



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**Προσομοίωση κατεργασίας φραιζαρίσματος σε μικρο-κλίμακα  
και πειραματική μελέτη του AI7075-T651**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

ΥΠΟ ΤΟΝ

Βακόνδιο Δημήτριο

Χανιά, Οκτώβριος 2015



**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**  
**SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT**

**Milling process simulation in micro-scale  
and experimental study of Al7075-T651**

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the  
degree of Doctor of Philosophy

by

Vakondios Dimitrios

Chania, October 2015

Copyright © υπό Δημήτριο Βακόνδιο  
Χανιά 2015

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα και μόνο. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν τη διατριβή εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.





Η διατριβή του Βακόνδιου Δημήτρη εγκρίνεται από:

**Αντωνιάδης Αριστομένης** (Επιβλέπων)

Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Πολυτεχνείο Κρήτης

**Μπιλάλης Νικόλαος** (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Πολυτεχνείο Κρήτης

**Τσιάφης Ιωάννης** (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

**Δαυίδ Κωνσταντίνος**

Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας

**Σταυρουλάκης Γεώργιος**

Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Πολυτεχνείο Κρήτης

**Μανσούρ Γκάμπριελ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

**Κυράτσης Παναγιώτης**

Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών  
και Βιομηχανικού Σχεδιασμού ΤΕ  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Μακεδονίας



**Στους αγαπημένους μου παππούδες  
που με μεγάλωσαν, Λάμπρο και  
Κατίνα Κυμηνά και στην Αγάπη.**





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	IX
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα.....	X
Περίληψη .....	XII
Abstract.....	XIII
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της διατριβής .....	1
1.2 Στόχοι της διατριβής.....	1
1.3 Δομή της διατριβής.....	2
<b>2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Εισαγωγή .....	5
2.2 Κατεργασία φραιζαρίσματος .....	6
2.2.1 Κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης .....	8
2.2.2 Κατεργαζόμενη επιφάνεια και επιφανειακή τραχύτητα.....	9
2.2.3 Δυνάμεις κοπής.....	15
2.3 Μικροκοπή .....	19
2.3.1 Ειδική ενέργεια κοπής.....	19
2.3.2 Δυνάμεις κοπής.....	20
2.3.3 Ελάχιστο πάχος αποβλίττου .....	22
2.3.4 Δημιουργία επιφάνειας και σχηματισμός απόληξης (burr) .....	24
2.3.5 Επιφανειακή τραχύτητα.....	25
2.3.6 Θερμοκρασία κοπής, ζωή εργαλείου, εσωτερικές ρωγμές, ολκιμότητα .....	26
2.3.7 Σταθερό σημείο πύκνωσης .....	27
2.3.8 Ελαστοπλαστική παραμόρφωση .....	28
2.3.9 Επιδράσεις μικροδομής .....	29
2.3.10 MD προσομοίωση σε νανομετρική κοπή .....	31
2.3.11 MD προσομοίωση στη μικροκατεργασία.....	32
2.3.12 Ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων .....	32
2.3.13 Πολυδιάστατη προσομοίωση .....	34
2.3.14 Μηχανιστική μοντελοποίηση .....	34
2.4 Αναγκαιότητα της εργασίας.....	37
<b>3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>39</b>
3.1 Εισαγωγή .....	39
3.2 Περιβάλλοντα ανάπτυξης του μοντέλου.....	39
3.3 Δομή του μοντέλου.....	40
3.4 Ανάπτυξη μοντέλου τρισδιάστατης προσομοίωσης φραιζαρίσματος.....	42
3.4.1 Δημιουργία κατεργαζόμενου τεμαχίου.....	43
3.4.2 Δημιουργία κοπτικών εργαλείων .....	43
3.4.3 Εφαρμογή κινηματικής και στρατηγικών φραιζαρίσματος .....	45
3.5 Προκύπτουσα τοπομορφία .....	49
3.6 Τρισδιάστατο απαραμόρφωτο απόβλιττο .....	50
3.7 Υπολογισμός επιφανειακής τραχύτητας.....	52
3.8 Υπολογισμός δυνάμεων κοπής.....	54
3.9 Δημιουργία και εκτέλεση φόρμας εισαγωγής δεδομένων.....	56
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>61</b>
4.1 Εισαγωγή .....	61
4.2 Εξοπλισμός πειραμάτων .....	61

