έτσι ο χρόνος κατεργασίας για το αρχικό και το βελτιστοποιημένο μονοπάτι είναι 17.2 και 11.2s αντίστοιχα επιτυγχάνοντας έτσι μια μείωση της τάξης του 30% στο χρόνο κατεργασίας.

Το δεύτερο πείραμα αφορά την κατεργασία μιας πτερωτής. Το αρχικό μονοπάτι του εργαλείου είναι ήδη βελτιστοποιημένο, από προηγούμενος ερευνητές, ως προς τις γεωμετρικές αποκλίσεις της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το αρχικό μονοπάτι έχει μέγιστη απόκλιση 0.4mm από την κανονική επιφάνεια. Για την εφικτότητα της ομαλοποίησης της τροχιάς πραγματοποιήθηκαν δύο νέα πειράματα που απαιτούσαν μέγιστη απόκλιση στα 0.5 και 0.9mm αντίστοιχα. Και στα δύο πειράματα τα μονοπάτι περιγράφεται από καμπύλες B-Spline και από καμπύλες συνέχειας G1. Για το πείραμα με ανοχή 0.9mm η γεωμετρική απόκλιση αυξήθηκε σημαντικά ενώ με τη χρήση καμπυλών B-Spline ο χρόνος κατεργασίας μειώθηκε εξαιτίας της ομαλότερης τροχιάς του μονοπατιού σε σχέση με τις καμπύλες G1. Για το πείραμα με ανοχή 0.5mm ο χρόνος κατεργασίας μειώθηκε κατά 30%. Η ομαλότητα του μονοπατιού φαίνεται από την κίνηση του άξονα C στο [σχήμα 2.25](#).



Σχήμα 2.24: Μεταβολή της πρόωσης σε σχέση με την ταχύτητα και την επιτάχυνση των κινητήρων της εργαλειομηχανής, αρχικό μονοπάτι (πάνω) και βελτιστοποιημένο μονοπάτι (κάτω)



Σχήμα 2.25: Μεταβολή πρόωσης της πάνω στην πτερωτή για τα τρία πειράματα (αριστερά), κίνηση του άξονα C πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (ανοχή=0.5mm) (δεξιά)

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για τη δημιουργία της βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκαν 360 πειράματα και σε κάθε ένα από αυτά μετρήθηκε η επιφανειακή τραχύτητα και οι δυνάμεις κοπής. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 20mm. Από τις κατεργαζόμενες επιφάνειες που προέκυψαν φάνηκε η τοπομορφία της εκάστοτε επιφάνειας ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, μετρήθηκε η επιφανειακή τραχύτητα και οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία φραιζαρίσματος.

#### 3.1 Εξοπλισμός πειραμάτων

Η εκπόνηση των πειραμάτων έγινε στον χώρο του Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης όπου χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός και η ακόλουθη διαδικασία ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

##### 3.1.1 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο κέντρο κατεργασίας Deckel Maho DMU 50 eco του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η κύρια άτρακτος του κέντρου κατεργασίας έχει τη δυνατότητα περιστροφής έως και 8000rpm (στροφές ανά λεπτό), 83Nm (40% ED) ενώ η ισχύς της φτάνει στα 13kW και η γρήγορη μετακίνηση της δεν ξεπερνά την ταχύτητα τα 12m/min. 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 SLIMline® Panel με οθόνη TFT 15", SIEMENS 810D powerline και λογισμικό ShopMill καθιστούν δυνατό τον απλό προγραμματισμό αλλά και την τρισδιάστατη προσομοίωση. Στο [σχήμα 3.5](#) απεικονίζονται το κέντρο κατεργασίας.



Σχήμα 3.5: Κέντρο κατεργασίας Deckel Maho DMU 50 eco



### 3.1.2 Συσσκευή προρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco

Για τον μηδενισμό των εργαλείων το εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης διαθέτει τη συσκευή MICROSET Uno 115 eco (σχήμα 3.6) η οποία λειτουργεί με το λογισμικό Microvision II IT και διαθέτει:

- Edge finger για τον γρήγορο εντοπισμό της ακμής του κοπτικού εργαλείου,
- Βάση κατασκευασμένη από χυτοσίδηρο,
- Πνευματική σύσφιξη και στους δύο άξονες για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών,
- Ελεύθερα κινούμενους γραμμικούς οδηγούς,
- CMOS ψηφιακή κάμερα με τηλεσκοπικούς φακούς και
- Επιπρόσθετο σύστημα μέτρησης.

Η ακρίβεια για τον υπολογισμό των διαστάσεων του κοπτικού εργαλείου είναι της τάξεως των μικρομέτρων (μm). Αφού υπολογιστούν οι ακριβείς διαστάσεις μεταφέρονται από τον χρήστη στο πρόγραμμα διαχείρισης των εργαλείων και έτσι πραγματοποιείται η αντιστάθμιση και το εργαλείο τοποθετείται στον εργαλειοφόρα της μηχανής.



Σχήμα 3.6: Συσσκευή προρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco

### 3.1.3 Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642

Ο μηδενισμός των προς κατεργασία τεμαχίων στην εργαλειομηχανή DMU 50 eco πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του τρισδιάστατου ανιχνευτή ακμών (Infared machine tool 3D touch probe) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642

Αποτελεί ένα ειδικό όργανο το οποίο πραγματοποιεί με χειροκίνητο τρόπο τον καθορισμό των συντεταγμένων του τεμαχίου στο χώρο κατεργασίας της εργαλειομηχανής. Το εξάρτημα τοποθετείται στον εργαλειοφόρα της μηχανής και με κατάλληλη εντολή που δίνει ο

χρήστης από το χειριστήριο ενσωματώνεται με την άτρακτο κύριας κίνησης, όπως και τα εργαλεία κοπής. Στη συνέχεια με χειροκίνητη κατεύθυνση προσεγγίζει το τεμάχιο σε διάφορα σημεία (ανάλογα με την κύκλο κατεργασίας κατεργασία) και με τη βοήθεια της ακίδας που διαθέτει αναγνωρίζει τις συντεταγμένες του στους 3 βασικούς άξονες. Οι συντεταγμένες αυτές μεταφέρονται αυτόματα στο λογισμικό της μηχανής και έτσι η μηχανή γνωρίζοντας και τις ακριβείς διαστάσεις του κοπτικού εργαλείου είναι σε θέση να μετακινηθεί και να πραγματοποιήσει την κατεργασία χωρίς σφάλματα.

### 3.1.4 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης Kennametal

Τα εργαλεία σφαιρικής απόληξης χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για τη δημιουργία καλουπιών και μητρών. Είναι ιδανικά για κατεργασίες φινιρίσματος στις τρεις κατευθύνσεις σε επιφάνειες ελεύθερης μορφής. Το κάτω μέρος των εργαλείων αυτών είναι ημισφαιρικό ενώ κατά μήκος του υπάρχει κοπτική ακμή. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι ολόσωμα ή διαιρετά χρησιμοποιώντας ένθετα πλακίδια σφαιρικής μορφής. Η σφαιρική απόληξη του εργαλείου έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη αντοχή και μπορεί να υποστεί υψηλές τιμές πρόωσης πράγμα που καθιστά την κατεργασία άκρως παραγωγική. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 20mm της Kennametal (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Κοπτικό εργαλείο Kennametal σφαιρικής απόληξης 20mm

### 3.1.5 Δυναμόμετρο Kistler

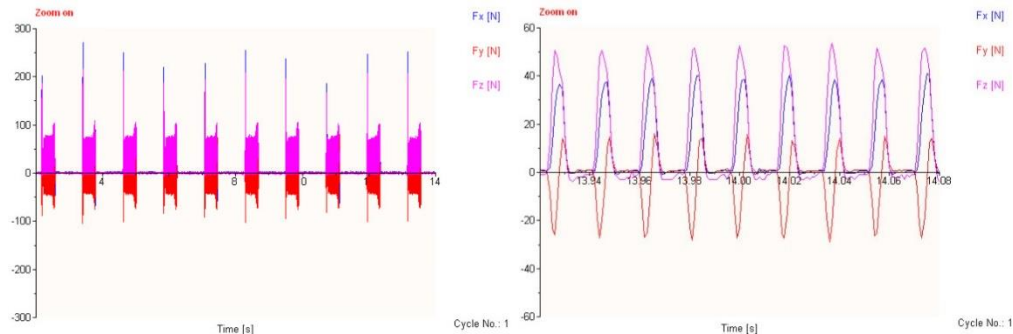
Για την μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμόμετρο Kistler τύπου 9257BA, όπως αυτό φαίνεται στο [σχήμα 3.9](#). Το δυναμόμετρο αυτό έχει τη δυνατότητα μέτρησης τριών συνιστωσών δυνάμεων ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ). Το σήμα επεξεργάζεται από μία μονάδα ελέγχου τύπου 5233A και τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται απ' ευθείας στην οθόνη ενός Η/Υ όπου είναι συνδεδεμένο το δυναμόμετρο, ώστε να εντοπίζονται αμέσως τυχόν λάθη κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.



Σχήμα 3.9: Δυναμόμετρο Kistler 9257BA και Μονάδα ελέγχου Kistler 5233<sup>A</sup>

Το δυναμόμετρο τοποθετήθηκε πάνω στη μέγγενη που φέρει η τράπεζα της εργαλειομηχανής και έγινε σύσφιξη στους 3 τόνους για τη συγκράτηση του και την αποφυγή δονήσεων

που αλλοιώνουν τις μετρήσεις των πειραμάτων. Τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα τοποθετήθηκαν πάνω στο δυναμόμετρο και προσδέθηκαν στις οπές που διαθέτει το δυναμόμετρο όπως φαίνεται αφού πρώτα αντίστοιχες οπές είχαν δημιουργηθεί και στο τεμάχιο σε συγκεκριμένες θέσεις. Οι μετρήσεις των δυνάμεων κοπής γίνονται σε πραγματικό χρόνο, την ώρα που παίρνει μέρος η κατεργασία.



Σχήμα 3.10: Αποτέλεσμα δυναμομέτρησης

Το δυναμόμετρο Kistler επιτρέπει τη δυνατότητα μέτρησης δυνάμεων σε συγκεκριμένες εμβέλειες οι οποίες προκύπτουν από τις συνθήκες κατεργασίας. Οι εμβέλειες που διαθέτει το δυναμόμετρο είναι οι εξής:

- $F_x, F_y : \pm 0.5 \text{ KN}, F_z : \pm 1 \text{ KN},$
- $F_x, F_y : \pm 1 \text{ KN}, F_z : \pm 2 \text{ KN},$
- $F_x, F_y : \pm 2 \text{ KN}, F_z : \pm 5 \text{ KN}$

Για τη χρήση του δυναμόμετρου και την συλλογή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των δυνάμεων κοπής απαιτείται η σύνδεση του με Η/Υ και η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού Dynoware. Το Dynoware είναι ένα γενικής χρήσης πακέτο λογισμικού για την απόκτηση και την απεικόνιση δεδομένων, κατάλληλο για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής και γενικών εφαρμογών δυναμομέτρησης. Στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται μία δυναμομέτρηση που έγινε για ένα πείραμα καθώς και η παραπάνω επεξεργασία που απαιτείται για την ανάλυση των 3 συνιστωσών της κύριας δύναμης κοπής.

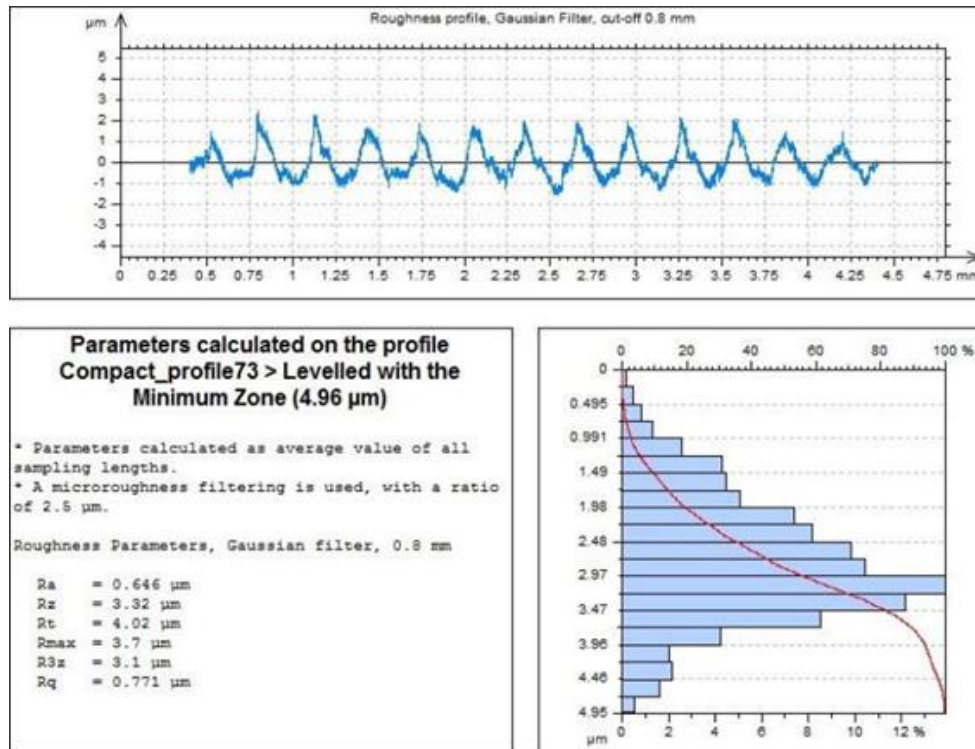
### 3.1.6 Τραχύμετρο Diavite Compact

Για τις μετρήσεις της τραχύτητας των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα τραχύμετρο τύπου στυλίσκου. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το τραχύμετρο Diavite Compact που απεικονίζεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Τραχύμετρο Diavite Compact

Ο στυλίσκος που διαθέτει το εργαστήριο m3 και που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι για γενικές μετρήσεις τύπου SH. Για τη ρύθμιση του τραχύμετρου και την εισαγωγή τυχών σφαλμάτων στις μετρήσεις έγινε καλιμπράρισμα του οργάνου με τη βοήθεια ενός πλακιδίου συγκεκριμένης τραχύτητας  $Ra=0.3\mu m$ . Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μια τραχυμέτρησης.



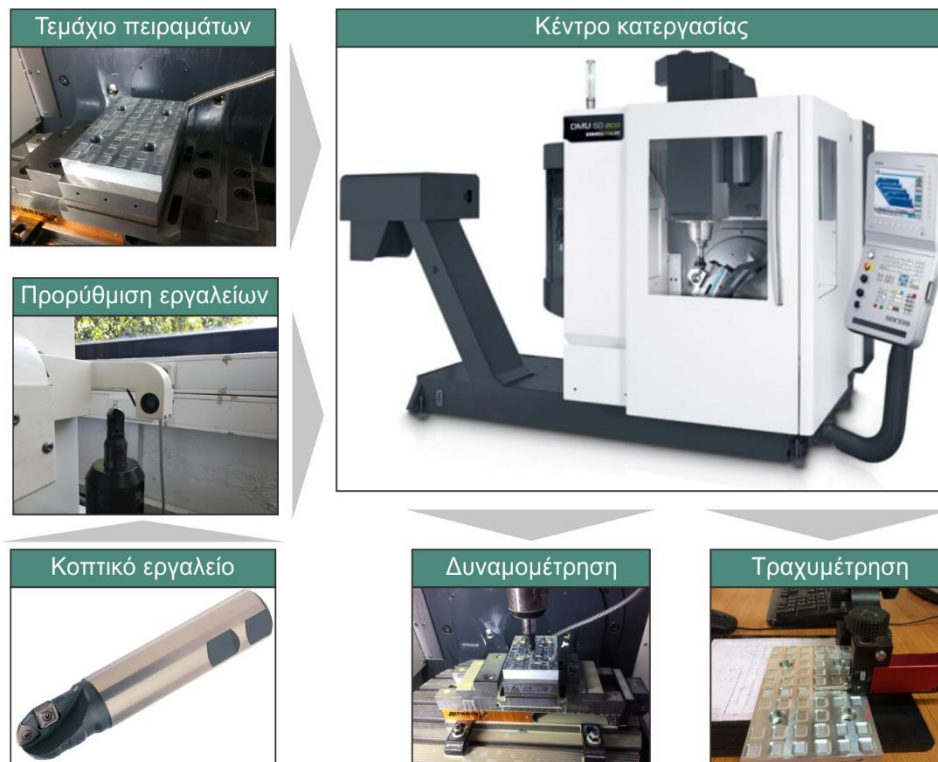
Σχήμα 3.12: Αποτέλεσμα τραχυμέτρησης

Το τραχύμετρο συνδέεται με τον υπολογιστή και με τη βοήθεια ενός λογισμικού πραγματοποιεί τις μετρήσεις. Παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης και μέσω του ίδιου του τραχύμετρου από το μενού που διαθέτει καθώς επίσης και ρύθμιση των παραμέτρων της μέτρησης όπως το εγκάρσιο μήκος μετακίνησης του στυλίσκου και του μήκους αποκοπής. Το λειτουργικό σύστημα που υπάρχει στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές του εργαστηρίου είναι το Diasoft Basic.

### 3.2 Εκτέλεση πειραμάτων

Η εκτέλεση των πειραμάτων έγινε σε δύο κύρια στάδια: Αρχικά εκπονήθηκαν πειράματα κατεργασίας της επιφάνειας με διαφορετικές συνθήκες και στρατηγικές φραιζαρίσματος μαζί με πειράματα για τον έλεγχο των δυνάμεων κοπής. Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού μηχανημάτων και λογισμικού. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το κάθε πείραμα αποτελούνταν από ένα τετράγωνο διαστάσεων  $6 \times 6 mm$  χαραγμένο πάνω σε ένα τεμάχιο του οποίου οι διαστάσεις ήταν  $150 \times 100 \times 20 mm$ . Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την κοπή ήταν ένα κονδύλι σφαιρικής απόληξης διαμέτρου  $20 mm$ . Πιο συγκεκριμένα έγιναν κατεργασίες σε 7 τεμάχια ενώ ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων ήταν 360 (180 για ομόρροπο φραιζάρισμα και 180 για αντίρροπο φραιζάρισμα).