4.2.1	Υλικό κατεργασίας .....	61
4.2.2	Εργαλειομηχανή DMU 50 eco .....	62
4.2.3	Εργαλείο σφαιρικής απόληξης.....	62
4.2.4	Συσκευή προρύθμισης εργαλείων .....	66
4.2.5	Περιστροφικό υψηλόστροφο τσοκ μικροφραιζαρίσματος .....	66
4.3	Σχεδιασμός - Εκπόνηση πειραμάτων .....	67
4.4	Στερεοσκόπηση πειραμάτων .....	69
4.5	Τραχυμέτρηση πειραμάτων .....	70
4.5.1	Τραχύμετρο Diavite Compact .....	70
4.5.2	Προφίλομετρο Bruker Contour GT-K .....	71
4.6	Δυναμομέτρηση πειραμάτων .....	72
4.7	Αποτελέσματα.....	73
4.7.1	Στερεοσκόπηση .....	73
4.7.2	Τραχυμέτρηση .....	74
4.7.3	Προφίλομέτρηση .....	75
4.7.4	Δυναμομέτρηση .....	77
<b>5.</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>81</b>
5.1	Εισαγωγή.....	81
5.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων τοπομορφίας.....	81
5.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων επιφανειακής τραχύτητας .....	83
5.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων δυνάμεων κοπής .....	86
<b>6.</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ AL7075-T651.....</b>	<b>91</b>
6.1	Εισαγωγή.....	91
6.2	Επιδράσεις συνθηκών στην τραχύτητα επιφάνειας .....	91
6.3	Επιδράσεις συνθηκών στις δυνάμεις κοπής.....	94
6.4	Ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis) .....	96
6.4.1	Ανάλυση παλινδρόμησης .....	97
6.4.2	Ανάλυση διασποράς .....	97
6.4.3	Στατιστικό πακέτο Minitab.....	98
6.4.4	Πρόβλεψη τραχύτητας επιφάνειας.....	100
6.4.5	Πρόβλεψη δυνάμεων κοπής .....	106
<b>7.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....</b>	<b>109</b>
7.1	Εισαγωγή.....	109
7.2	Συμπεράσματα .....	109
7.3	Μελλοντικές κατευθύνσεις .....	110
<b>8.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>111</b>

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται ο δεκαετής κύκλος σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά όλους αυτούς που στήριξαν αυτήν την πορεία.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου **Αριστομένη Αντωνιάδη** με τον οποίο συνεργάζομαι τα περισσότερα χρόνια της θητείας μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Έπειτα, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής κ. **Νικόλαο Μπιλάλη**, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και κ. **Ιωάννη Τσιάφη**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, **Δαυίδ Κωνσταντίνο**, **Σταυρουλάκη Γεώργιο**, **Μανσούρ Γκάμπριελ** και **Κυράτση Παναγιώτη** για το χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγησή της και στις παρατηρήσεις τους για τη βελτίωση της ποιότητάς της.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους συνεργάτες μου που πέρασαν από το Εργαστήριο Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης και ιδιαίτερα τους φίλους μου **Αντώνη Λυρώνη** και **Χαρά Ευσταθίου** για την πολύτιμη και απλόχερη βοήθεια που μου προσέφεραν όποτε τη χρειάστηκα.

Πολύ μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω σε όλους τους φίλους μου που με στηρίζουν στην κάθε μου προσπάθεια και τέλος, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την οικογένειά μου και την Αγάπη.

## Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Δημήτρης Βακόνδιος γεννήθηκε στο Χολαργό Αττικής το 1988. Κατάγεται από τη Σύρο όπου και μεγάλωσε μέχρι να ολοκληρώσει τις σπουδές του στο Λύκειο το 2005. Αποφοίτησε από το τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης το 2010 και στη συνέχεια πραγματοποίησε τις Μεταπτυχιακές του σπουδές στο ίδιο τμήμα έως τις αρχές του 2012. Η ερευνητική του εργασία είχε τίτλο: «Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης τραχύτητας με χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων». Σήμερα ολοκληρώνει τη διδακτορική του διατριβή σε θέματα κατεργασιών και ειδικότερα της μελέτης του φραιζαρίσματος με χρήση συστημάτων CAD.