Σχήμα 3.13: Διαδικασία πειραμάτων

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία των πειραμάτων ήταν ένα κράμα αλουμινίου. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του καθώς και η υψηλή τεχνολογία που εφαρμόζεται εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα των εφαρμογών του. Η χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση πολύ καλή ποιότητα στα τελικά προϊόντα με χαμηλό παραγωγικό κόστος. Το αλουμίνιο βρίσκει εφαρμογές κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, τη φαρμακοβιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το αλουμίνιο 5083 'Ο' H111. Το κύριο στοιχείο του κράματος είναι το Μαγνήσιο (Mg) ενώ έχει υποστεί ανόπτηση και ενδοτράχυνση. Οι τυπικές ιδιότητες του κράματος 5083 σύμφωνα με την American Society of Metals (ASM) παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

<b>Πυκνότητα [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	2650
<b>Σημείο Τήξης [°C]</b>	570
<b>Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]</b>	72
<b>Συντελεστής Θερμικής Διαστολής [m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>K]</b>	25 x 10 <sup>-6</sup>
<b>Θερμική Αγωγιμότητα [W/Mk]</b>	121
<b>Ηλεκτρική Αντίσταση [Nω.m]</b>	58
<b>Θερμοκρασία πλήρους ανόπτησης [°C]</b>	413
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό [MPa]</b>	172-380
<b>Όριο διαρροής [MPa]</b>	125-200
<b>Επιμήκυνση [%]</b>	14
<b>Σκληρότητα [HB]</b>	75

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες κράματος αλουμινίου 5083 'Ο' H111

Οι παράμετροι που καθόρισαν και διαφοροποίησαν τα πειράματα ήταν:

- Η ταχύτητα κοπής Vc (m/min)



- Η πρόωση ανά στροφή και δόντι του κοπτικού εργαλείου  $f_z$  (mm/rev,z)
- Το ακτινικό βάθος κοπής  $t_{xy}$  (mm)
- Το αξονικό βάθος κοπής  $t_z$  (mm)
- Η γωνία κλίσης του εργαλείου στην κατεύθυνση της πρόωσης  $\varphi$  (°)
- Η γωνία κλίσης του εργαλείου κάθετα στην κατεύθυνση της πρόωσης  $\omega$  (°)
- Ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα

Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις παραπάνω παραμέτρους είναι οι ακόλουθες:

- $V_c=60$  m/min, σταθερό σε όλα τα πειράματα
- $f_z=0.1$ ,  $f_z=0.3$  και  $f_z=0.5$  mm/rev,z
- $t_{xy}=0.3$  και  $t_{xy}=0.6$  mm
- $t_z=0.3$  και  $t_z=0.6$  mm
- $\varphi=10^\circ$ ,  $\varphi=5^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ ,  $\varphi=-5^\circ$  και  $\varphi=10^\circ$
- $\omega=-5^\circ$ ,  $\omega=0^\circ$  και  $\omega=5^\circ$

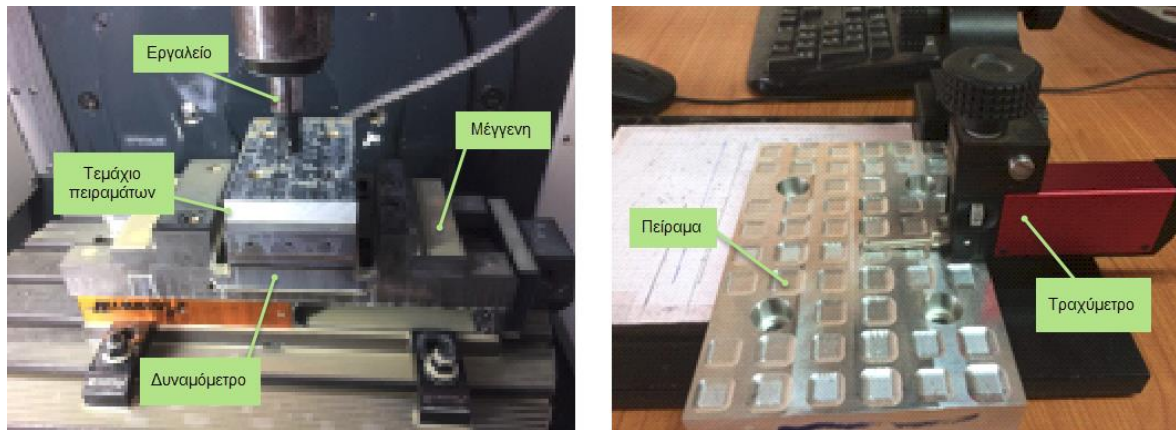
```
G90 G54 G71 G17
T="BALL20" M06
S2795.483402 M03
M08
G00 X54.300000 Y21.173367 Z0.811574
G01 X54.300000 Y21.173367 Z-4.188426 F838.645020
X54.300000 Y27.082213 Z-5.230315
Z-0.230315
G00 X54.900000 Y21.173367 Z0.811574
G01 X54.900000 Y21.173367 Z-4.188426 F838.645020
X54.900000 Y27.082213 Z-5.230315
Z-0.230315
G00 X55.500000 Y21.173367 Z0.811574
G01 X55.500000 Y21.173367 Z-4.188426 F838.645020
X55.500000 Y27.082213 Z-5.230315
Z-0.230315
G00 X56.100000 Y21.173367 Z0.811574
G01 X56.100000 Y21.173367 Z-4.188426 F838.645020
X56.100000 Y27.082213 Z-5.230315
Z-0.230315
.....
.....
.....
G00 Z50
M30
```

Σχήμα 3.14: Απόσπασμα G-κώδικα ενός πειράματος

Ο απαραίτητος G κώδικας για τον σχεδιασμό των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με σύνταξη κώδικα σε περιβάλλον MATLAB. Οι μεταβλητές, που καθόρισαν τα αποτελέσματα του, ήταν οι παράμετροι κατεργασίας (κοπής). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση του κώδικα ήταν ουσιαστικά τα μονοπάτια που ακολούθησε το εργαλείο σφαιρικής απόληξης (toolpaths) για την κατεργασία του κάθε πειράματος. Το μονοπάτι του εργαλείου για το κάθε πείραμα αποτελούνταν από συντεταγμένες βάση των οποίων έπρεπε να κινηθεί το εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο για τον σχηματισμό τετράγωνων επιφανειών. Η διαδρομή αυτή αποτελούσε τον G-κώδικα (κώδικας μηχανής) για τον προγραμματισμό της εργαλειομηχανής. Οι G-κώδικες πρόκυψαν ως αρχεία εγγράφου .txt και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν με μονάδα αποθήκευσης αρχείων στον υπολογιστή της μηχανής. Επιπλέον από τον κώδικα προέκυψε και μια προσομοίωση της διαδρομής του εργαλείου για τον σχηματισμό του κάθε πειράματος ούτως ώστε να υπάρχει μια πλήρης εικόνα των πειραμάτων πάνω στο τεμάχιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κύριες μεταβλητές που καθόρισαν τον σχηματισμό των πειραμάτων ήταν οι γωνίες  $\varphi$  και  $\omega$  (γωνία κλίσης στην κατεύθυνση της πρόωσης

και γωνία κλίσης κάθετη στην κατεύθυνση της πρόωσης αντίστοιχα), οι διαστάσεις του κάθε πειράματος, οι διαστάσεις της προς κατεργασία επιφάνειας του τεμαχίου. Στο σχήμα 3.14 φαίνεται τμήμα ενός G-κώδικα για κάποιο πείραμα.

Στο σχήμα 3.15 φαίνονται κάποια στιγμιότυπα από την πειραματική διαδικασία ενώ στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται ο πίνακας των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με μια συγκεκριμένη σειρά.



Σχήμα 3.15: Στιγμιότυπα από την πειραματική διαδικασία

Η διαφοροποίηση των πειραμάτων σε σχέση με τις συνθήκες που επιλέχθηκαν έγινε ως εξής:

- Ανά 1 πείραμα μεταβαλλόταν το αξονικό βάθος κοπής  $t_z$  από 0.3 σε 0.6mm
- Ανά 2 πειράματα μεταβαλλόταν η πρόωση ανά στροφή και δόντι  $f_z$  παίρνοντας τις τιμές 0.1, 0.2, 0.3mm/rev,z
- Ανά 6 πειράματα μεταβαλλόταν η γωνία κλίσης  $\omega$  παίρνοντας τις τιμές:  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$
- Ανά 18 πειράματα μεταβαλλόταν το ακτινικό βάθος κοπής  $t_z$  από 0.3 σε 0.6 mm
- Ανά 36 πειράματα μεταβαλλόταν η γωνία κλίσης  $\phi$  παίρνοντας τις τιμές:  $10^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $-0^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $10^\circ$



Σχήμα 3.16: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων

### 3.3 Αποτελέσματα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα πειράματα με βάθος κοπή 0.6mm καθώς σε αυτά παρουσιάζονται ιδιαιτερότητες. Επίσης μόνο οι δυνάμεις στον z άξονα λήφθηκαν υπόψιν από το μοντέλο καθώς είναι οι μεγαλύτερες κατά μέτρο και η φθορά του εργαλείου προκαλείται από αυτές. Στον πίνακα 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές της τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής για τα ομόρροπα και τα αντίρροπα πειράματα αντίστοιχα.




Περιοχή	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Fz [N]	Περιοχή	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Fz [N]
2	4.847	75.17	92	3.349	58.88
4	6.71	112.25	94	3.081	73.19
6	7.531	136.65	96	3.392	85.13
8	4.721	72.22	98	2.627	52.39
10	6.74	107.37	100	5.207	67.62
12	4.224	120.07	102	6.337	78.9
14	5.435	71.27	104	3.698	40.26
16	7.338	100.54	106	3.32	49.33
18	7.068	118.12	108	3.968	55.86
20	2.416	47.8	110	4.58	56.8
22	3.103	66.18	112	4.306	68.79
24	4.519	81.96	114	4.523	95.83
26	2.322	45.85	116	4.41	69.29
28	3.626	63.95	118	5.228	85.14
30	2.977	74.17	120	4.852	102.49
32	2.748	47.8	122	3.564	67.83
34	2.765	59.54	124	4.994	86.36
36	3.609	71.24	126	4.23	101
38	5.27	81.01	128	1.825	47.36
40	5.171	111.55	130	2.057	57.26
42	5.74	140.58	132	2.893	64.3
44	5.394	78.08	134	1.416	47.35
46	8.575	101.61	136	1.804	60.63
48	8.347	124	138	2.61	71.73
50	5.525	79.05	140	1.781	44.96
52	5.948	84.91	142	2.415	55.27
54	6.003	116.16	144	2.343	70.06
56	2.706	53.17	146	5.35	58.06
58	3.28	71.24	148	6.525	77.65
60	3.928	86.67	150	5.877	86.17
62	2.128	49.11	152	4.583	60.5
64	5.193	61.48	154	3.856	74.97
66	5.719	72.84	156	4.489	90.21
68	3.344	42.4	158	3.77	62.32
70	3.438	53.66	160	4.89	79.65
72	3.06	64.17	162	3.836	97.21
74	5.029	79.3	164	2.064	41.83
76	5.092	110.2	166	2.363	50.9
78	4.916	119.78	168	2.731	61.26
80	3.814	73.6	170	1.645	41.54
82	6.289	97.58	172	1.923	61.74
84	8.886	109.5	174	4.531	68.85
86	5.785	61.9	176	5.289	47.23
88	5.814	78.25	178	9.322	53.16
90	6.123	85.8	180	8.417	69.21

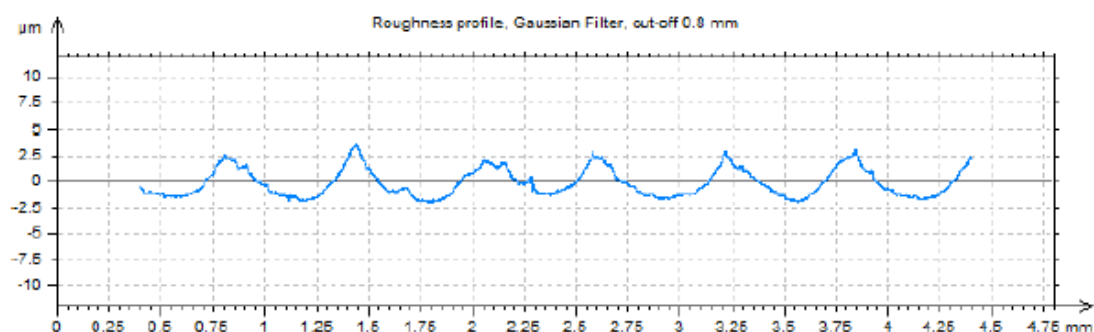
Πίνακας 3.2: Πίνακας τραχυμετρήσεων και δυναμομετρήσεων για βάθος κοπής 0,6mm και ομόρροπο φραιζάρισμα

Περιοχή	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Fz [N]	Περιοχή	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Fz [N]
182	10,243	77,5	272	2.911	53.68
184	11,369	95,55	274	3.477	73.35
186	10,576	122,83	276	4.129	84.46
188	10,95	76,31	278	2.3	47.9
190	10,066	90,77	280	4.229	66.71
192	10,506	112,37	282	4.149	77.35
194	8,687	66,76	284	3.319	38.81
196	7,954	89,56	286	3.568	50.43
198	7,6458	113,95	288	3.586	58.5
200	4,516	51,33	290	3.478	64.18
202	7,255	68,76	292	4.923	85.22
204	6,738	86,74	294	5.158	95.52
206	3,545	47,93	296	4.531	72.06
208	5,2	63,68	298	5.172	84.12
210	4,592	81,77	300	5.626	96.07
212	3,776	63,04	302	4.787	56.74
214	6,241	82,96	304	4.733	71.38
216	5,365	85,13	306	4.369	85.05
218	5,595	63,44	308	1.637	52.05
220	9,13	86,26	310	2.21	63.97
222	9,244	110,64	312	2.923	67.59
224	5,278	59,62	314	1.365	46.71
226	5,538	78,67	316	1.788	57.72
228	5,598	97,61	318	2.344	64.73
230	4,601	59,85	320	1.205	38.66
232	4,907	78,72	322	1.809	50.21
234	4,472	95,9	324	2.451	57.21
236	3,161	43,37	326	6.525	69.08
238	6,27	57,16	328	4.706	87.34
240	5,678	67,04	330	4.749	104.51
242	2,527	40,87	332	4.664	64.21
244	2,601	49,46	334	3.433	90.52
246	2,763	62,27	336	3.647	102.88
248	2,425	36,1	338	5.109	64.3
250	2,331	47,35	340	3.652	84.91
252	2,903	58,21	342	4.097	102.49
254	9,946	70,08	344	1.987	42.32
256	10,954	98,27	346	2.103	58.72
258	12,512	123,19	348	2.265	72.13
260	5,958	68,3	350	1.388	44.75
262	7,194	96,79	352	1.748	62.6
264	6,983	111,66	354	1.56	70.89
266	5,729	57,18	356	1.956	45.69
268	5,094	78,56	358	2.129	57.04
270	5,467	92,8	360	2.787	69.29

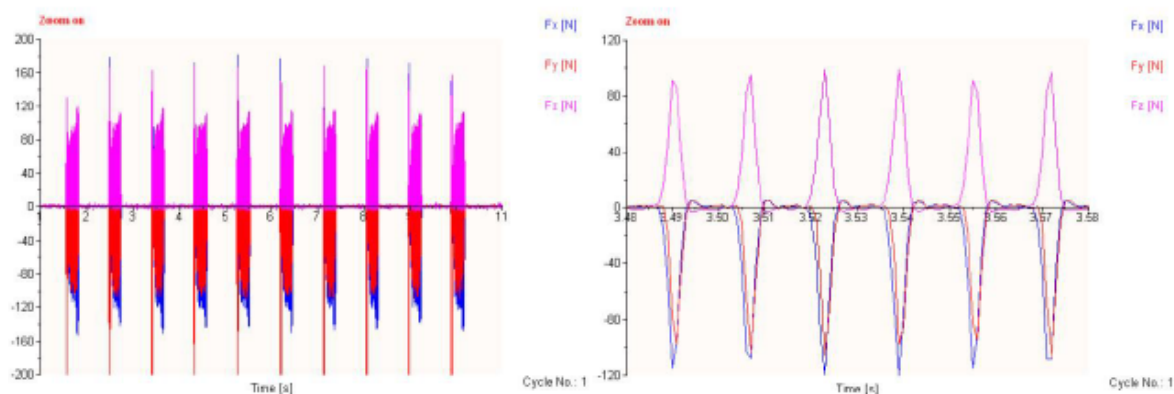
Πίνακας 3.3: Πίνακας τραχυμετρήσεων και δυναμομετρήσεων για βάθος κοπής 0,6mm και αντίρροπο φραιζάρισμα

ΠΕΙΡΑΜΑ	84	
ΤΕΜΑΧΙΟ	2	
ΕΙΔΟΣ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ	(Ο) ΕΛΚΤΙΚΟ	
ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ	AL-5083	
ΑΞΟΝΙΚΟ ΒΑΘΟΣ	$t_z$	
ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΒΑΘΟΣ	$t_{xy}$	
ΠΡΟΩΣΗ (ανά στρφ & δόντι)	$f_z$	
ΚΛΙΣΗ παράλληλα σε πρόωση	$\varphi$	
ΚΛΙΣΗ κάθετα σε πρόωση	$\omega$	
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	$V_c$	

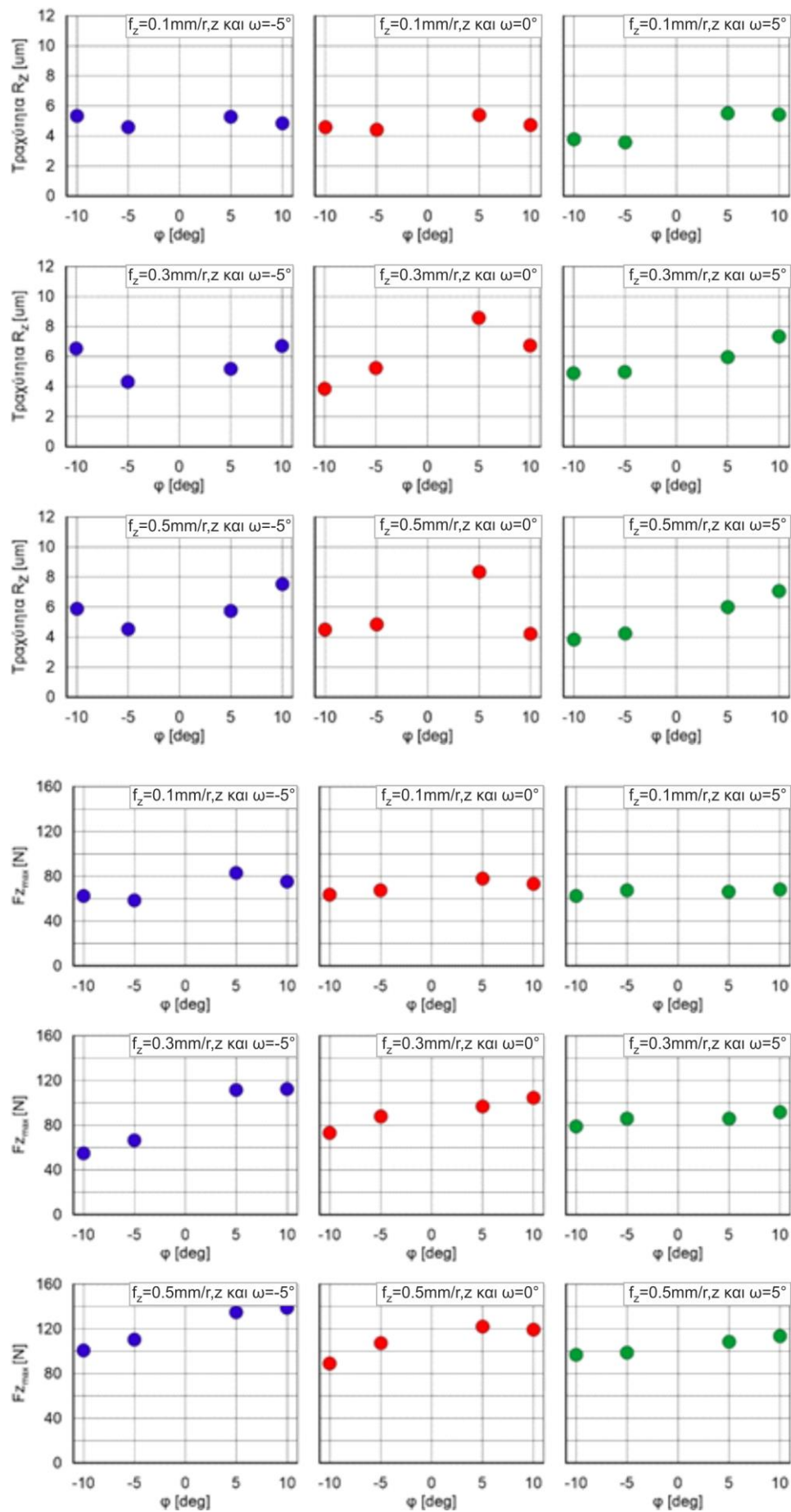
Τραχυμετρήσεις $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]										$R_{z_{\max}}$	$R_{z_{\min}}$	$R_{z_{\text{mean}}}$
4.83	5.02	4.81	5	5.1	4.41	4.73	4.84	4.91	4.87	5.1	4.41	4.852



Δυναμομετρήσεις [N]								
$F_{x_{\max}}$	$F_{y_{\max}}$	$F_{z_{\max}}$	$F_{x_{\min}}$	$F_{y_{\min}}$	$F_{z_{\min}}$	$F_{x_{\text{mean}}}$	$F_{y_{\text{mean}}}$	$F_{z_{\text{mean}}}$
5.86	5.86	107.37	-143.55	-105.47	-2.98	-18.87	-13.9	17.1



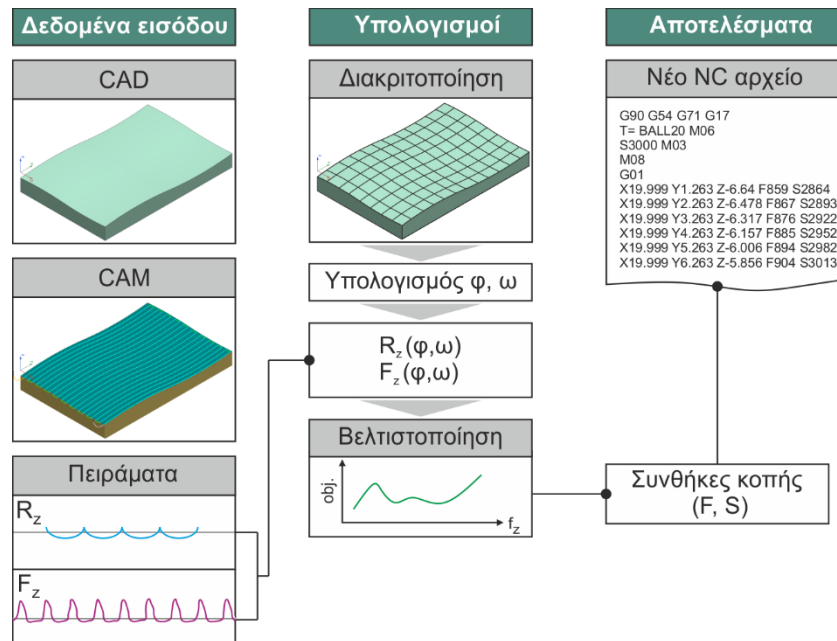
Σχήμα 3.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενός πειράματος



Σχήμα 3.18: Διαγράμματα τραχύτητας και δυνάμεων για  $t_{xy}=0.6\text{mm}$ ,  $t_z=0.6\text{mm}$ ,  $v_c=60\text{m/min}$

## 4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή. Σκοπός του είναι η ελαχιστοποίηση κάποιων παραμέτρων όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, οι δυνάμεις κοπής και ο χρόνος κατεργασίας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσα από ένα μοντέλο πολυκριτήριας βελτιστοποίησης. Η μεταβλητή του προβλήματος είναι η πρόωση ανά περιστροφή και δόντι. Για την ευκολότερη κατανόηση και χρήση του μοντέλου αναπτύχθηκε ένα λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic και χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Snap. Το λογισμικό αυτό συνεργάζεται με το σύστημα CAD/CAM Siemens NX 11.0 και καλείται μέσα από αυτό. Στο [σχήμα 4.1](#) παρουσιάζεται το μοντέλο και τα επιμέρους στοιχεία που το απαρτίζουν.



Σχήμα 4.1: Σχεδιάγραμμα μοντέλου βελτιστοποίησης

### 4.1 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου

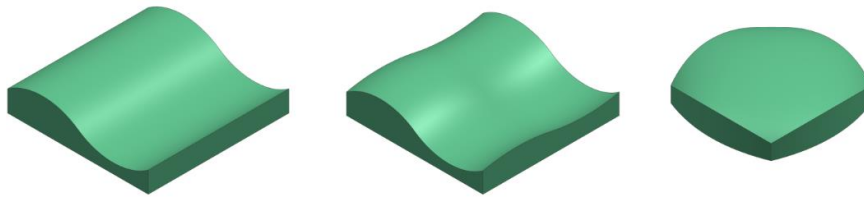
Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου που είναι τα ακόλουθα:

- Γεωμετρία και υλικό κατεργαζόμενου τεμαχίου από λογισμικό CAD/CAM
- Εργαλείο κοπής
- Μονοπάτι εργαλείου (toolpath) από λογισμικό CAD/CAM
- Βάση δεδομένων που αποτελείται από πειράματα τραχύτητας και δυνάμεων κοπής

#### 4.1.1 Γεωμετρία κατεργαζόμενου τεμαχίου

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σκοπός του μοντέλου είναι να βελτιστοποιήσει μονοπάτια φινιρίσματος σε κατεργασίας πολυαξονικών επιφανειών. Για το λόγο αυτό η γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου θα πρέπει να αποτελείται από τέτοιες επιφάνειες όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.2](#). Επίσης το μοντέλο μπορεί να επεξεργαστεί επιφάνειες που έχουν σχεδιαστεί και σε άλλα συστήματα CAD (Solidworks, Catia, Inventor, Creo) αλλά και αρχεία τύπου STL και STEP. Για να γίνει όμως θα πρέπει οι επιφάνειες αυτές να εισαχθούν στο NX και να αποθηκευτούν ως αρχεία με .prt κατάληξη. Η βελτιστοποίηση της κατεργασίας φινιρίσματος έχει νόημα σε επιφάνειες καλουπιών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και έτσι το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως είναι κράμα χάλυβα ή κράμα αλουμινίου.





Σχήμα 4.2: Ενδεικτικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανειών που εισάγονται στο μοντέλο

#### 4.1.2 Εργαλείο κοπής

Δύο τύποι εργαλείων μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο: κονδύλια σφαιρικής απόληξης και κωνικά εργαλεία σφαιρικής απόληξης. Τα εργαλεία αυτά αποτελούνται από ταχυχάλυβα ή από σκληρομέταλλα. Η χρήση των σκληρομετάλλων είναι εκτενέστερη στη βιομηχανία καθώς διατηρούν τη σκληρότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες που προκαλούνται από τις μεγάλες ταχύτητες κοπής. Μεγάλη ταχύτητα κοπής συνεπάγεται υψηλή παραγωγικότητα. Στις κατεργασίες φινιρίσματος η χρήση των παραπάνω εργαλείων είναι καθοριστική καθώς είναι τα μόνα που μπορούν να αποδώσουν την επιθυμητή γεωμετρία στο τελικό προϊόν. Η μόνη παράμετρος που είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του μοντέλου είναι η διάμετρος του εργαλείου στην κοπτική του ακμή. Στο [σχήμα 4.3](#) φαίνονται τα εργαλεία αυτά.

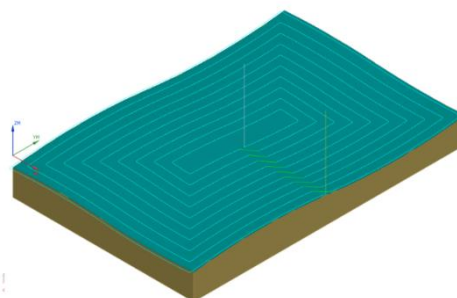


Σχήμα 3.3: Τύποι κοπτικών εργαλείων που εισάγονται στο μοντέλο, εργαλείο σφαιρικής απόληξης (αριστερά) και κωνικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης (δεξιά)

#### 4.1.3 Μονοπάτι εργαλείου από λογισμικό CAD/CAM

Το μοντέλο βελτιστοποίησης λειτουργεί με τον εξής τρόπο: πάνω σε ένα υπάρχον μονοπάτι για κατεργασία φινιρίσματος παρεμβάινει και αλλάζει την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και την πρόωση σε κάθε κίνηση του. Το μονοπάτι αποτελείται ουσιαστικά από μια αλληλουχία κινήσεων η οποία είναι γνωστή ως G κώδικας ή κώδικας NC. Ο G κώδικας περιλαμβάνει εντολές που αφορούν την κίνηση του εργαλείου (G,S,F εντολές) και κάποιες άλλες που επιτρέπουν ή όχι την πραγματοποίηση κάποιας ενέργειας (M εντολές). Ο κώδικας παρεμβάινει στις S και F εντολές και τις αλλάζει μέσα από μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Έτσι στον τελικό G κώδικα κάθε γραμμή περιέχει από μια S και F εντολή.

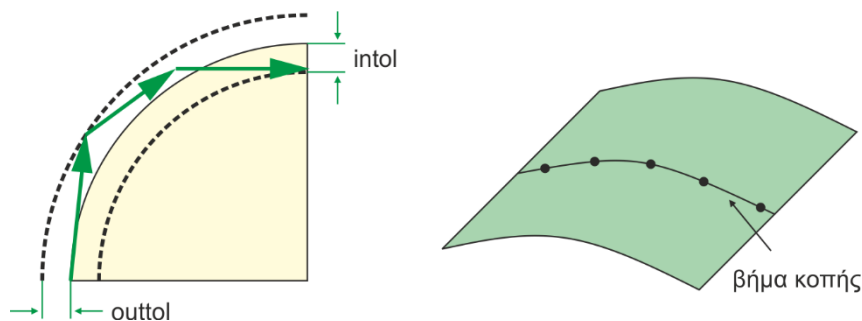
```
N1 G90 G54 G71 G17
N2 T="BALL20" M06
N3 S5513 M03
N4 M08
N5 G00 X5.479 Y4.5 Z3.92
N6 G01 X5.479 Y4.5 Z-1.079 F551.328
N7 X5.479 Y10.5 Z-1.079
N8 Z3.92
N9 G00 X6.076 Y4.5 Z3.868
```



Σχήμα 4.4: Τμήμα προγράμματος NC (αριστερά), μονοπάτι εργαλείου (toolpath) μέσα από το Siemens NX 11.0 (δεξιά)

Στο [σχήμα 4.4](#) φαίνεται η σύνταξη ενός G κώδικα. Η εισαγωγή του μονοπατιού στο μοντέλο είναι επίσης απαραίτητη για την εξαγωγή των σημείων επαφής του εργαλείου στην επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

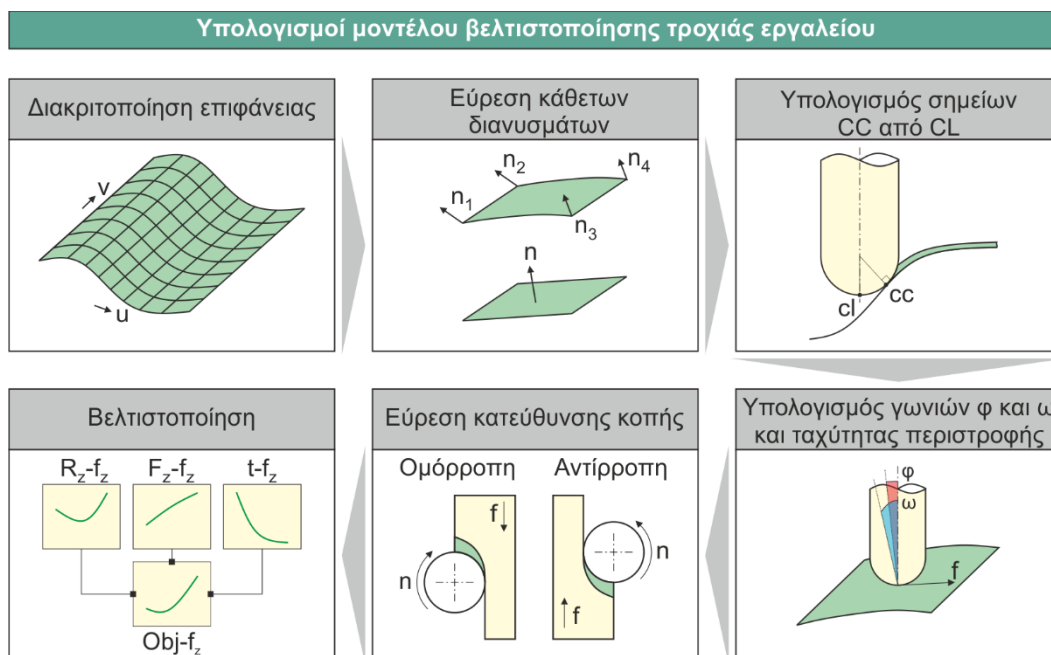
Βασικές παράμετροι ενός μονοπατιού αποτελούν το βήμα κοπής (cut step) και η απόκλιση από την επιφάνεια (intol και outtol). Το βήμα κοπής είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών G01 κινήσεων. Η τιμή του βήματος πρέπει να είναι μικρή για καλύτερη ακρίβεια. Στα πλαίσια της εργασίας βρέθηκε πως για κατεργασία με εργαλείο σφαιρικής απόληξης 20mm η μέγιστη τιμή του βήματος κοπής δε θα πρέπει να ξεπερνά το 1mm. Οι παράμετροι intol και outtol αφορούν την απόσταση του κάθε G01 με την πραγματική επιφάνεια. Και εδώ οι τιμές των παραμέτρων αυτών θα πρέπει να είναι μικρές (0.03mm). Στο [σχήμα 4.5](#) φαίνονται οι παράμετροι αυτοί.



Σχήμα 4.5: Παράμετροι intol και outtol (αριστερά), βήμα κοπής (δεξιά)

## 4.2 Βασικοί υπολογισμοί του μοντέλου

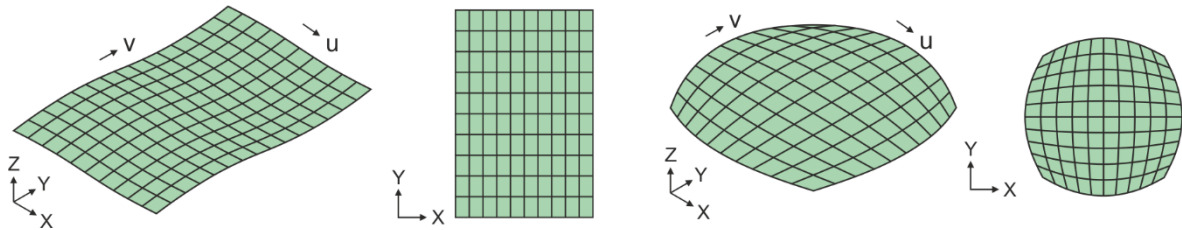
Σκοπός του μοντέλου είναι η εξαγωγή ενός βελτιστοποιημένου NC αρχείου ως προς την πρόωση και ταχύτητα περιστροφής με την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας, των δυνάμεων κοπής και του χρόνου κατεργασίας. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν του τις κλίσεις της επιφάνειας και τις διαστάσεις του τεμαχίου. Οι υπολογισμοί του μοντέλου βελτιστοποίησης έγιναν μέσω διακριτών σταδίων όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.6](#).



Σχήμα 4.6: Υπολογισμοί μοντέλου βελτιστοποίησης

#### 4.2.1 Διακριτοποίηση επιφάνειας

Ο μόνος τρόπος για να μπορέσει ο κώδικας να επεξεργαστεί μια επιφάνεια είναι με τη διακριτοποίησή της. Τέσσερα σημεία αποτελούν ένα στοιχείο της επιφάνειας. Το κάθε στοιχείο μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα και εξαρτάται από τη διακριτοποίηση που επιθυμεί ο χρήστης και τη γεωμετρία της επιφάνειας (σχήμα 4.7). Μετά από πολλές δοκιμές βρέθηκε πως η βέλτιστη διακριτοποίηση απαιτεί το μέγεθος της ακμής του κάθε στοιχείου να είναι ίσο με το μήκος του βήματος κοπής.



Σχήμα 4.7: Τύποι πλεγματοποίησης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας

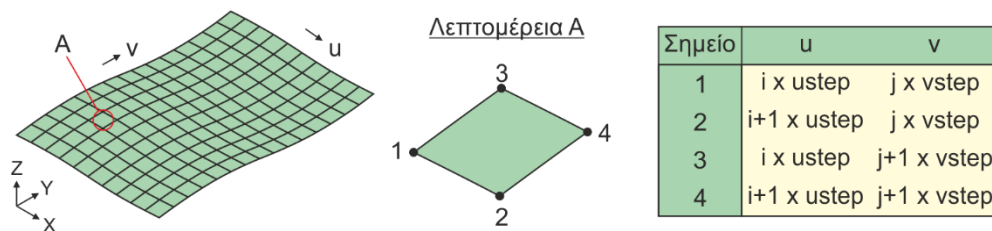
Η επιφάνεια ορίζεται μέσα από τη βιβλιοθήκη Snap ως μια συνάρτηση με όνομα Face.Position και με δεδομένα εισόδου τις θέσεις στα διανύσματα κόμβων u και v. Τα διανύσματα κόμβων είναι κανονικοποιημένα στη μονάδα. Το βήμα για την κατεύθυνση u και v δίνεται από την εξίσωση 4.1 και 4.2.

$$ustep = i/nu \quad i = 0, \dots, nu-1 \quad (4.1)$$

$$vstep = j/nv \quad j = 0, \dots, nv-1 \quad (4.2)$$

$$cog = (p(0,0) + p(0,1) + p(1,0) + p(1,1))/4 \quad (4.3)$$

Τέσσερα γειτονικά στοιχεία αποτελούν ένα στοιχείο της επιφάνειας (σχήμα 4.8). Αξίζει να αναφερθεί πως οι κόμβοι των στοιχείων συνδέονται γραμμικά μεταξύ τους. Έτσι για την καλύτερη προσέγγιση της επιφάνειας, η πλεγματοποίηση πρέπει να είναι πυκνή. Απαραίτητο είναι και το κέντρο της επιφάνειας (cog) το οποίο δίνεται από την εξίσωση 4.3.



Σχήμα 4.8: Γειτονικοί κόμβοι που αποτελούν ένα στοιχείο

#### 4.2.2 Υπολογισμός κάθετου διανύσματος και κέντρου σε κάθε στοιχείο

Τα κάθετα διανύσματα ορίζονται μέσα από τη βιβλιοθήκη Snap ως συναρτήσεις με όνομα Face.Normal και με δεδομένα εισόδου τις θέσεις στα διανύσματα κόμβων u και v. Έτσι με βάση τα σημεία 1,2,3 και 4 βρίσκονται τα κάθετα διανύσματα τα οποία είναι και μοναδιαία (σχήμα 4.9). Κάθε στοιχείο όμως θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ένα κάθετο διάνυσμα και αυτό γίνεται με την εξίσωση 4.4. Επίσης υπολογίζονται οι γωνίες xz και yz (εξίσωση 4.5 και 4.6). Ο ρόλος τους θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Απαραίτητος είναι και ο υπολογισμός του κέντρου κάθε στοιχείου και δίνεται από την εξίσωση 4.7.