Κατά τα έτη φοίτησής του φέρει μεγάλο αριθμό διακρίσεων τιμώμενος με υποτροφίες από το Πολυτεχνείο Κρήτης, το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) και βράβευση από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.) με τιμητικό δίπλωμα και πλακέτα ως πρωτεύσας απόφοιτος των Πολυτεχνικών Σχολών της Χώρας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010. Ταυτόχρονα αποκτά εργασιακή εμπειρία τους θερινούς μήνες από εταιρείες που δραστηριοποιούνται κυρίως στον τομέα των κατασκευών με τελευταία και ιδιαίτερης αναφοράς το ναυπηγείο ΝΕΟΡΙΟΝ της Σύρου το 2010.

Από το 2010 έως σήμερα εργάστηκε ως εργαστηριακός συνεργάτης στο Εργαστήριο Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης παρέχοντας διδακτικό έργο στα μαθήματα «Στοιχεία Μηχανών», «Κατασκευαστικές Τεχνολογίες σε Μίκρο-κλίμακα» και «Μηχανολογικό Σχέδιο» ενώ παράλληλα συμμετείχε με συμβάσεις έργου σε ερευνητικά προγράμματα όπως: «WASSERMed: Water Availability and Security in Southern Europe and the Mediterranean», «Ανάπτυξη νέων προϊόντων και αντιγράφων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση ψηφιοποίησης και τεχνολογιών παραγωγής σε μικρο-κλίμακα» της πρόσκλησης «Συνεργασία 2009» και «Παραμορφώσιμα εργαλεία μικροκοπής μεταβλητής γεωμετρίας αποτελούμενα από κοπτικά νανοσωματίδια» της πρόσκλησης «Συνεργασία 2011».

Δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή περιοδικά:

- **Vakondios, D.** – Kyratsis, P. – Yaldiz, S. – Antoniadis, A., “Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminium alloy Al7075-T6”, Measurement, Elsevier, Vol. 45/6, (2012), pp.1480-1488.
- **Vakondios, D.** – Efstathiou, C. – Pappa, M. – Antoniadis, A., “Cad-based simulation and surface topomorph prediction in ball-end milling”, International Journal of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering – IJAMAE, Vol. 1/3, (2014), pp. 140-144.
- Efstathiou, C. – **Vakondios, D.** – Chatzikokolaki, A. – Antoniadis, A., “Optimal cutting conditions in ball-end milling of complex surfaces taking into account the desired surface roughness”, International Journal of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering – IJAMAE, Vol. 1/3, (2014), pp. 126-130.

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια:

- Tapoglou, N. – Belis, T. – **Vakondios, D.** – Antoniadis, A., “CAD-Based Simulation of Gear hobbing”, 31st Int. Symposium on Mechanics of Materials, Agia Marina, Greece, 9-14 May 2010, pp. 136-150.
- **Vakondios, D.** – Efstathiou, C. – Pappa, M. – Antoniadis, A., “Cad-based simulation and surface topomorph prediction in ball-end milling”, Proc. of the Intl. Conf. on Advances In Mechanical And Automation Engineering – MAE 2014, Rome, Italy, 7-8 June 2014, pp. 37-41.
- Efstathiou, C. – **Vakondios, D.** – Chatzikokolaki, A. – Antoniadis, A., “Optimal cutting conditions in ball-end milling of complex surfaces taking into account the



desired surface roughness”, Proc. of the Intl. Conf. on Advances In Mechanical And Automation Engineering – MAE 2014, Rome, Italy, 7-8 June 2014, pp. 42-46.

Από τις εκλογές της 24ης Νοεμβρίου 2013 μέχρι σήμερα εκπροσωπεί τους Μηχανικούς της Ελλάδας ως Μέλος της Κεντρικής Αντιπροσωπείας του Τ.Ε.Ε., έχοντας την έδρα των Κυκλάδων.

Στα ενδιαφέροντά του συγκαταλέγονται η μουσική, ο αθλητισμός, ο χορός καθώς και άλλες καλλιτεχνικές δραστηριότητες.