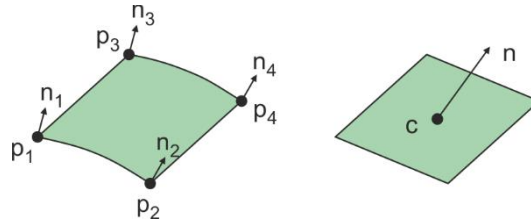
$$\vec{n} = (\vec{n}_1 + \vec{n}_2 + \vec{n}_3 + \vec{n}_4) / 4 \quad (4.4)$$

$$c = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 4 \quad (4.7)$$



$$\hat{xz} = \text{acos}(\vec{n}_x / (\sqrt{\vec{n}_x^2 + \vec{n}_z^2})) - \pi/2 \quad (4.5)$$

$$\hat{yz} = -\text{acos}(\vec{n}_y / (\sqrt{\vec{n}_y^2 + \vec{n}_z^2})) + \pi/2 \quad (4.6)$$

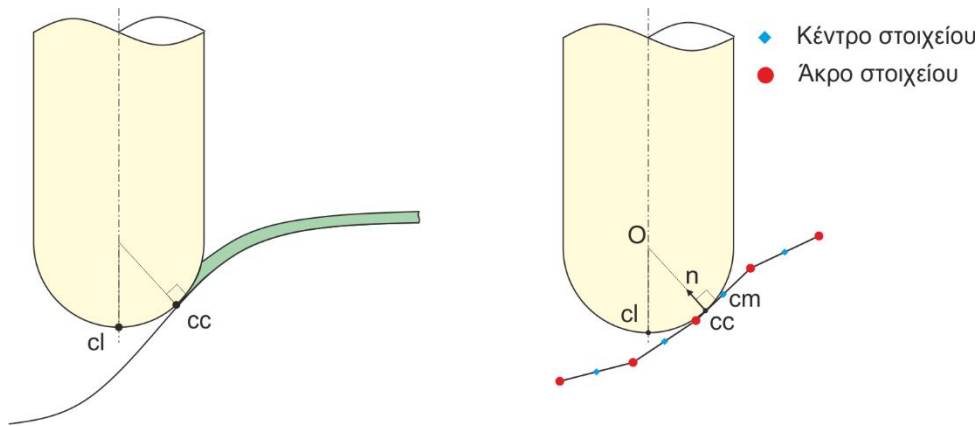


Σχήμα 4.9: Κάθετο διάνυσμα και κέντρο σε ένα στοιχείο της επιφάνειας

#### 4.2.3 Εξαγωγή σημείων CL από το NC αρχείο και υπολογισμός σημείων CC

Το επόμενο βήμα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι ο υπολογισμός των σημείων CC (Cutter Contact). Πρόκειται για τα σημεία στα οποία το κοπτικό εργαλείο εφάπτεται με την επιφάνεια. Ένα NC αρχείο αποτελείται από πολλές G01 κινήσεις όπως είναι γνωστό. Το σημείο προγραμματισμού του εργαλείου στον G-κώδικα βρίσκεται στο κάτω άκρο του εργαλείου. Το σημείο αυτό ονομάζεται CL (Cutter Location). Επόμενος ο αριθμός των CL σημείων που υπάρχουν σε ένα NC αρχείο είναι ίσος με τα CC σημεία.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο το NC αρχείο που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί. Ο κώδικας απομονώνει τις G01 κινήσεις και καταχωρεί τις συντεταγμένες σε μια λίστα. Αυτή η λίστα περιέχει τα CL σημεία. Στο [σχήμα 4.10](#) φαίνονται τα δύο αυτά σημεία.



Σχήμα 4.10: Σημείο θέσης CL και σημείο επαφής CC (αριστερά), υπολογισμός σημείου CC (δεξιά)

Στη συνέχεια για ένα σημείο CL υπολογίζεται η απόσταση  $Ocm$  για όλα τα στοιχεία της επιφάνειας όπου  $O$  είναι το κέντρο της σφαιρικής απόληξης του εργαλείου και  $cm$  το κέντρο κάποιου στοιχείου της επιφάνειας. Η ελάχιστη απόσταση καθορίζει το στοιχείο στο οποίο εφάπτεται το εργαλείο. Έστω ότι το στοιχείο αυτό είναι το  $k$ . Για το στοιχείο αυτό όπως και για όλα τα άλλα είναι γνωστά τα κάθετα διανύσματά τους. Έτσι σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζεται το σημείο CC. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος επιλέγει το επόμενο CL σημείο και επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία.

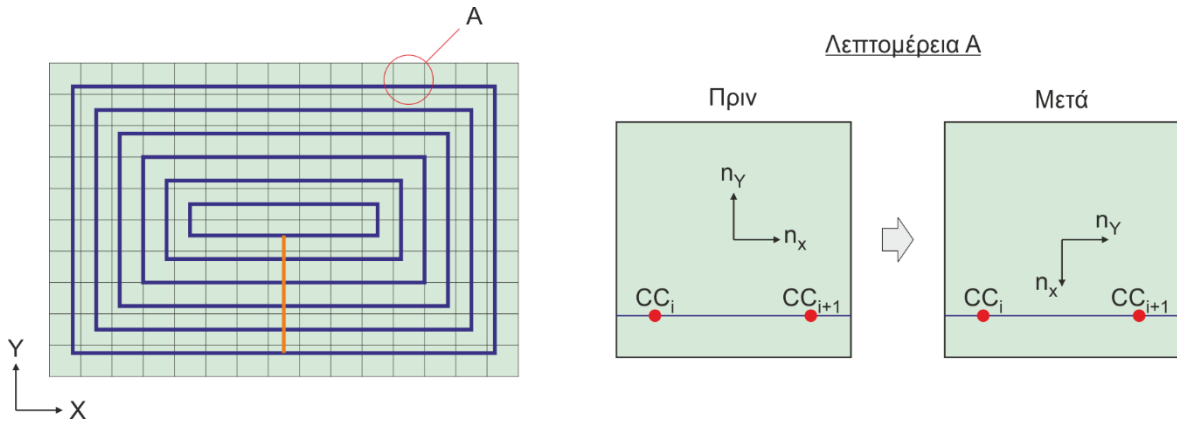
$$CC_x = CL_x + R \cos(\pi/2) + R \cos(\pi + \alpha) \quad \text{όπου } \alpha = -\text{acos}(\vec{n} \cdot \vec{x} / |\vec{n}|) \text{ με } \vec{x} = [1, 0, 0] \quad (4.8)$$

$$CC_y = CL_y + R \cos(\pi/2) + R \cos(\pi + \beta) \quad \text{όπου } \beta = -\text{acos}(\vec{n} \cdot \vec{y} / |\vec{n}|) \text{ με } \vec{y} = [0, 1, 0] \quad (4.9)$$

$$CC_z = CL_z + R \cdot \sqrt{(R^2 - (CC_x - CL_x)^2 - (CC_y - CL_y)^2)} \quad (4.10)$$

#### 4.2.4 Εύρεση γωνιών $\varphi$ και $\omega$ και υπολογισμός ταχύτητας περιστροφής εργαλείου

Στο σημείο αυτό ο αλγόριθμος καλείται να βρει για όλα τα σημεία CC (και CL) την κλίση που έχουν πάνω στην επιφάνεια. Η γωνία  $\varphi$  αντιπροσωπεύει την κλίση του εργαλείου με την επιφάνεια και βρίσκεται στην κατεύθυνση της πρόωσης, ενώ η  $\omega$  αντιπροσωπεύει την κλίση του εργαλείου με την επιφάνεια και βρίσκεται κάθετα στην κατεύθυνση της πρόωσης.

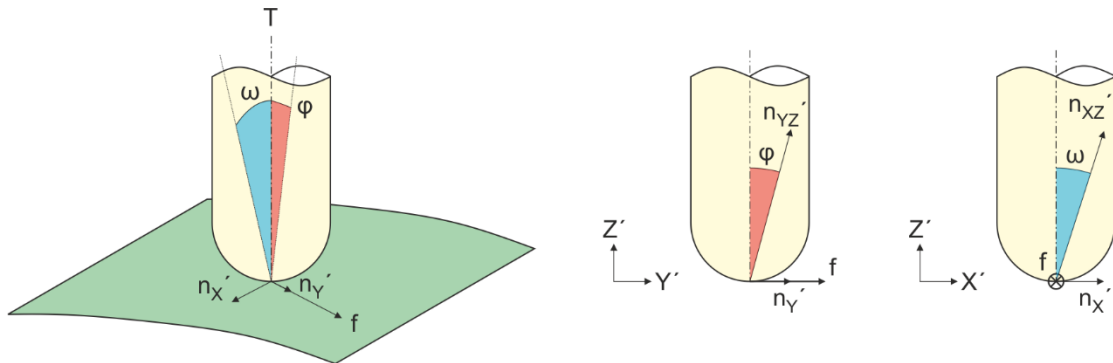


Σχήμα 4.11: Εύρεση γωνίας πρόωσης για ένα μονοπάτι περιφέρειας. Ο  $y$  άξονας έχει την ίδια κατεύθυνση με την πρόωση

Γίνεται φανερό πως αρχικά απαιτείται η εύρεση της γωνίας πρόωσης πάνω στο επίπεδο  $xy$ . Έχει θεωρηθεί πως η πρόωση βρίσκεται στον άξονα  $Y$ . Κάθε σημείο CL έχει τη δική του κατεύθυνση πρόωσης και μπορεί να μην συμβαδίζει με τον άξονα  $Y$ . Στην περίπτωση αυτή περιστρέφεται το κάθετο διάνυσμα του στοιχείου που αντιπροσωπεύει το σημείο CC με τέτοιο τρόπο ώστε ο νέος άξονας  $y'$  να συμβαδίζει με την κατεύθυνση της πρόωσης. Η γωνία κατεύθυνσης πρόωσης υπολογίζεται από την εξίσωση 4.11 και περιστροφή αυτή γίνεται από την εξίσωση 4.12. Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η διαδικασία αυτή.

$$\hat{x} = \arccos \left( (CC_{x_{i+1}} - CC_{x_i}) / \sqrt{(CC_{x_{i+1}} - CC_{x_i})^2 + (CC_{y_{i+1}} - CC_{y_i})^2} \right) - \pi/2 \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(x) & -\sin(x) \\ \sin(x) & \cos(x) \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad n'_z = n_z \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.12: Εύρεση γωνιών  $\varphi$  και  $\omega$  με βάση το νέο σύστημα συντεταγμένων  $X'Y'Z'$

Τώρα το μοντέλο είναι σε θέση να υπολογίσει τις γωνίες  $\phi$  και  $\omega$  (εξίσωση 4.13 και 4.14) που είναι απαραίτητες για τη διαδικασία βελτιστοποίησης όπως θα φανεί αργότερα. Στο σχήμα 4.12 φαίνονται οι γωνίες αυτές. Υπενθυμίζεται πως η εύρεση των γωνιών  $\phi$  και  $\omega$  και της ταχύτητας περιστροφής και μεταφοράς του εργαλείου γίνεται για κάθε ζεύγος  $CC_i$  με  $CC_{i+1}$ . Δηλαδή αν υπάρχουν  $N$  σημεία  $CC$  στον G-κώδικα τότε θα υπάρχουν  $N-1$  γωνίες  $\phi$  και  $\omega$  καθώς και  $N-1$  ταχύτητες περιστροφής εργαλείου και προώσεις.

$$\hat{\phi} = \arccos(\vec{n}_y / |\vec{n}_{yz}|) - \pi/2 \quad (4.13)$$

$$\hat{\omega} = \arccos(\vec{n}_x / |\vec{n}_{xz}|) - \pi/2 \quad (4.14)$$

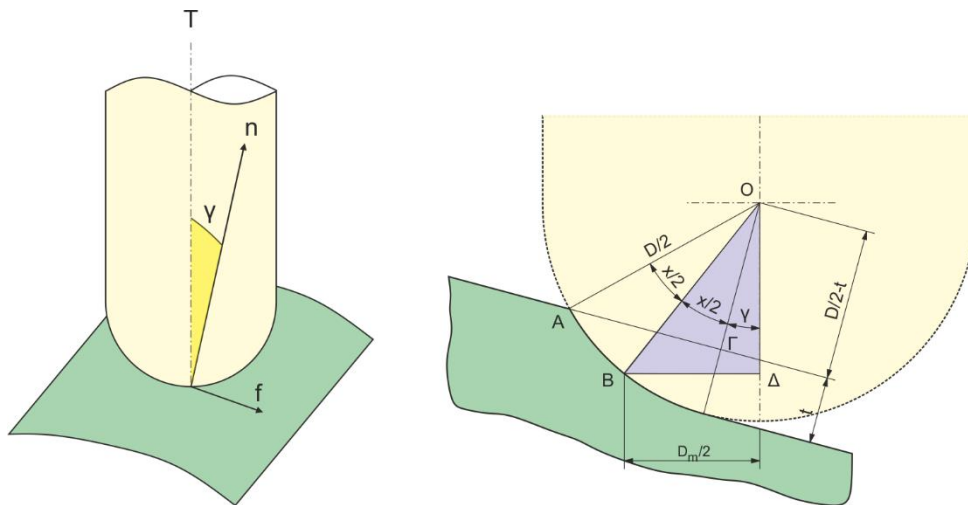
Στον προγραμματισμό μιας εργαλειομηχανής με ψηφιακή καθοδήγηση (CNC) σημαντικό ρόλο έχουν οι στροφές του κοπτικού εργαλείου ( $n$  σε rpm). Σε κάθε κατεργασία κοπής είναι επιθυμητή σταθερή ταχύτητα κοπής  $V_c$  (σε m/min) η οποία εξαρτάται κυρίως από το κατεργαζόμενο υλικό. Η ταχύτητα κοπής είναι συνήθως 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). Η ταχύτητα κοπής που επιλέχθηκε ήταν 60m/min καθώς για αυτή την ταχύτητα πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα στα οποία βασίζεται το μοντέλο βελτιστοποίησης.

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:

$$V_c = \frac{\pi D_m n}{1000} \quad (4.15)$$

$$\hat{\gamma} = \arccos(\vec{n} \cdot \vec{z} / |\vec{n}|) \quad \hat{\chi} = \arccos((R-t)/R) \quad D_m = 2R \cdot \sin(x/2 + |\gamma|) \quad (4.16)$$

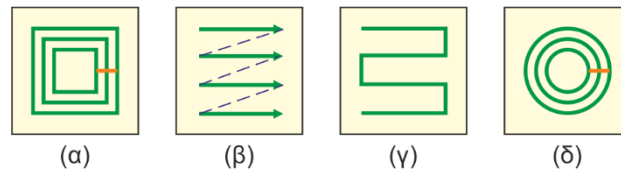
Η ενεργή διάμετρος υπολογίζεται με βάση το τόξο επαφής του εργαλείου στο τεμάχιο κατεργασίας και προφανώς διαφέρει στην περίπτωση που το εργαλείο βρίσκεται σε κάθετη θέση πάνω από το τεμάχιο ή σε κάποια άλλη κεκλιμένη θέση πλάγιας γωνίας. Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ενεργής διαμέτρου στη γενική περίπτωση όπου υπάρχει κλίση  $\phi$  και  $\omega$  σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αντί για τις γωνίες  $\phi$  και  $\omega$  χρησιμοποιείται μια τρίτη γωνία που βρίσκεται μεταξύ του άξονα του εργαλείου ( $Z$  άξονας) και του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας για το συγκεκριμένο  $CC$  σημείο. Η γωνία αυτή λέγεται  $\gamma$ . Το κάθετο φραιζάρισμα αποτελεί ειδική περίπτωση όπου η γωνία  $\gamma$  ισούται με μηδέν.



Σχήμα 4.13: Υπολογισμός ενεργής διαμέτρου σε φραιζάρισμα με κλίση  $\phi$  και  $\omega$

#### 4.2.5 Εύρεση κατεύθυνσης κοπής

Με την εισαγωγή του NC αρχείου στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης ο χρήστης καθορίζει τη στρατηγική φραιζαρίσματος που έχει επιλέξει. Τα μονοπάτια που εισάγονται στο μοντέλο έχουν προέλθει μέσω του NX 11.0 από τον τύπο κατεργασίας fixed contour. Αυτός ο τύπος κατεργασίας χρησιμοποιείται για το φινίρισμα επιφανειών ελεύθερης μορφής με εργαλεία σφαιρικής απόληξης. Οι στρατηγικές φραιζαρίσματος που προτείνονται είναι συγκεκριμένες. Το μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί να επεξεργαστεί κάποιες βασικές στρατηγικές οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.14.



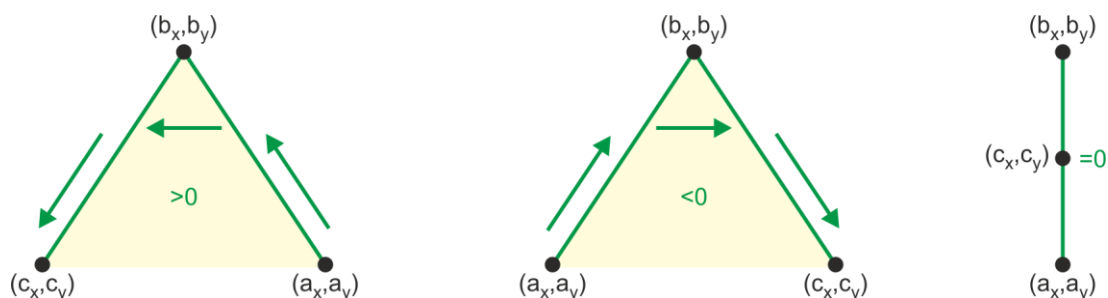
Σχήμα 4.14: Στρατηγικές φραιζαρίσματος του μοντέλου, (α) κίνηση περιφέρειας (follow periphery), (β) κίνηση μονής κατεύθυνσης (zig), (γ) παλινδρομική κίνηση (zig zag), (δ) κυκλική παλινδρομική κίνηση (concentric zig zag)

Όπως γίνεται φανερό η κατεύθυνση κοπής ανάλογα με το μονοπάτι είναι διαφορετική, αλλά και μέσα σε ένα μονοπάτι μπορεί να αλλάζει. Σε κάθε μια από τις τέσσερις στρατηγικές φραιζαρίσματος η εύρεση της κατεύθυνσης κοπής γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Για τις περιπτώσεις α-δ και β-γ η διαδικασία ταυτίζεται καθώς παρουσιάζονται ομοιότητες μεταξύ των μονοπατιών στα δύο ζευγάρια. Ο τρόπος με τον οποίο μια κίνηση είναι ομόρροπη ή αντίρροπη παρουσιάζεται παρακάτω.