## Περίληψη

Η κατασκευή μηχανολογικών τεμαχίων απαιτεί μια σειρά από μηχανουργικές κατεργασίες. Από την άλλη μεριά κυρίαρχο ρόλο στη συναρμολόγηση τεμαχίων αλλά και στη λειτουργικότητα τους διαδραματίζει η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Έτσι, η παραμικρή βελτίωση της κατεργασίας και της ποιότητας των τελικών προϊόντων, είναι ικανή να δώσει το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην εκάστοτε βιομηχανία. Για το λόγο αυτόν, τα τελευταία χρόνια η έρευνα στο επιστημονικό πεδίο του φραιζαρίσματος με εργαλεία σφαιρικής απόληξης έχει ενταθεί. Καθ' όλη τη σύγχρονη περίοδο υπάρχει η τάση για κατασκευή μικρού μεγέθους αντικειμένων, οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού στη μικρο-κλίμακα αποτελούν τομέα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης στη μικρο-κλίμακα καθώς και η μελέτη της επίδρασης των συνθηκών κοπής, τόσο στο εργαλείο όσο και στην τελική ποιότητα επιφάνειας. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση της κατεργασίας αφορά τη γεωμετρική αναπαράσταση των συμμετεχόντων στην κατεργασία κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου, με εφαρμογή της κινηματικής της κατεργασίας. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης εντοπίζονται στον ακριβή προσδιορισμό της κατεργαζόμενης επιφάνειας και στην τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση του απαραμόρφωτου αποβλήτου κοπής και άρα στον ακριβέστερο υπολογισμό των δυνάμεων κοπής.

Για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών αναπτύχθηκε λογισμικό το οποίο ενσωματώνει όλα τα στάδια εφαρμογής της κινηματικής της κατεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό σχεδιάζει αυτόματα την τρισδιάστατη γεωμετρία του εργαλείου σφαιρικής απόληξης και του προς κατεργασία τεμαχίου και μέσα από διακριτά βήματα εφαρμόζεται η κινηματική της διαδικασίας. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, τα τρισδιάστατα μορφής αποτελέσματα αποθηκεύονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν την προκύπτουσα τοπομορφία επιφάνειας και το τρισδιάστατο απαραμόρφωτο απόβλητο της κοπής, ενώ με κατάλληλη επεξεργασία αυτών των αποτελεσμάτων προκύπτει η τραχύτητα της επιφάνειας και οι δυνάμεις κοπής. Τα αποτελέσματα τραχύτητας και δυνάμεων επαληθεύτηκαν μέσω μεγάλης σειράς πειραμάτων.

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής τραχύτητας αναπτύχθηκε εφαρμογή και αντίστοιχος αλγόριθμος υπολογισμού των κυρίων παραμέτρων βασισμένος στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προκύπτουσας επιφάνειας. Αντίστοιχα, αναπτύχθηκε εφαρμογή για τον υπολογισμό των κύριων συνιστωσών των δυνάμεων κοπής, βασισμένη στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του απαραμόρφωτου αποβλήτου, σύμφωνα με τους Kienzle και Victor. Τέλος, με τη χρήση ενός στατιστικού λογισμικού πακέτου εφαρμόστηκε η μέθοδος της ανάλυσης παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό εξισώσεων που περιγράφουν, τόσο την προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας, όσο και τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά το μικροφραιζάρισμα.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Μηχανουργικές κατεργασίες, CAD, Μικροκοπή

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μικροφραιζάρισμα, Εργαλείο σφαιρικής απόληξης, Μοντελοποίηση

## Abstract

Construction of complex mechanical parts requires numerous manufacturing processes. Machined surface quality plays a dominant role in mechanical assemblies as well as in the functionality of each part. Therefore, even a slight process and product quality enhancement offers a competitive advantage to a certain manufacturing industry. Modern research in the field of manufacturing has focused on ball end milling processes. Due to the fact that recently, there is a tendency for small object construction, micro scale cutting processes have become of particular interest.

The aim of the present thesis is the development of an integrated ball-nose end milling simulation model in micro scale, along with the investigation of the effect of cutting conditions on both tool and machined workpiece surface quality. The approach incorporated for the process simulation, involves the geometrical representation of the cutting tool and the workpiece followed by the utilization of process kinematics. The main benefits of this approach refer to the precise determination of the machined surface along with the three dimensional representation of the chip, which results in a more accurate cutting force calculation.

Within the context of the study, a simulation software that incorporates all stages of the process kinematics implementation, was developed. More specifically, as soon as the three dimensional geometries of the ball end mill and the workpiece are automatically produced, simulation proceeds to the discretized implementation of the process kinematics. As long as the simulation is completed, the three dimensional results are stored on the hard disk drive of the computer. The outcome of the simulation include the resulted surface topomorphy along with the undeformed chip and these data are used for the calculation of surface roughness and cutting forces. A series of experiments was conducted so as to validate the above-mentioned simulated results.

Furthermore, an application for the calculation of surface roughness was developed employing an algorithm that calculates the main roughness parameters using the geometric features of the resulted surface. Likewise, the respective application for the calculation of cutting force components was build, based on the undeformed chip geometric features in accordance with Kienzle and Victor. Finally, the regression analysis method was implemented for the determination of equations representing both machined surface roughness and cutting forces in micro-milling process.

SUBJECT AREA: Machining simulation, CAD modeling, Micro-scale

KEYWORDS: Micro-milling, Ball-nose end mill, 3D Simulation





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος που απευθύνεται κυρίως στην τάξη της μικρο-κλίμακας. Το φραιζάρισμα αποτελεί μια από τις κυριότερες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού που χρησιμοποιείται ευρέως, τόσο ως κατεργασία εκχόνδρισης, όσο και φινιρίσματος ανάλογα με τη χρήση της κατάλληλης γεωμετρίας κοπτικών εργαλείων.

Καθώς, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της εφαρμοσμένης έρευνας σε βιομηχανικό επίπεδο, τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την εξοικονόμηση κόστους και χρόνου της διαδικασίας παραγωγής προϊόντων. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή αποτελεί ένα λογισμικό προσομοίωσης που στοχεύει στην πρόβλεψη των κατάλληλων συνθηκών κοπής με σκοπό τη δημιουργία καλής ποιότητας επιφάνειας και την αποφυγή της φθοράς του κοπτικού εργαλείου που θα οδηγούσε στη μετέπειτα θραύση του. Ως μέτρο σύγκρισης της ποιότητας της επιφάνειας χρησιμοποιείται ο υπολογισμός της επιφανειακής τραχύτητας, ενώ αντίστοιχα για την αποφυγή θραύσης του κοπτικού εργαλείου υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία.

Στοχεύοντας στη δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου πραγματοποιήθηκαν πειράματα επαλήθευσης του μοντέλου σε AI7075-T651. Η επιλογή του υλικού έγινε με βάση την ευρεία χρήση που έχει στο βιομηχανικό τομέα ενώ παράλληλα έγινε διερεύνηση των συνθηκών κοπής για τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς την επίδρασή τους στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στο κοπτικό εργαλείο.

### 1.2 Στόχοι της διατριβής

Συνοπτικά οι πρωτότυπες ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύχθηκαν μέσω της παρούσας διατριβής είχαν τους εξής στόχους:

- **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος.** Το μοντέλο που αναπτύχθηκε ενσωματώνει πλήρως την κινηματική της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με εργαλεία σφαιρικής απόληξης και τις στρατηγικές του σε επίπεδο μικρο-κλίμακας. Στο μοντέλο αυτό προσδιορίζεται η τοπομορφία της κατεργασμένης επιφάνειας καθώς και το απαραμόρφωτο 3D απόβλλιτο κοπής. Η διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί τόσο για κάθετο, διατρητικό, ελκτικό και πλάγιο φραιζάρισμα όσο και για συνδυασμούς τους.
- **Ανάπτυξη λογισμικού υπολογισμού παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας.** Το λογισμικό υπολογίζει τις τρεις κύριες παραμέτρους τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $R_z$ . Ως δεδομένα εισόδου δέχεται αρχεία με τις συντεταγμένες των σημείων μιας τομής της επιφάνειας. Οι τιμές της τραχύτητας της επιφάνειας προκύπτουν ως ο μέσος όρος των τιμών σε διαφορετικά σημεία τομής της κατεργασμένης επιφάνειας.
- **Ανάπτυξη λογισμικού υπολογισμού των δυνάμεων κοπής.** Το μοντέλο δυνάμεων υπολογίζει τις μέγιστες συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στους άξονες  $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$ . Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι τα γεωμετρικά μήκη της διατομής του απαραμόρφωτου αποβλίστου σε διάφορες γωνίες περιστροφής. Παράλληλα, γίνεται γραφική απεικόνιση των τριών συνιστωσών των δυνάμεων κοπής για κάθε γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου.