Έστω 3 σημεία a,b και c στο XY επίπεδο. Υπολογίζεται το εξωτερικό γινόμενο των σημείων αυτών:

$$2 \times \text{Area}(a,b,c) = \begin{vmatrix} a_x & a_y & 1 \\ b_x & b_y & 1 \\ c_x & c_y & 1 \end{vmatrix} = (b_x - a_x)(c_y - a_y) - (b_y - a_y)(c_x - a_x) \quad (4.17)$$

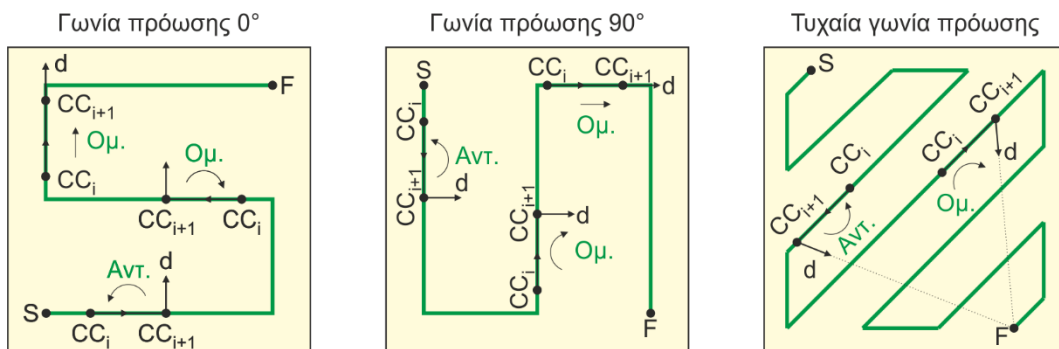
- Αν  $\text{Area} > 0$ , τότε  $a \rightarrow b \rightarrow c$  κινούνται αριστερόστροφα
- Αν  $\text{Area} < 0$ , τότε  $a \rightarrow b \rightarrow c$  κινούνται δεξιόστροφα
- Αν  $\text{Area} = 0$ , τότε  $a \rightarrow b \rightarrow c$  είναι στην ίδια ευθεία



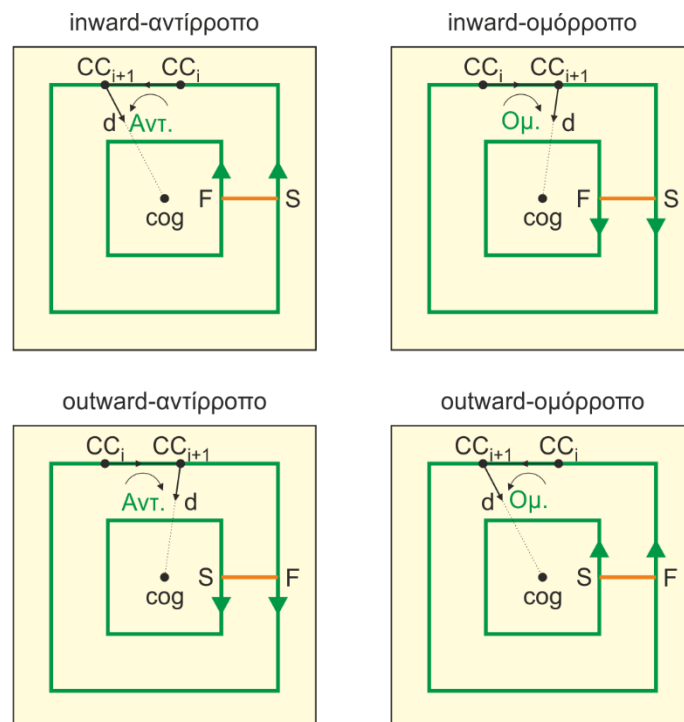
Σχήμα 4.15: Μεθοδολογία εύρεσης κατεύθυνσης κοπής με τον υπολογισμό εξωτερικού γινομένου τριών γειτονικών σημείων

Τα μονοπάτια zig και zig zag παρουσιάζουν ομοιότητες ως προς την κατεύθυνσή τους. Η κίνηση του εργαλείου μπορεί να είναι υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα X και είναι κοινή σε όλο το μονοπάτι. Έτσι διακρίνονται 2 περιπτώσεις:

Στην περίπτωση όπου η γωνία πρόωσης είναι  $0^\circ$  ή  $90^\circ$  τα σημεία  $a$  και  $b$  που παρουσιάστηκαν νωρίτερα αντιστοιχούν στα  $CC_i$  και  $CC_{i+1}$ . Το σημείο  $c$  αντιστοιχεί στο πέρας ενός διανύσματος μοναδιαίου  $d$  με αρχή το  $CC_{i+1}$ . Το διάνυσμα αυτό είναι υπό κλίση  $90^\circ$  ή  $0^\circ$  για τις αντίστοιχες περιπτώσεις γωνίας πρόωσης και με φορά προς το τελικό σημείο του μονοπατιού ( $F$ ) (σχήμα 4.16). Στη γενική περίπτωση όπου η γωνία πρόωσης είναι διαφορετική τα σημεία  $a$  και  $b$  αντιστοιχούν στα  $CC_i$  και  $CC_{i+1}$  ενώ το σημείο  $c$  αντιστοιχεί στο πέρας ενός μοναδιαίου διανύσματος  $d$  με αρχή το  $CC_{i+1}$  και με φορά προς το τελικό σημείο του μονοπατιού. Όταν το εξωτερικό γινόμενο είναι μικρότερο του μηδενός η φορά είναι προς τα δεξιά και το φραιζάρισμα ομόρροπο. Όταν το εξωτερικό γινόμενο είναι μεγαλύτερο του μηδενός η φορά είναι προς τα αριστερά και το φραιζάρισμα αντίρροπο. Στην περίπτωση όπου το εξωτερικό γινόμενο είναι 0 το ζευγάρι  $CC_i - CC_{i+1}$  έχει την ίδια φορά με το ζευγάρι  $CC_{i-1} - CC_i$ .



Σχήμα 4.16: Υπολογισμός φοράς φραιζαρίσματος σε στρατηγική παλινδρομικής κίνησης (zig zag)



Σχήμα 4.17: Υπολογισμός φοράς φραιζαρίσματος σε στρατηγική περιφερειακής κίνησης (follow periphery)

Τα μονοπάτια follow periphery και concentric zig zag παρουσιάζουν και αυτά ομοιότητες ως προς την κατεύθυνσή τους. Η μόνη διαφορά είναι πως στο πρώτο το εργαλείο κινείται σε



ορθογώνια ενώ στο δεύτερο σε ομόκεντρους κύκλους. Το θετικό των μονοπατιών αυτών είναι πώς σε όλες τις κινήσεις του εργαλείου διατηρείται συγκεκριμένη φορά. Διακρίνονται σε δύο περιπτώσεις: Τα μονοπάτια που ξεκινούν από μέσα προς τα έξω (outward) και τα μονοπάτια που ξεκινούν από έξω προς τα μέσα (inward). Στην περίπτωση του outward το πρώτο σημείο του μονοπατιού θα βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο του τεμαχίου σε σχέση με το τελευταίο σημείο του μονοπατιού. Στην περίπτωση του inward συμβαίνει το αντίθετο. Με όμοιο τρόπο όπως και πριν τα σημεία  $a$  και  $b$  αντιστοιχούν στα  $CC_i$  και  $CC_{i+1}$  ενώ το σημείο  $c$  αντιστοιχεί στο πέρας ενός μοναδιαίου διανύσματος  $d$  με αρχή το  $CC_{i+1}$  και με φορά προς το κέντρο του τεμαχίου.

#### 4.2.6 Διαδικασία βελτιστοποίησης

Μέχρι το σημείο αυτό ο κώδικας έχει υπολογίσει τις γωνίες  $\varphi$  και  $\omega$  αλλά και την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου για ένα σημείο CC (ή CL). Το μόνο που πρέπει να προσδιοριστεί για το σημείο αυτό είναι η πρόωσή του. Η πρόωση είναι το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης κατά την οποία ελαχιστοποιούνται, ταυτόχρονα η όχι, η τραχύτητα, οι δυνάμεις κοπής και ο χρόνος κατεργασίας. Δηλαδή για κάθε ζεύγος  $CC_i - CC_{i+1}$  λύνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και καθορίζεται η πρόωση για τη μετακίνηση του εργαλείου από το σημείο  $i$  στο  $i+1$ .

Όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης εκφράζονται από μια αντικειμενική συνάρτηση και από περιορισμούς. Για να υπολογιστεί η βέλτιστη πρόωση αρκεί να υπολογιστεί η βέλτιστη πρόωση ανά περιστροφή και δόντι  $f_z$ .

$$f = f_z \cdot z \cdot n \quad (4.18)$$

όπου  $z$  είναι οι κοπτικές ακμές του σφαιρικού εργαλείου και  $n$  η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου σε rpm. Στόχος είναι η δημιουργία μιας αντικειμενικής συνάρτησης με μία μεταβλητή, την  $f_z$ , η οποία θα πρέπει να εμπεριέχει τα κριτήρια βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η μέθοδος του σταθμισμένου μέσου (weighted sum method) χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό. Η χρήση της μεθόδου αυτής είναι η απλούστερη και συνηθέστερη σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective optimization).

$$U = \sum_{i=1}^k w_i f_i$$

Όπου  $w_i$  είναι το βάρος του κριτηρίου  $i$  που θέτει ο αποφασίζον και ισχύει ότι το άθροισμα των βαρών θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Αν οι επιμέρους αντικειμενικές συναρτήσεις που συνθέτουν την τελική δεν είναι κανονικοποιημένες, το άθροισμα των βαρών μπορεί να μην αθροίζει στη μονάδα. Η έννοια της κανονικοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων εξηγείται αργότερα. Όπως και στις περισσότερες μεθόδους βελτιστοποίησης με βάρη έτσι και σε αυτή, θέτοντας κάποιο βάρος ίσο με το 0 η μέθοδος οδηγείται σε λύση που βρίσκεται στο μέτωπο Pareto, χωρίς ωστόσο να είναι κυρίαρχη (weakly Pareto optimal point). Τα βάρη μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο ο αποφασίζον θέτει τις τιμές των βαρών με βάση το που θέλει ο ίδιος να κατευθύνει τη λύση η πιο απλά ποιο κριτήριο θέλει να βελτιστοποιήσει περισσότερο από κάποιο άλλο. Η απόφαση αυτή γίνεται πριν την επίλυση του προβλήματος. Ένας δεύτερος τρόπος χρήσης των βαρών είναι με τη συστηματική αλλαγή τους και τη δημιουργία ενός νέφους λύσεων στον χώρο, το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση μετωπών Pareto [3]. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, τα βάρη τα ορίζει ο αποφασίζον πριν την επίλυση του προβλήματος.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η ενιαία αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και μαζί με αυτή και οι συναρτήσεις που τη συνθέτουν. Σκοπός του μοντέλου είναι η δημιουργία μονοπατιών με τη μικρότερη τραχύτητα, τις μικρότερες δυνάμεις στο εργαλείο και τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας. Το πρόβλημα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & U(f_z) = w_{R_z} R_z^{\text{norm}}(f_z) + w_{F_z} F_z^{\text{norm}}(f_z) + w_t t^{\text{norm}}(f_z) \\ \text{s.t} \quad & 0.1 \leq f_z \leq 0.5 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Το πρόβλημα γίνεται αρκετά απλό καθώς απαιτείται η ελαχιστοποίηση μιας μη γραμμικής συνάρτησης που αποτελείται μόνο από μια μεταβλητή. Ο περιορισμός φράζει τη συνάρτηση σε ένα συγκεκριμένο εύρος στο οποίο υπάρχουν μόνο ολικά βέλτιστα και όχι τοπικά καθιστώντας την αναζήτηση λύσης αρκετά απλή.

Πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων περιλαμβάνουν τη σύγκριση και τη λήψη αποφάσεων για διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Ωστόσο, οι τιμές των συναρτήσεων αυτών μπορεί να έχουν διαφορετικές μονάδες και σημαντικές διαφορές στη τάξη μεγέθους, καθιστώντας τις συγκρίσεις δύσκολες. Έτσι, είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των αντικειμενικών συναρτήσεων σε ένα αδιάστατο μέγεθος. Αν και υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις, ο καλύτερος τρόπος κανονικοποίησης είναι ο ακόλουθος:

$$f_i^{\text{norm}} = \frac{f_i(x) - f_i^0}{f_i^{\text{max}} - f_i^0} \quad (4.20)$$

Όπου το  $f_i^0$  είναι το βέλτιστο σημείο (utopia point). Η κανονικοποιημένη συνάρτηση κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 και εξαρτάται από τον ορισμό των  $f_i^0$  και  $f_i^{\text{max}}$ . Το  $f_i^{\text{max}}$  αναφέρεται στη χειρότερη τιμή μπορεί να πάρει η συνάρτηση  $f_i(x)$ . Στο συγκεκριμένο πρόβλημα τα βέλτιστα σημεία είναι η μικρότερη τιμή της τραχύτητας, των δυνάμεων και του χρόνου και τα χειρότερα σημεία βρίσκονται στις μέγιστες τιμές. Οι κανονικοποιημένες συναρτήσεις προκύπτουν ως εξής:

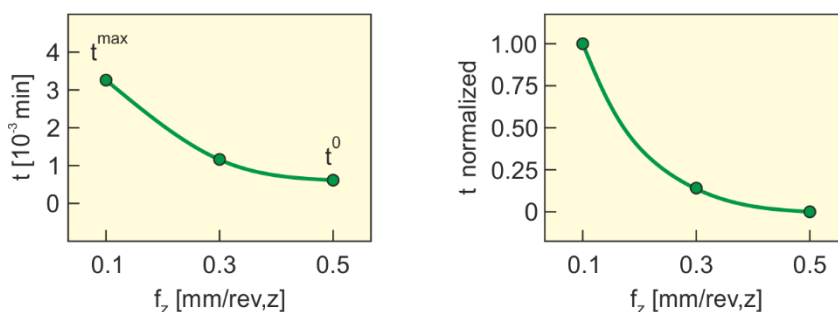
$$R_z^{\text{norm}} = \frac{R_z(f_z) - R_z^0}{R_z^{\text{max}} - R_z^0} \quad F_z^{\text{norm}} = \frac{F_z(f_z) - F_z^0}{F_z^{\text{max}} - F_z^0} \quad t^{\text{norm}} = \frac{t(f_z) - t^0}{t^{\text{max}} - t^0} \quad (4.21)$$

Το μόνο που μένει να οριστεί είναι οι συναρτήσεις  $R_z$ ,  $F_z$  και  $t$ . Η ποσότητα  $t$  εκφράζει τον χρόνο για τη μετακίνηση του εργαλείου από το  $CC_i$  στο  $CC_{i+1}$  σημείο και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$t(f_z) = \frac{1}{f_z} \frac{d}{z n} \quad [\text{min}] \quad (4.22)$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση από το  $CC_i$  στο  $CC_{i+1}$  ή αλλιώς το βήμα κοπής σε mm,  $z$  οι κοπτικές ακμές του εργαλείου και  $n$  η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου για τη συγκεκριμένη κίνηση. Είναι μια εκθετική συνάρτηση όπως φαίνεται και στο τύπο. Ο χρόνος  $t$  είναι αναγκαίος μόνο για 3 τιμές του  $f_z$ , για 0.1, 0.3 και 0.5 καθώς για αυτές τις τιμές είναι γνωστές οι ποσότητες  $R_z$  και  $F_z$ .

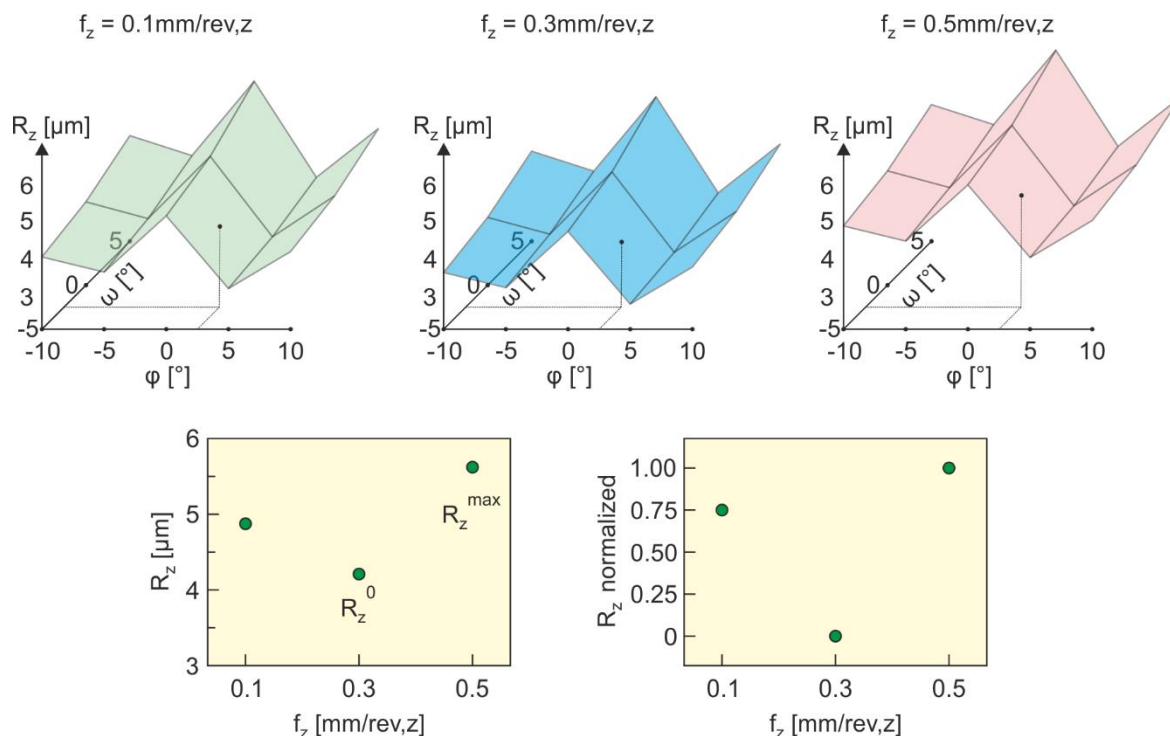
Η διαδικασία για τη δημιουργία δύο συναρτήσεων που να εκφράζουν την τραχύτητα και τις δυνάμεις αντίστοιχα είναι ίδια και για τον λόγο αυτό αναλύεται στη συνέχεια μόνο η τραχύτητα.



Σχήμα 4.18: Δημιουργία διαγράμματος  $t$ - $f_z$  και κανονικοποίηση

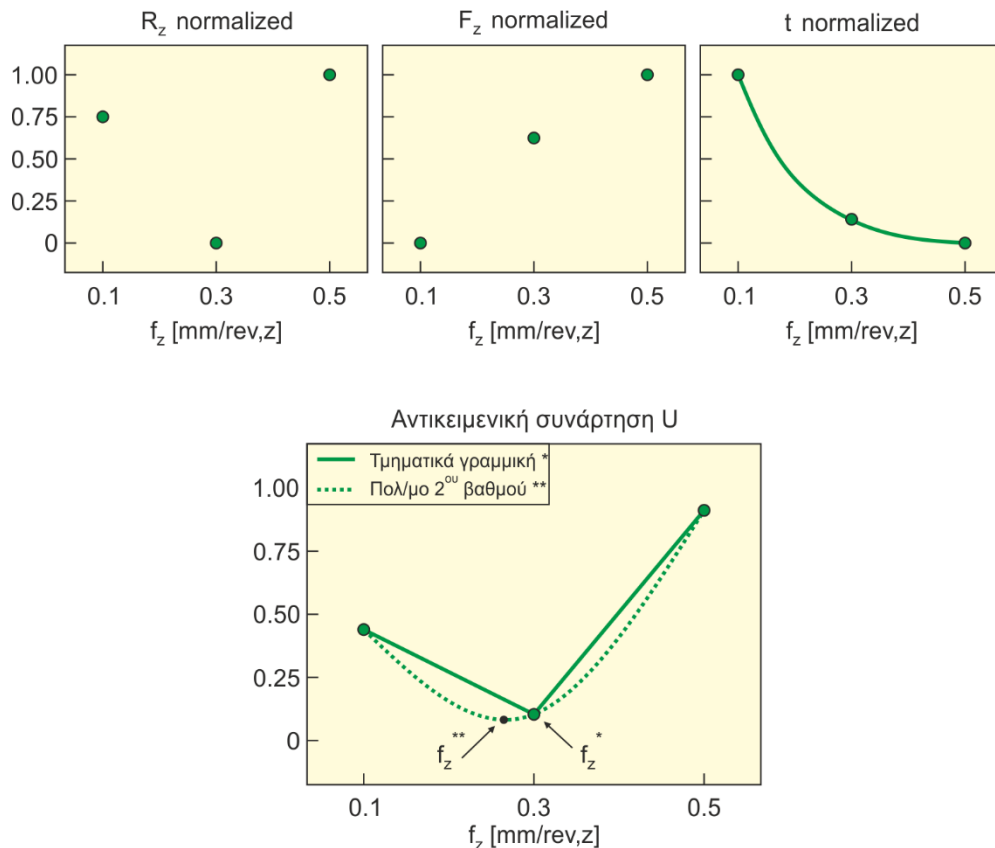
Ένα μονοπάτι χαρακτηρίζεται αρχικά από συγκεκριμένο αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής ( $t_z$  και  $t_{xy}$ ). Η μετακίνηση από ένα σημείο  $CC_i$  σε ένα  $CC_{i+1}$  εμπεριέχει τη γωνία  $\varphi$ , τη γωνία  $\omega$  και την ομόρροπη ή αντίρροπη κατεύθυνση. Η γνώση αυτών των πέντε πληροφοριών οδηγεί στην εύρεση τριών τιμών τραχύτητας (και δύναμης) για τρία συγκεκριμένα  $f_z$  μέσα από τη βάση δεδομένων με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Τα μονοπάτια που μπορεί να επεξεργαστεί ο κώδικας σχετίζονται με τις παραμέτρους των πειραμάτων. Δηλαδή το αξονικό και το ακτινικό βάθος κοπής θα πρέπει να είναι 0.3 ή 0.6mm αντίστοιχα και η ταχύτητα κοπής 60m/min. Με το ακόλουθο παράδειγμα εξηγείται ο τρόπος εύρεσης.

Έστω ένα μονοπάτι με αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής στα 0.6mm και ταχύτητα κοπής 60m/min. Έστω μία κίνηση  $CC_i - CC_{i+1}$  για την οποία το  $\varphi=2.5^\circ$ , το  $\omega=-2.5^\circ$  και η κατεύθυνση είναι ομόρροπη. Αρχικά δημιουργούνται 3 γραφήματα  $\varphi$ - $\omega$ - $R_z$  για  $t_z$ ,  $t_{xy}$ ,  $v_c$  και κατεύθυνση συγκεκριμένα και για  $f_z$  0.1, 0.3 και 0.5. Στη συνέχεια γίνεται γραμμική παρεμβολή στις 3 γραφικές παραστάσεις και βρίσκονται οι τιμές  $R_z$ . Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η διαδικασία.



Σχήμα 4.19: Δημιουργία διαγράμματος  $R_z$ - $f_z$  και κανονικοποίηση ( $\varphi=2.5^\circ$ ,  $\omega=-2.5^\circ$ ,  $t_z=0.6$ mm,  $t_{xy}=0.6$ mm,  $v_c=60$ m/min, ομόρροπο φραιζάρισμα)

Αφού οι συναρτήσεις κανονικοποιηθούν γίνεται η σύνθεσή τους σε μια ενιαία αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί σύμφωνα με την εξίσωση 4.19. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι τμηματικά γραμμική ή πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Την επιλογή την κάνει ο χρήστης. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας.



Σχήμα 4.20: Δημιουργία αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση ( $w_{R_z}=0.7$ ,  $w_{F_z}=0.1$ ,  $w_t=0.2$ )

### 4.3 Αποτελέσματα μοντέλου

Μετά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ο αλγόριθμος πραγματοποιεί τη μετεπεξεργασία (post-processing) των κινήσεων του εργαλείου και εξάγει ένα νέο NC αρχείο. Τα CL σημεία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ίδια και στα δύο μονοπάτια με τη διαφορά ότι στο δεύτερο κάθε CL σημείο συνοδεύεται από ένα ζευγάρι F και S.

```
%
G40 G17 G90 G71
G91 G28 Z0.0
T00 M06
G00 G90 X-1.7364 Y32.5002 S1500 M03
G43 Z7.3744 H00
Z-.6256
G01 Z-7.1519 F250. M08
X-.7365 Z-6.9809
X.2635 Z-6.81
X1.2635 Z-6.6392
X2.2635 Z-6.4778
X3.2635 Z-6.3178
X4.2635 Z-6.1578
```

```
G90 G54 G71 G17
T= "BALL20" M06
S3000 M03
M08
G01
X-1,736 Y32,5 Z7,374 F859 S2864
X-1,736 Y32,5 Z-0,625 F850 S2836
X-1,736 Y32,5 Z-7,151 F842 S2809
X-0,736 Y32,5 Z-6,98 F842 S2809
X0,263 Y32,5 Z-6,81 F850 S2836
X1,263 Y32,5 Z-6,639 F859 S2864
X2,263 Y32,5 Z-6,477 F867 S2893
X3,263 Y32,5 Z-6,317 F876 S2922
X4,263 Y32,5 Z-6,157 F885 S2952
```

Σχήμα 4.21: Τμήματα NC αρχείων, μετεπεξεργασία από Siemens NX 11.0 (αριστερά), μετεπεξεργασία μετά από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης (δεξιά)

Επίσης το δεύτερο NC αρχείο περιέχει κάποιες επιπλέον εντολές G και M απαραίτητες για την εκτέλεση του από τη φραιζα DMU 50 eco του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Μοντελοποίησης η οποία έχει ψηφιακή καθοδήγηση Siemens Sinumerik 810 D. Στο σχήμα 4.21 φαίνονται τα δύο NC αρχεία.

Ο χρόνος εκτέλεση του αλγορίθμου εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των στοιχείων της διακριτοποιημένης επιφάνειας και από το μέγεθος του NC αρχείου. Παρατηρώντας το νέο NC αρχείο γίνεται αντιληπτό πως οι μεταβολές της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου σε κάθε κίνηση είναι μικρές. Αυτό συμβαίνει γιατί η κλίση της επιφάνειας και στις δύο κατευθύνσεις είναι μικρή. Το στοιχείο αυτό επίσης είναι θετικό καθώς οι κινητήρες της μηχανής ανταποκρίνονται εγκαίρως στις αλλαγές αυτές.

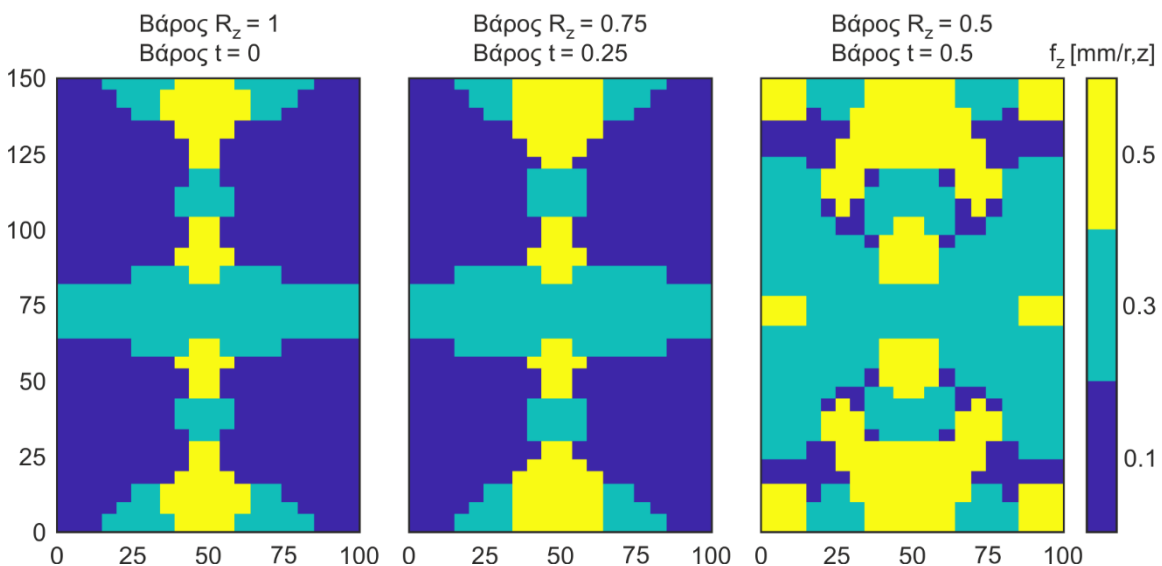
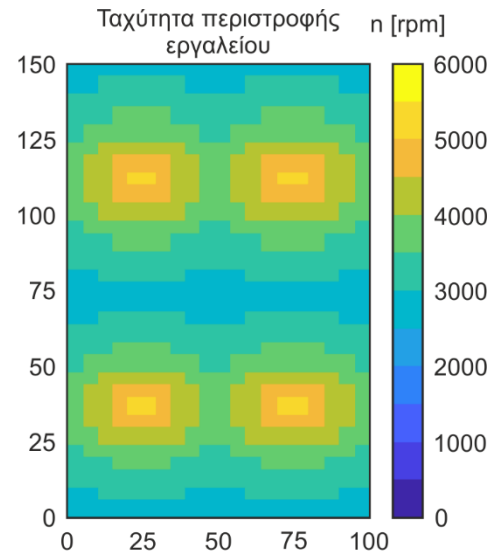
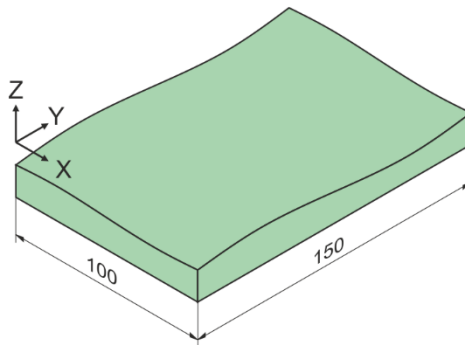
#### Δεδομένα:

Τεμάχιο: AL Al5083 'Ο' H111

Εργαλείο: Σκληρομέταλλο,  $\Phi 20$ ,  $z=1$

Στρατηγική: Zig (αντίρροπη κατεύθυνση στο Y)  
βήμα κοπής=2mm,  $tol=0.03mm$

Συνθήκες:  $t_z=0.6mm$ ,  $t_{xy}=0.6mm$ ,  $v_c=60m/min$



Σχήμα 4.22: Μεταβολή του  $f_z$  πάνω σε διακριτοποιημένη επιφάνεια 600 στοιχείων για τρεις περιπτώσεις βαρών.

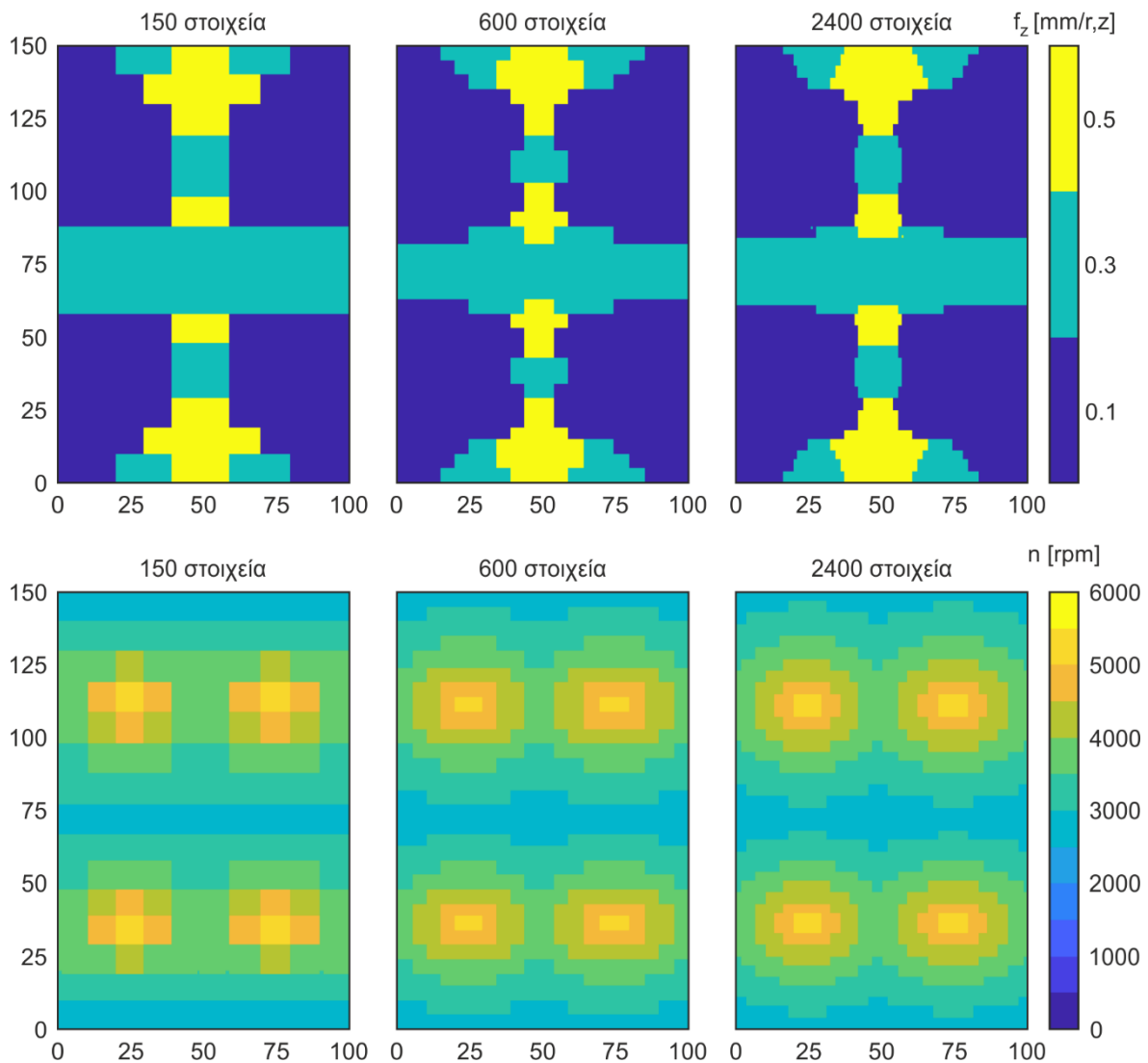
Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για μια επιφάνεια καθορισμένης γεωμετρίας και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βαρών. Και στις τρεις περιπτώσεις η ταχύτητα κοπής παραμένει ίδια όπως φαίνεται και στο σχήμα καθώς εξαρτάται μόνο από την κλίση της επιφάνειας.



Στην περίπτωση ελαχιστοποίησης της τραχύτητας και του χρόνου ισομερώς φαίνεται η διαφοροποίηση του  $f_z$  στην επιφάνεια με την τιμή 0.3 να είναι κυρίαρχη. Ίδια εικόνα παρουσιάζεται και στην περίπτωση όπου το βάρος της τραχύτητας είναι 0.75 και του χρόνου 0.25. Οι περισσότερες τιμές της πρόωσης τώρα είναι 0.1.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον φανερώνει η ελαχιστοποίηση μόνο της τραχύτητας. Γενικότερα τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 έδειξαν πως στις περισσότερες περιπτώσεις μικρή τιμή της πρόωσης επιφέρει μικρότερη τραχύτητα. Έτσι γίνεται εύκολα αντιληπτό πως ο χρόνος με την τραχύτητα είναι ανταγωνιστικά κριτήρια. Στο σχήμα φαίνεται πως ένα μεγάλο μέρος του μονοπατιού έχει πάρει τιμές 0.3 και 0.5 πράγμα που σημαίνει ότι για την ολική βελτιστοποίηση της τραχύτητας παρατηρείται βελτίωση και στον χρόνο κατεργασίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλονται άμεσα από τη διακριτοποίηση της επιφάνειας. Στο [σχήμα 4.23](#) παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις διακριτοποίησης για την ίδια επιφάνεια, συνθήκες, υλικό και εργαλείο με το σχήμα 4.22. Και στις τρεις περιπτώσεις ελαχιστοποιείται μόνο η τραχύτητα ενώ το βήμα κοπής είναι 1mm.



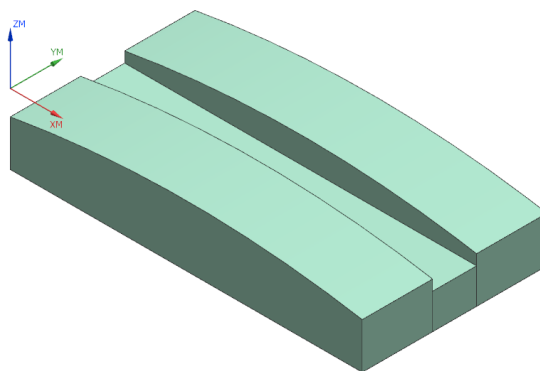
Σχήμα 4.23: Μεταβολή της πρόωσης ανά περιστροφή και δόντι και της ταχύτητας περιστροφής για διάφορες περιπτώσεις διακριτοποίησης επιφάνειας

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

Στόχος του μοντέλου βελτιστοποίησης είναι δημιουργία μονοπατιών διαφορετικών συνθηκών. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η περίπτωση ολικής βελτιστοποίησης της τραχύτητας δημιουργεί περιοχές υψηλής πρόωσης με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου κατεργασίας. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα σε ίδια μορφή επιφάνειας, μονοπάτι, εργαλείο και υλικό κατεργασίας. Στο πρώτο πείραμα επιλέχθηκαν συγκεκριμένες συνθήκες κοπής, ενώ στο δεύτερο οι συνθήκες προέκυψαν από το μοντέλο βελτιστοποίησης. Μετά το πέρας της κατεργασίας και στα δύο δοκίμια έγιναν μετρήσεις τραχύτητας κάθετα στην κατεύθυνση της πρόωσης με βήμα 2mm.

### 5.1 Δημιουργία γεωμετρίας και NC αρχείων από το Siemens NX 11.0

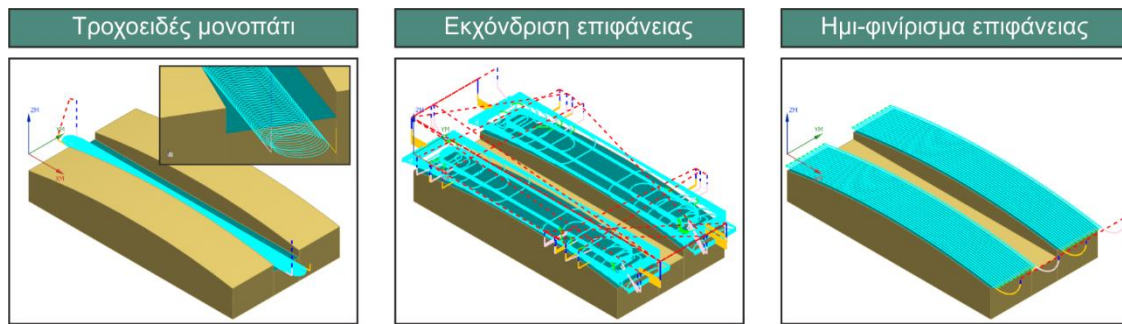
Η γεωμετρία που επιλέχθηκε για την πειραματική διαδικασία είχε κλίση μόνο στην κατεύθυνση της πρόωσης, για να είναι εφικτή η μέτρηση της τραχύτητας κάθετα αυτής. Ο σχεδιασμός της επιφάνειας κοπής ήταν ιδιαίτερα απλός καθώς αποτελείται από ένα τόξο κλήσης  $10^\circ$  και μήκους 100mm στο επίπεδο XZ και από ένα ευθύγραμμο τμήμα μήκους 20mm στο επίπεδο YZ (σχήμα 5.1). Στη συνέχεια μέσω της εντολής Sweep επιλέγονται οι δύο καμπύλες που σχεδιάστηκαν και δημιουργείται η επιφάνεια. Μέσο της εντολής Extrude επιλέγεται η επιφάνεια και δημιουργείται ένας στερεός όγκος ύψους 20mm. Τέλος δημιουργείται μια πανομοιότυπη γεωμετρία μετατοπισμένη κατά 12.5mm στον άξονα Y. Όλο το στερεό μετατοπίστηκε άξονα -Z κατά 7mm για την ευκολότερη δημιουργία αρχικού τεμαχίου στο CAM.