- **Ανάπτυξη βάσης δεδομένων.** Για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε βάση δεδομένων όπου καταγράφονται όλες οι τιμές τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής του μοντέλου προσομοίωσης.
- **Διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κοπής.** Στο τέλος έγινε έλεγχος της επίδραση των συνθηκών κοπής. Με τη χρήση ενός στατιστικού πακέτου κατασκευάστηκαν εξισώσεις που κάνουν εκτίμηση της τιμής της επιφανειακής τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής με βάση τους επιθυμητούς παράγοντες κοπής.

### 1.3 Δομή της διατριβής

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας στα θέματα που αφορούν τη μικροκοπή και το φραιζάρισμα. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται οι ερευνητικές προσεγγίσεις των ερευνητικών ομάδων στα επιμέρους θέματα του φραιζαρίσματος, οι οποίες χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- **Μελέτη μικροκοπής:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν έρευνες σχετικά με τα φαινόμενα που βρίσκουν εφαρμογή στις κατεργασίες της μικροδιάστασης και διαφοροποιούνται από τις συνηθισμένες συμβατικές κατεργασίες φραιζαρίσματος. Οι κατεργασίες στο μέγεθος της μικρο-κλίμακας αποτελούν αναπτυσσόμενο χώρο έρευνας αλλά και εφαρμογής, ιδιαίτερα τα τελευταία είκοσι χρόνια.
- **Μελέτη κατεργαζόμενης επιφάνειας:** Οι μελέτες αυτές βασίζονται στη γεωμετρική απεικόνιση της τοπομορφίας της επιφάνειας η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της κινηματικής της κατεργασίας και τη ρύθμιση των παραγόντων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Οι διαφορετικές κλίσεις του κοπτικού εργαλείου καθώς και η στρατηγική του φραιζαρίσματος σε συνάρτηση με την τιμή της πρόωσης αποτελούν το συνδυασμό αυτόν που παράγει διαφορετικά μοτίβα επιφάνειας.
- **Μελέτη τραχύτητας επιφάνειας:** Η τραχύτητα συνήθως είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει μια επιφάνεια, τόσο ως προς την ποιότητά της, όσο και ως προς τη λειτουργικότητα αυτής. Σημαντική έρευνα έχει διεξαχθεί σε αυτήν τη θεματική ενότητα, κυρίως με την εξέταση πειραματικών δεδομένων υπό διάφορες συνθήκες κατεργασίας.
- **Μελέτη δυνάμεων κοπής:** Οι δυνάμεις κοπής αποτελούν αντικείμενο σημαντικού ερευνητικού ενδιαφέροντος. Μέσα από τη μελέτη των δυνάμεων κοπής απορρέουν χρήσιμα συμπεράσματα για την καταπόνηση του κοπτικού εργαλείου και το χρόνο ζωής του. Η μελέτη των δυνάμεων κοπής μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και εξοικονόμηση χρόνου καθώς και ελάττωση του κόστους.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης Ball 3D το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η δομή του κεφαλαίου συνοπτικά είναι η εξής:

- Συνοπτική περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου.
- Περιγραφή της δομής του μοντέλου σύμφωνα με την αλληλουχία των εκτελέσιμων εντολών που ακολουθούνται.
- Περιγραφή της δημιουργίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου και η κινηματική της κατεργασίας.
- Παρουσίαση της προκύπτουσας τοπομορφίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του τρισδιάστατου απαραμόρφωτου αποβλήτου.
- Ανάλυση του υπολογισμού της επιφανειακής τραχύτητας.