Σχήμα 5.1: Τεμάχιο κατεργασίας για την επαλήθευση του μοντέλου βελτιστοποίησης

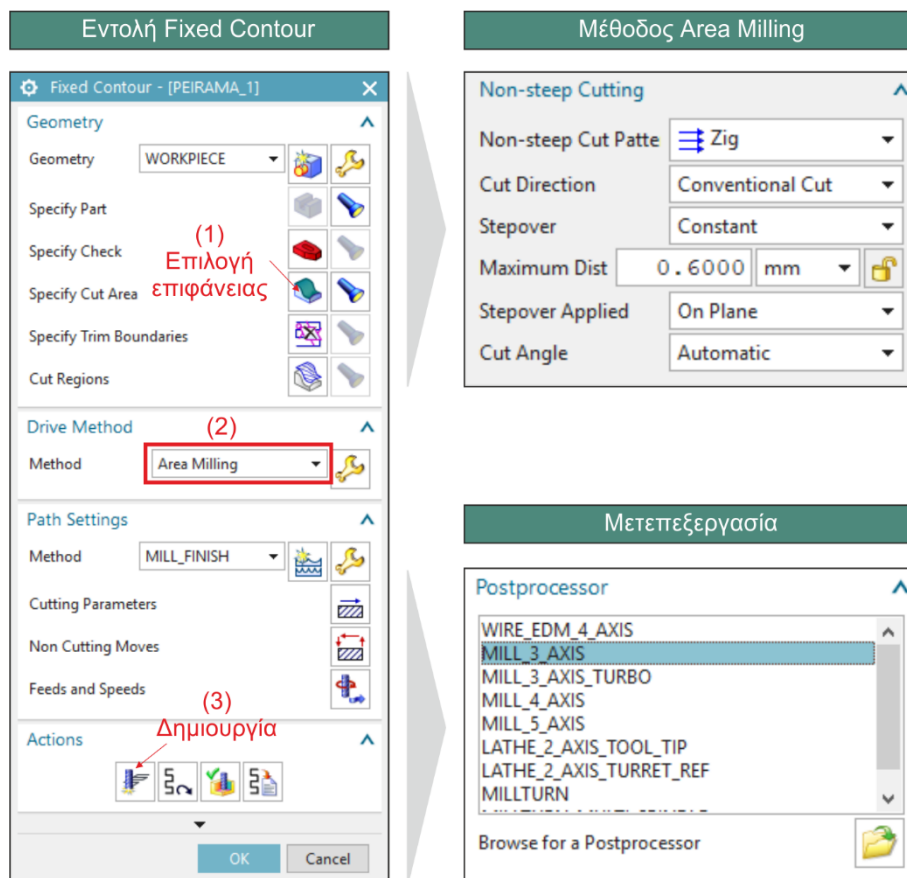
Μετά τη δημιουργία του τεμαχίου από την καρτέλα Application επιλέγεται η εντολή Manufacturing και για την κατεργασία του τεμαχίου. Η πρώτη κατεργασία αφορά την εκχόνδριση του τεμαχίου. Αρχικά δημιουργείται η αυλάκωση που χωρίζει τις δύο πειραματικές περιοχές με ένα κονδύλι από καρβίδιο, διαμέτρου 6mm με 3 δόντια. Επιλέχθηκε ένα τροχοειδές μονοπάτι μέσα από την εντολή Cavity Mill. Η εκχόνδριση συνεχίστηκε με ένα κονδύλι από ταχυχάλυβα, διαμέτρου 11mm με 4 δόντια. Πάλι μέσα από την εντολή Cavity Mill επιλέχθηκε ένα μονοπάτι περιφέρειας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ημι-φινιρίσμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης με ένθετα πλακίδια από σκληρομέταλλο, διαμέτρου 20mm και 1 ενεργό δόντι. Μέσο της εντολής Fixed Contour δημιουργήθηκε ένα παλινδρομικό μονοπάτι με ακτινικό βάθος κοπής 1mm. Η κατεργασία δεν έφτασε μέχρι την τελική επιφάνεια αλλά 0.6mm πάνω από αυτή. Τα βήματα της κατεργασίας φαίνονται στο [σχήμα 5.2](#).

Σε αυτό το σημείο τα τεμάχια ήταν έτοιμα για την πειραματική κατεργασία. Το πρώτο πείραμα, όπως και το δεύτερο, αποτελεί μια κατεργασία φινιρίσματος. Η στρατηγική φραιζαρίσματος είναι αντίρροπη μονής κατεύθυνσης (Zig) με φορά στον άξονα X. Το ακτινικό και το αξονικό βάθος κοπής ήταν 0.6mm. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου βρέθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχήμα 5.2: Διαδικασία εκχόνδρισης του τεμαχίου

Στις κατεργασίες πολυαξονικών επιφανειών με εργαλεία σφαιρικής απόληξης η ταχύτητα κοπής μεταβάλλεται συνεχώς καθώς η ενεργή διάμετρος δεν είναι πάντα σταθερή λόγω της διαφοράς της κλίσης της επιφάνειας από σημείο σε σημείο. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί σύγχυση ως προς την κατάλληλη εκλογή της ταχύτητας περιστροφής. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε ο μέσος όρος της ταχύτητας όταν το εργαλείο έχει μηδενική κλίση με το τεμάχιο και της ταχύτητας που έχει το εργαλείο όταν βρίσκεται στη μέγιστη κλίση της επιφάνειας. Σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.15 και 4.16 για ταχύτητα κοπής 60m/min, διάμετρο εργαλείου 20mm και αξονικό βάθος κοπής 0.6mm, στην περίπτωση όπου η κλίση είναι 0° η ταχύτητα περιστροφής που προκύπτει είναι 5513rpm και για κλίση 10° ή -10° 2795rpm. Τελικά η ταχύτητα που προκύπτει είναι 4154rpm. Η πρόωση ανά περιστροφή και δόντι που επιλέχθηκε ήταν 0.1mm/t,z και η συνολική πρόωση ήταν 415.4mm/min. Η ταχύτητα περιστροφής και η πρόωση ήταν ίδια σε όλο το μονοπάτι.

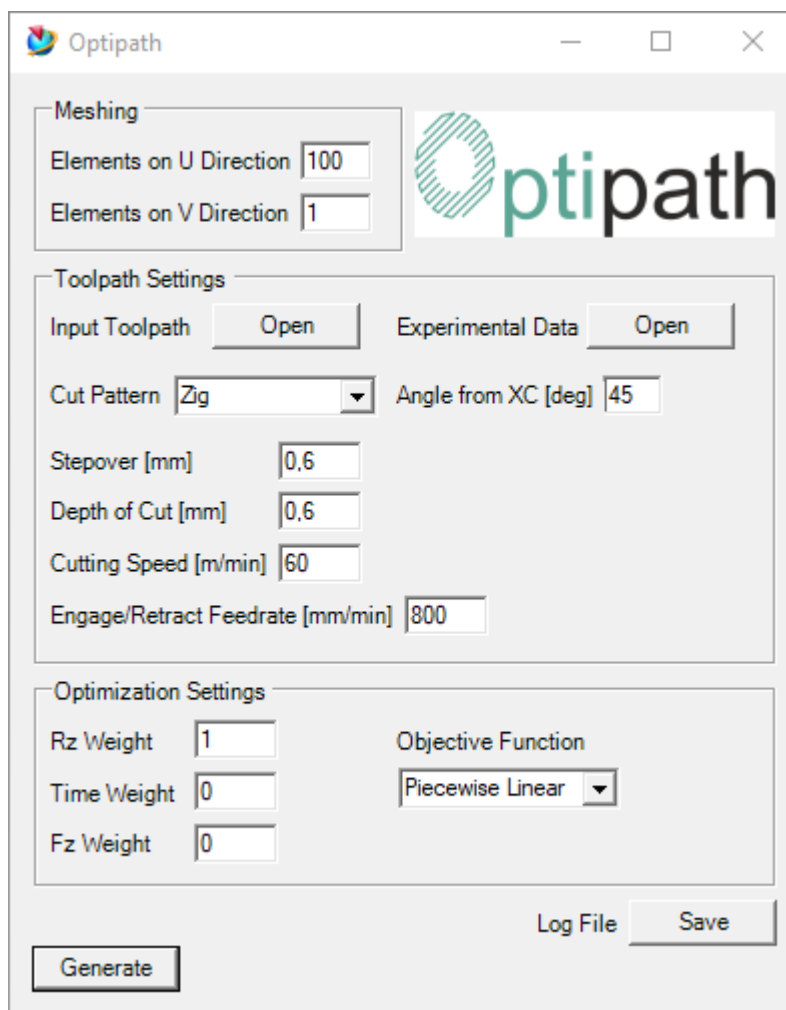


Σχήμα 5.3: Δημιουργία NC αρχείου για το πρώτο πείραμα

Μέσα από την εντολή Fixed Contour γίνεται η επιλογή του Specify Cut Area. Από το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγεται η επιφάνεια κοπής. Στη συνέχεια επιλέγεται η μέθοδος Area Milling από την ενότητα Drive method και ορίζονται η στρατηγική φραιζαρίσματος, η φορά κοπής και το ακτινικό βάθος κοπής. Το αξονικό βάθος κοπής είναι 0.6mm λόγω του υλικού που είχε μείνει από την προηγούμενη κατεργασία. Από την καρτέλα Feeds and Speeds ορίζονται η ταχύτητα περιστροφής και η πρόωση του εργαλείου. Αφού οριστούν όλες οι παράμετροι επιλέγεται το Generate για τη δημιουργία του μονοπατιού. Για την εξαγωγή του μονοπατιού σε NC αρχείο, κοινός G-κώδικα, γίνεται η μετεπεξεργασία του με τον μετεπεξεργαστή MILL\_3\_AXIS που εξάγει έναν απλό G-κώδικα για κατεργασίες τριών αξόνων. Όλη η διαδικασία φαίνεται στο [σχήμα 5.3](#).

## 5.2 Πρόγραμμα βελτιστοποίησης τροχιάς εργαλείου Optipath

Η δημιουργία του NC αρχείου για το δεύτερο πείραμα γίνεται μέσα από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης Optipath που αναπτύχθηκε. Το πρόγραμμα καλείται μέσα από το NX από το Menu → File → Execute → NX Open. Από το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγεται το .dll αρχείο που αναπτύχθηκε με τη γλώσσα Visual Basic και πρόκειται ουσιαστικά για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Στο [σχήμα 5.4](#) παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος. Ο χρήστης αρχικά ορίζει τα στοιχεία για τη διακριτοποίηση της επιφάνειας. Στη συνέχεια εισάγεται το μονοπάτι που του πρώτου πειράματος αλλά και η βάση δεδομένων με τα πειράματα η οποία είναι ένα αρχείο .txt. Αργότερα από αυτό, ορίζονται οι συνθήκες κοπής και τέλος ο χρήστης δίνει τα βάρη στα κριτήρια και εκτελείται ο κώδικας.



Σχήμα 5.4: Το περιβάλλον του Optipath

Ο κώδικας περατώνεται με την εμφάνιση ενός παραθύρου που ενημερώνει τον χρήστη για τις ενέργειες που έγιναν κατά την διακριτοποίηση αλλά και σε όλα τα CC σημεία του μονοπατιού. Το αποτέλεσμα είναι ένα NC αρχείο που έχει τη μορφή του σχήματος 4.21(β). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία που αποτελούν το Optipath.

Στην περιοχή Meshing ορίζονται τα ακόλουθα:

- Elements on U Direction: Αριθμός στοιχείων επιφάνειας στην κατεύθυνση U
- Elements on V Direction: Αριθμός στοιχείων επιφάνειας στην κατεύθυνση V

Στην περιοχή Toolpath Settings ορίζονται τα ακόλουθα:

- Input Toolpath: Εισαγωγή NC αρχείου που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή Manufacturing του Siemens NX 11.0 και έχει υποστεί μετεπεξεργασία από τον μεταφραστή MILL\_3\_AXIS και MILL\_3\_AXIS\_TURBO
- Experimental Data: Εισαγωγή βάσης δεδομένων με πειράματα τραχύτητας και δυνάμεων κοπής
- Cut Pattern: Επιλογή στρατηγικής φραιζαρίσματος
- Angle from XC: Γωνία πρόωσης για τη στρατηγική φραιζαρίσματος Zig Zag
- Steperover: Ακτινικό βάθος κοπής ( $t_{xy}$ ) σε mm
- Depth of Cut: Αξονικό βάθος κοπής ( $t_z$ ) σε mm
- Cutting Speed: Ταχύτητα κοπής ( $v_c$ ) σε m/min
- Engage/Retract Feedrate: Πρόωση για κινήσεις τοποθέτησης και απομάκρυνσης εργαλείου από το τεμάχιο σε mm/min

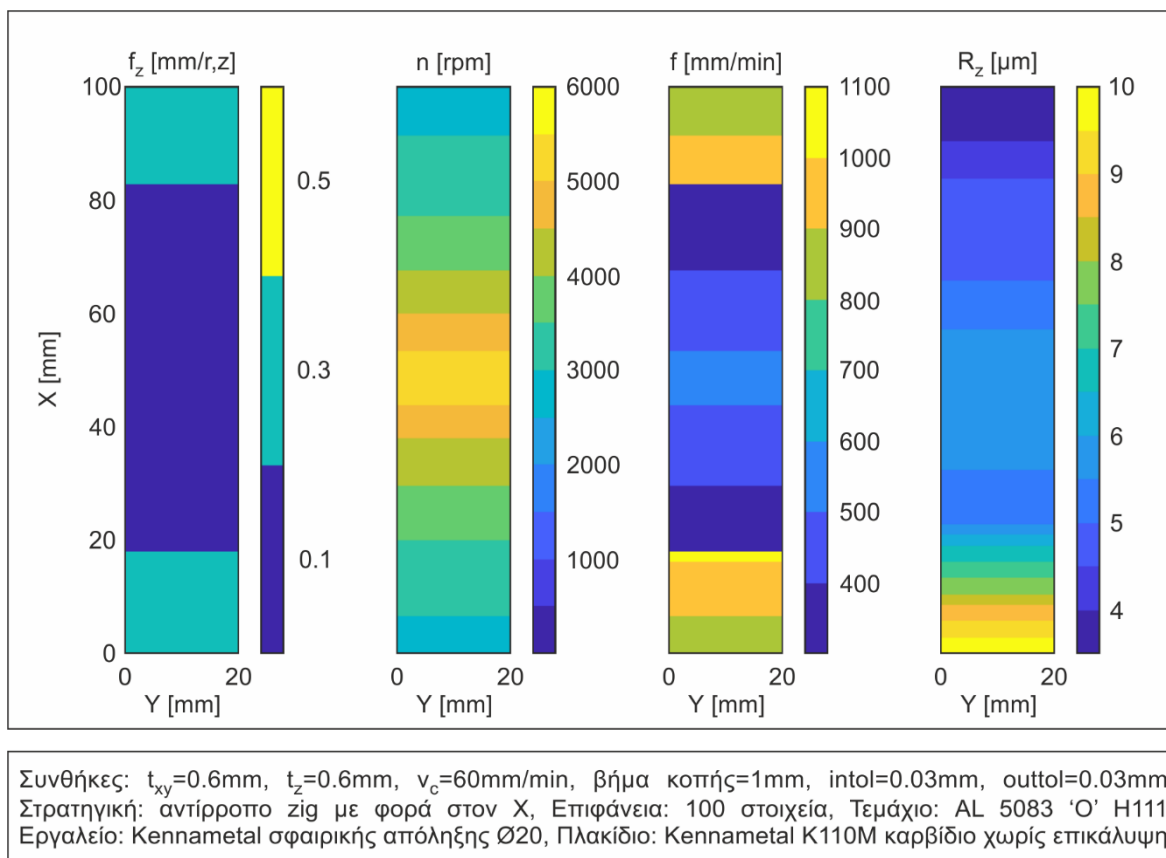
Στην περιοχή Optimization Settings ορίζονται τα ακόλουθα:

- Rz Weight: Βάρος στο κριτήριο της τραχύτητας
- t Weight: Βάρος στο κριτήριο του χρόνου
- Rz Weight: Βάρος στο κριτήριο της δύναμης
- Objective Function: Επιλογή παρεμβολής αντικειμενικής συνάρτησης είτε με τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις ή με ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού.

Τέλος μέσα από το Log File ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει κάποια στοιχεία της προσομοίωσης που προκύπτουν και να τα αξιοποιήσει για περεταίρω μετεπεξεργασία.

Για το δεύτερο πείραμα η επιφάνεια χωρίστηκε σε 100 στοιχεία. 100 στην κατεύθυνση της πρόωσης U και ένα στην V. Στην κατεύθυνση V δε μεταβάλλεται η κλίση της επιφάνειας και για τον λόγο αυτό δεν απαιτείται η διακριτοποίηση της. Η στρατηγική που επιλέχθηκε ήταν Zig με κατεύθυνση αντίρροπη και φορά στον X άξονα, το ακτινικό και αξονικό βάθος κοπής ήταν 0.6mm ενώ η ταχύτητα κοπής 60m/min. Στη βελτιστοποίηση όλο το βάρος δόθηκε στην ελαχιστοποίηση της τραχύτητας και η παρεμβολή της αντικειμενικής συνάρτησης ήταν τμηματικά γραμμική. Τα αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5. Η πρόωση ανά περιστροφή και δόντι μεταβάλλεται μόνο στα άκρα παίρνοντας τιμή 0.3 ενώ στην υπόλοιπη επιφάνεια η τιμή της είναι 0.1. Η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται καθώς το εργαλείο κινείται σε περιοχές με μηδενική κλίση όπου είναι η ενεργή διάμετρος του εργαλείου είναι η μικρότερη.



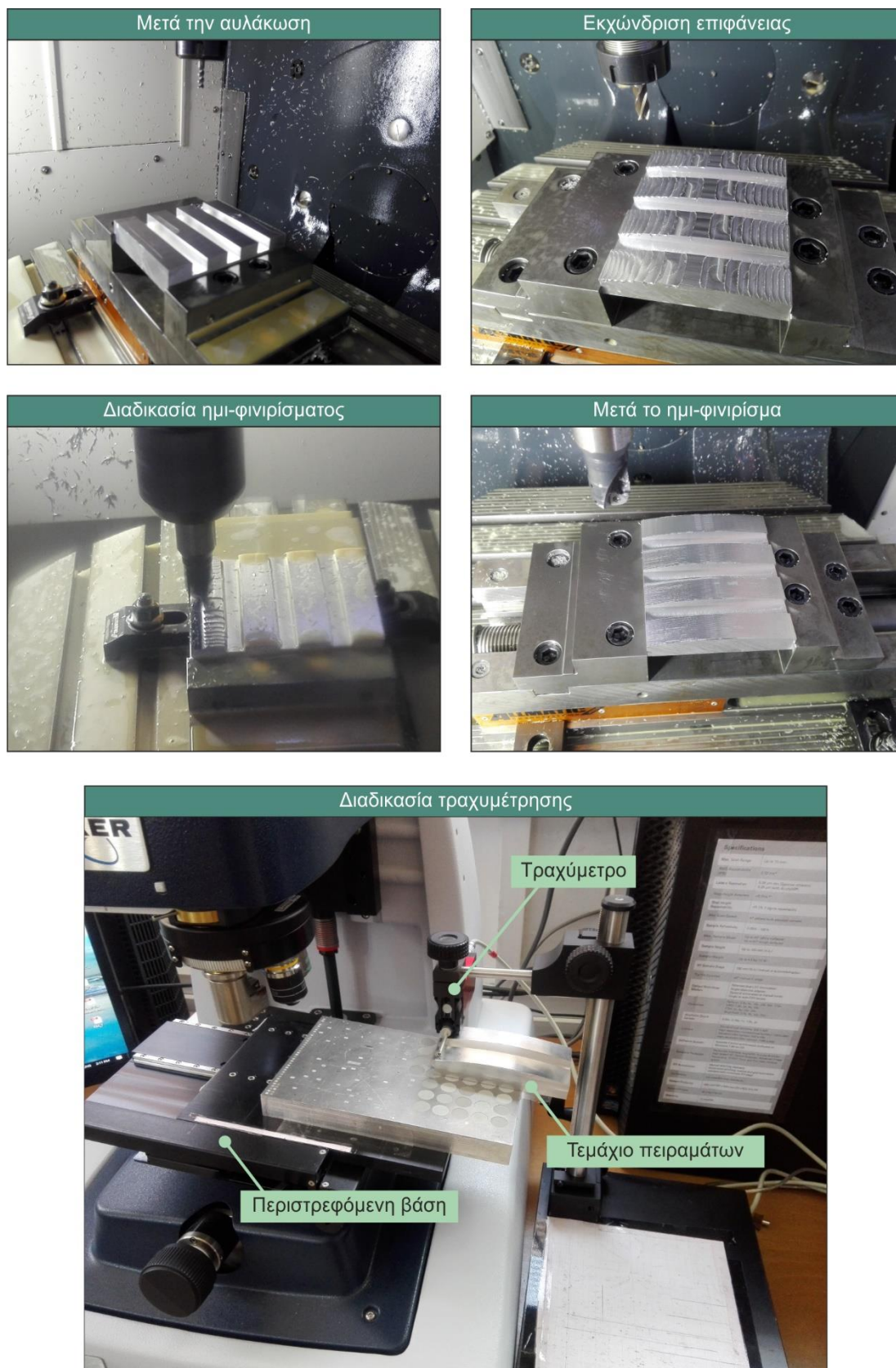


Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για την περίπτωση εύρεσης τροχιών ελάχιστης τραχύτητας (πείραμα 2)

### 5.3 Πειραματική διαδικασία και εξοπλισμός

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και για τον λόγο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας.

Αρχικά έγινε η αποκοπή ενός κομματιού αλουμινίου από μια πλάκα διαστάσεων 150x100x20. Το νέο κομμάτι τοποθετήθηκε στο κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco για την εκχόνδριση των πλευρών του, μέχρι το τεμάχιο να έχει τελικές διαστάσεις 52.5x100x20. Αφού έγινε ο μηδενισμός του τεμαχίου και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, ακολούθησε η διαδικασία εκχόνδρισης του τεμαχίου σύμφωνα με τα σχήμα 5.2. Ακολούθησε η κατεργασία του πρώτου πειράματος στη συνέχεια με το εργαλείο σφαιρικής απόληξης της Kennametal διαμέτρου Ø20 με ένα ενεργό δόντι. Αξίζει να σημειωθεί πως και στα δύο πειράματα χρησιμοποιήθηκαν καινούρια πλακίδια. Τέλος πραγματοποιήθηκε το δεύτερο πείραμα, ενώ καμία διαταραχή δεν παρουσιάστηκε στη μηχανή λόγω της ιδιαιτερότητας του βελτιστοποιημένου NC αρχείου. Η αντίδραση των κινητήρων της εργαλειομηχανής στις στιγμιαίες μεταβολές της ταχύτητας του εργαλείου ήταν ακριβής χωρίς να παρουσιάζονται μεγάλες δυνάμεις στην άτρακτο. Η ισχύς που χρησιμοποιούσε η άτρακτος για την περιστροφή του εργαλείου ήταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, σύμφωνα με τις πληροφορίες που δίνονταν από το χειριστήριο της μηχανής.



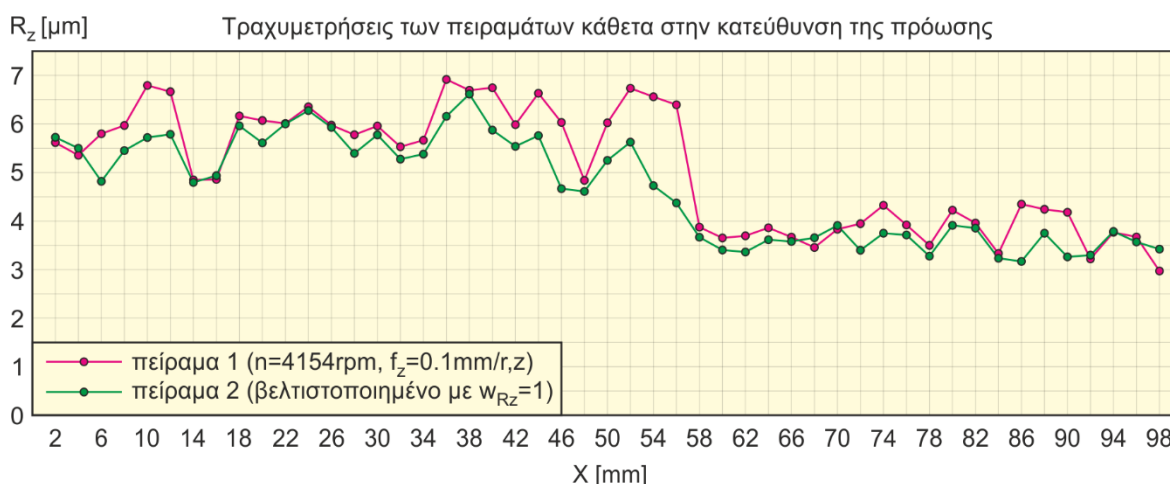
Σχήμα 5.6: Στάδια κατεργασίας δοκιμίων και διαδικασία τραχυμέτρησης

Μετά την κατεργασία των πειραμάτων έγιναν οι τραχυμετρήσεις των πειραμάτων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο Diavite Compact. Λόγο της κλίσης του τεμαχίου δεν ήταν δυνατή η τραχυμέτρηση του τεμαχίου. Έτσι έπρεπε με κάποιο τρόπο η επιφάνεια

να βρίσκεται κάθετα σε σχέση με τον στυλίσκο του τραχύμετρου. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έδωσε η περιστρεφόμενη βάση του προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K 3D. Σε κάθε πείραμα έγιναν από 250 τραχυμετρήσεις. Η κίνηση του στυλίσκου γινόταν στην κατεύθυνση κάθετα της πρόωσης με βήμα 2mm ενώ σε κάθε βήμα πραγματοποιούνταν 5 μετρήσεις. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο [σχήμα 5.6](#).

#### 5.4 Αποτελέσματα τραχυμετρήσεων

Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της τραχύτητας κατά 7.5%. Οι μεγαλύτερες μειώσεις παρατηρήθηκαν στις περιοχές όπου η κλίση της επιφάνειας γίνεται μηδενική. Στο κάθετο φραιζάρισμα παρατηρούνται γενικότερα μεγάλες τιμές τραχύτητας λόγω του ότι το εργαλείο στο κέντρο του δεν κόβει λόγω μηδενικής ταχύτητας και επομένως σέρνεται πάνω στην επιφάνεια. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ρυθμίζοντας κατάλληλα τις συνθήκες κοπής μπόρεσε να μειώσει την τραχύτητα στην περιοχή αυτή έως και 2  $\mu\text{m}$ . Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας. Η μεταβολή της πρόωσης ανά περιστροφή και δόντι έπαιξε σημαντικό ρόλο στη μείωση της τραχύτητας όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.7](#).



Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα μέσης τραχύτητας των πέντε τιμών σε κάθε θέση πάνω στο τεμάχιο

Ο παρακάτω πίνακα παρουσιάζει τις τιμές όλων των τραχυμετρήσεων που έγιναν στα δύο πειράματα. Παρατηρείται επίσης πως στην περιοχή από 0-50mm η τραχύτητα είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την περιοχή 50-100mm καθώς το φραιζάρισμα είναι ελκτικό και η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Η μείωση της τραχύτητας είναι αρκετά αισθητική στο βελτιστοποιημένο τεμάχιο και μπορεί να φανεί με γυμνό μάτι.

α/α	Τραχυμετρήσεις πειρ. 1 [μm]					R <sub>z1</sub>	Τραχυμετρήσεις πειρ. 2 [μm]					R <sub>z2</sub>	Διαφ.
2	5.48	5.6	5.66	5.68	5.67	5.618	5.65	5.41	6.03	5.61	5.95	5.73	0.112
4	5.37	5.58	5.64	4.99	5.3	5.376	5.3	5.84	5.35	5.84	5.25	5.516	0.14
6	5.94	5.67	5.61	5.79	6.03	5.808	4.63	4.97	4.49	5.13	4.91	4.826	-0.982
8	5.77	5.5	5.59	6.51	6.54	5.982	5.24	5.17	5.51	5.45	5.9	5.454	-0.528
10	6.39	6.72	7.15	6.75	7	6.802	5.39	5.79	5.51	6.09	5.89	5.734	-1.068
12	7.23	6.48	6.27	7.11	6.31	6.68	5.34	6.13	5.86	5.95	5.74	5.804	-0.876
14	4.91	4.13	4.97	4.92	5.29	4.844	4.72	4.52	4.71	5.31	4.87	4.826	-0.018
16	4.27	4.39	5.1	5.03	5.61	4.88	4.47	4.55	5.36	4.93	5.3	4.922	0.042
18	6.19	5.52	6.22	6.47	6.53	6.186	6.59	5.2	5.49	6.38	6.31	5.994	-0.192
20	5.68	5.87	5.78	6.56	6.6	6.098	5.73	4.85	5.7	6.27	5.54	5.618	-0.48
22	5.73	5.82	5.51	6.65	6.47	6.036	5.44	5.59	6.07	6.5	6.5	6.02	-0.016
24	6.99	6.52	5.98	6.36	6.02	6.374	6.74	6.41	6.06	6.28	5.99	6.296	-0.078
26	5.51	6.13	5.87	6.08	6.32	5.982	5.16	5.85	6.01	6.29	6.38	5.938	-0.044
28	5.82	6.05	5.29	5.9	5.91	5.794	5.49	4.97	5.22	5.98	5.46	5.424	-0.37
30	5.72	5.89	5.9	6.03	6.25	5.958	5.51	5.5	5.67	6.03	6.27	5.796	-0.162
32	4.94	5.44	5.34	6.25	5.6	5.514	5.01	5.19	5.18	5.61	5.48	5.294	-0.22
34	5.24	5.59	5.59	6.24	5.69	5.67	5.8	4.9	4.81	5.72	5.79	5.404	-0.266
36	6.41	7.18	6.82	7.8	6.52	6.946	5.73	5.91	6.04	6.89	6.27	6.168	-0.778
38	6.11	6.27	6.5	7.33	7.21	6.684	6.32	6	6.63	7.06	7.18	6.638	-0.046
40	6.65	6.54	6.35	7.3	6.92	6.752	5.59	5.87	5.23	6.38	6.32	5.878	-0.874
42	5.95	5.73	5.84	6.25	6.27	6.008	5.75	5.81	5.58	5.26	5.33	5.546	-0.462
44	6.77	6.54	6.62	6.68	6.62	6.646	6.06	6.18	6.11	5.33	5.17	5.77	-0.876
46	5.72	5.97	6.5	6.24	5.8	6.046	4.25	4.75	5.45	4.81	4.11	4.674	-1.372
48	4.69	5.16	4.78	4.49	5.07	4.838	5.02	4.7	4.78	4.41	4.23	4.628	-0.21
50	5.77	5.62	6.13	6.48	6.18	6.036	4.88	5.3	5.64	5.29	5.21	5.264	-0.772
52	7.18	6.4	6.21	6.79	7.18	6.752	5.8	5.2	5.89	5.66	5.61	5.632	-1.12
54	5.58	5.89	7.45	6.51	7.45	6.576	4.45	4.23	4.39	5.24	5.36	4.734	-1.842
56	5.55	6.05	7.08	6.93	6.48	6.418	3.54	3.93	4.48	4.86	5.08	4.378	-2.04
58	3.99	3.76	4.08	4.03	3.54	3.88	3.56	3.59	3.56	3.97	3.77	3.69	-0.19
60	3.51	3.54	3.64	3.89	3.78	3.672	3.23	3.38	3.1	3.51	3.84	3.412	-0.26
62	3.71	3.35	3.74	3.91	3.84	3.71	3.4	3.14	3.43	3.46	3.43	3.372	-0.338
64	3.59	3.45	3.86	4.24	4.27	3.882	3.62	3.54	3.51	3.75	3.66	3.616	-0.266
66	3.91	3.92	3.76	3.49	3.38	3.692	3.78	3.93	3.63	3.4	3.21	3.59	-0.102
68	3.51	3.71	3.47	3.09	3.56	3.468	3.75	3.99	3.63	3.37	3.52	3.652	0.184
70	3.8	3.41	3.61	4.21	4.21	3.848	3.77	3.99	3.77	3.92	4.1	3.91	0.062
72	3.35	3.85	4.06	4.07	4.5	3.966	3.24	3.2	3.23	3.65	3.77	3.418	-0.548
74	4.26	4.3	4.18	4.44	4.47	4.33	3.69	3.43	3.47	4.32	3.91	3.764	-0.566
76	4.05	3.83	3.7	3.98	4.17	3.946	3.77	3.33	3.61	3.83	4.1	3.728	-0.218
78	3.17	3.55	3.34	3.64	3.88	3.516	3.17	3.04	3.08	3.54	3.61	3.288	-0.228
80	4.12	3.8	4.39	4.49	4.34	4.228	3.63	3.64	4.01	4.17	4.11	3.912	-0.316
82	3.54	3.9	4.2	3.67	4.54	3.97	3.83	3.85	3.74	3.96	3.95	3.866	-0.104
84	3.4	2.67	3.39	3.79	3.49	3.348	3.28	2.83	3.08	3.75	3.23	3.234	-0.114
86	4.21	4.16	4.51	4.34	4.56	4.356	3.21	3.29	3.34	3	3.07	3.182	-1.174
88	4.13	4.11	4.27	4.5	4.28	4.258	3.7	3.53	3.59	3.78	4.14	3.748	-0.51
90	4.05	3.9	3.99	4.57	4.43	4.188	3.14	2.82	3.08	3.61	3.66	3.262	-0.926
92	3.1	3.15	3.2	3.29	3.31	3.21	3.12	3.37	3.31	3.95	2.74	3.298	0.088
94	3.77	3.73	3.88	3.5	4.11	3.798	3.78	3.85	3.91	3.6	3.8	3.788	-0.01
96	3.64	3.36	3.72	3.73	3.92	3.674	3.61	3.28	3.41	3.66	3.94	3.58	-0.094
98	3.01	3.08	3.03	2.98	2.86	2.992	3.42	3.18	3.32	3.5	3.74	3.432	0.44



## 6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δημιουργήθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης τροχιάς του εργαλείου το οποίο είναι σε θέση να ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα την τραχύτητα της επιφάνειας, τις δυνάμεις κοπής και τον χρόνο κατεργασίας λαμβάνοντας υπόψιν τη σχετική θέση του εργαλείου πάνω στην επιφάνεια. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε ένα μοντέλο σταθμισμένου μέσου για την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων και απαιτείται η απόδοση βαρών σε αυτά από τον χρήστη. Επίσης πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη σειρά πειραμάτων τραχύτητας και δυνάμεων κοπής για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Visual Basic, το Optipath, το οποίο καλείται μέσα από το Siemens NX 11.0. Ο χρήστης μπορεί να επέμβει στην επιφάνεια που θέλει να κατεργαστεί διακριτοποιώντας την όπως επιθυμεί, στις συνθήκες κοπής αλλά και στα βάρη των κριτηρίων για τη βελτιστοποίηση. Για την επιβεβαίωση του μοντέλου έγιναν δύο πειράματα σε ίδια γεωμετρία τεμαχίου και μονοπατιού. Στο πρώτο πείραμα οι συνθήκες κοπής ήταν οι βέλτιστες δυνατές και ίδιες για όλο το NC αρχείο ενώ στο δεύτερο πείραμα το NC αρχείο ήταν αποτέλεσμα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Το κριτήριο ελαχιστοποίησης ήταν μόνο η τραχύτητα. Οι τραχυμετρήσεις έδειξαν πως στο βελτιστοποιημένο μονοπάτι υπήρχε μείωση στην τραχύτητα κατά 7.5%.

Το θετικό του μοντέλου αυτού είναι το γεγονός ότι δεν είναι στατικό. Δηλαδή ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει για περισσότερα κριτήρια βελτιστοποίησης και μεγαλύτερη βάση δεδομένων πειραμάτων. Μελλοντικά λοιπόν θα μπορούσαν να γίνουν τα παρακάτω:

- Περισσότερα πειράματα τραχύτητας και δυνάμεων κοπής. Περισσότερες τιμές για τις γωνίες  $\phi$  και  $\omega$  και  $f_z$  στο διάστημα 0.1 – 0.5. Το μοντέλο θα καλύπτει μεγαλύτερο εύρος γεωμετριών για μεγάλες κλίσεις ενώ πυκνότερη διακριτοποίηση της πρόωσης είναι δυνατόν να φανερώσει ακόμα καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά της τραχύτητας. Για του ίδιους λόγους τα πειράματα θα πρέπει να εμπεριέχουν επιπλέον τιμές στην ταχύτητα κοπής.
- Προσθήκη επιπλέον κριτηρίων προς ελαχιστοποίηση όπως η φθορά του εργαλείου, οι ταλαντώσεις του συστήματος, το φαινόμενο Run out, οι αποκλίσεις της επιφάνειας και πολλές άλλες.
- Το πρόγραμμα βελτιστοποίησης θα μπορούσε να γίνει αυτόνομο και να μην εκτελείται μέσα από το NX 11.0. Έτσι θα υπήρχε συμβατότητα και με άλλα CAD/CAM προγράμματα.



## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Y. Feng, N. Su, "Integrated tool path and feed rate optimization for finishing machining of 3D plane surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 1557-1572, 2000.
- [2] I. Lazoglu, C. Manav, Y. Murtezaoglu, "Tool path optimization for free form surface machining," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 101-104, 2009.
- [3] C. Manav, H. S. Bank, I. Lazoglu, "Intelligent toolpath selection via multi-criteria optimization in complex sculptured surface milling," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 24, pp. 349-355, 2013.
- [4] K. Erkorkmaz, M. Heng, "A heuristic federate optimization strategy for NURBS toolpaths," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 407-410, 2008.
- [5] C. N. Chu, S. Y. Kim, J. M. Lee, B. H. Kim, "Feed-Rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features," *Annals of the CIRP*, vol. 46, pp. 433-436, 1997.
- [6] W. He, M. Lei, H. Bin, "Iso-parametric CNC tool path optimization based on adaptive grid generation," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, pp. 538-548, 2009.
- [7] S. Ding, M. A. Mannan, A.N. Poo, D. C. H. Yang, Z. Han, "Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces," *Computer-Aided Design*, vol.35, pp.141-153, 2003.
- [8] S. C. Park, B. K. Choi, "Tool-path planning for direction-parallel area milling," *Computer-Aided Design*, vol.32, pp.17-25, 2000.
- [9] L. T. Tunc, E. Budak, S. Bilgen, M. Zatarain, "Process simulation integrated tool axis selection for 5-axis tool path generation," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 381-384, 2016.
- [10] H. Ding, L. M. Zhu, "Global Optimization of tool path for five-axis flank milling with a cylindrical cutter," *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 52, pp. 2449-2459, 2009.
- [11] L. M. Zhu, H. Ding, Y. L. Xiong, "Simultaneous optimization of toll path and shape for five-axis flank milling," *Computer-Aided Design*, vol.44, pp.1229-1234, 2012.
- [12] Z. L. Li, L. M. Zhu, "Envelope Surface Modeling and Tool Path Optimization for Five-Axis Flank Milling Considering Cutter Runout," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, 2014.
- [13] L. Zhang, "Process modeling and toolpath optimization for five-axis ball-end milling based on tool motion analysis," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 905-916, 2011.
- [14] Q. Guo, Y. W. Sun, D. M. Guo, "Analytical modeling of geometric errors induced by cutter runout and tool path optimization for five-axis flank milling," *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 54, pp. 3118-3190, 2011.
- [15] X. Beudaert, P. Y. Pechard, C. Tournier, "5-Axis tool path smoothing based on drive constraints," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 51, pp. 958-965, 2011.
- [16] M. Lobontiu, I. Pasca, "Influence of tool axis inclination angle on the surface roughness in ball end milling of C45 material," *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 11, 2013.
- [17] S. R. Nagy, I. Pasca, M. Lobontiu, M. Banica, "Experimental research of effective cutting speed influence on surface roughness in ball end milling of C45 material with hardness 34 HRC," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 657, pp. 53-57, 2014.
- [18] S. Ehsan Layegh K., I. Lazoglu, "3D surface topography analysis in 5-axis ball-end milling," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 66, pp. 133–136, 2017.

- [19] Arora, Jasbir S. (2004). *Introduction to optimum design 2<sup>nd</sup> Edition*. Elsevier/Academic Press.
- [20] Miettinen, Kasia. (1998). *Nonlinear Multiobjective Optimization (International Series in Operations Research & Management Science)*. Springer.
- [21] Sandvik Coromant, 1996. Modern Metal Cutting—a practical handbook. Fair Lawn NJ, Sandvik Coromant.
- [22] Siemens, (2014). Getting Started with SNAP.
- [23] Μηχανουργική Τεχνολογία, Τόμος Β΄, 2η Έκδοση, Αντωνιάδης Αριστομένης Θ.
- [24] Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση, Μπιλάλης Νικόλαος Α., Μα-  
ραβελάκης Εμμανουήλ.
- [25] ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CAD/CAM/CAE, KUNWOO LEE.
- [26] Αντωνίου Μαρία. 2018. “Σχεδίαση και κατεργασία πολυαξονικών επιφανειών με τη  
χρήση του λογισμικού CAD/CAM NX”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών  
Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [27] Σίδερης Αντρέας. 2018. “Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στην ποιότητα επι-  
φάνειας και στις δυνάμεις κοπής στο φραιζάρισμα με εργαλεία σφαιρικής απόληξης”,  
Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο  
Κρήτης.