- Ανάλυση του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής.
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων τραχύτητας και δυνάμεων κοπής.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα πειράματα κοπής που έγιναν στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης καθώς και ο σχεδιασμός και τα αποτελέσματά τους σε διάφορες συνθήκες κοπής. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα που αναφέρονται στο τέλος του κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για επιλεγμένες συνθήκες κατεργασιών καθώς παράλληλα γίνεται και η επαλήθευση του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Η δομή του κεφαλαίου συνοπτικά είναι η εξής:

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων τοπομορφίας
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων επιφανειακής τραχύτητας και
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυνάμεων κοπής του μοντέλου με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται η επίδραση που έχουν οι συνθήκες κατεργασίας στις παραμέτρους της επιφανειακής τραχύτητας και στις δυνάμεις κοπής. Συνοπτικά παρουσιάζονται τα εξής:

- Διαγράμματα συσχέτισης συνθηκών κοπής με την επιφανειακή τραχύτητα.
- Διαγράμματα συσχέτισης συνθηκών κοπής με τις δυνάμεις κοπής.
- Παρουσίαση ενός στατιστικού λογισμικού πακέτου ανάλυσης.
- Χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης και δημιουργία εξισώσεων για την πρόβλεψη των τιμών τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής σε οποιεσδήποτε συνθήκες κοπής.

Τέλος, στα **Κεφάλαιο 7** και **8** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές κατευθύνσεις της διατριβής καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνησή της.







## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη προχωρημένων συστημάτων και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει ενσωματωθεί στη διαδικασία παραγωγής προϊόντων, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να βοηθά, τόσο στη μείωση του κόστους και των σφαλμάτων ή αστοχιών που μπορεί να προκληθούν, όσο και στη γρήγορη και ασφαλή λήψη αποτελεσμάτων. Μεγάλη είναι η συνεισφορά, σε αυτόν τον τομέα, των μοντέλων προσομοίωσης κατεργασιών που συνεχώς αναπτύσσονται. Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν χρήσιμα εργαλεία τα οποία παρουσιάζουν αποτελέσματα των κατεργασιών σε μια οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή χωρίς να είναι απαραίτητη η λειτουργία μιας εργαλειομηχανής.

Ένας από τους στόχους των συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής με χρήση Η/Υ (CAD/CAM) είναι η μοντελοποίηση επιφανειών ελεύθερης μορφής και στη συνέχεια η κατεργασία τους σε εργαλειομηχανές ψηφιακής καθοδήγησης. Η χρήση της ψηφιακής καθοδήγησης συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και την αύξηση της ποιότητας.

Η καλής ποιότητας επιφάνεια είναι βασικό ζητούμενο που απαιτείται στο σχεδιασμό μηχανολογικών προϊόντων [1]. Οι ιδιότητες των επιφανειών των προϊόντων που παράγονται με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού καθορίζουν την τελική ποιότητά τους, επειδή επηρεάζουν χαρακτηριστικά όπως η διαστατική ακρίβεια, ο συντελεστής τριβής, η φθορά, η εμφάνιση και ειδικά το κόστος. Η επιφανειακή τραχύτητα συνήθως μετράται αφότου έχει γίνει η κατεργασία και χρησιμοποιείται ως δείκτης της ποιότητας του προϊόντος.

Από τους σημαντικούς δείκτες της ποιότητας μιας επιφάνειας είναι η τοπομορφία της και η τραχύτητά της μια και για τη συναρμολόγηση σύνθετων κατασκευών πολλών τεμαχίων απαιτείται καλής ποιότητας επιφάνεια των συνεργαζόμενων μελών. Η τοπομορφία μιας επιφάνειας αποτελεί το πρώτο ορατό αποτέλεσμα μιας κατεργασίας αφαίρεσης υλικού. Από την τοπομορφία διακρίνονται κάποια ποιοτικά αποτελέσματα της επιφάνειας και ως εκ τούτου η ανάλυση της τοπομορφίας αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ερευνητικού ενδιαφέροντος. Απόρροια της ανάλυσης της τοπομορφίας σε μετέπειτα επεξεργασία μπορεί να είναι η τραχύτητα της επιφάνειας, οι δυνάμεις κοπής της κατεργασίας, κ.α..

Η τραχύτητα της κάθε επιφάνειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα της κατασκευής. Πολλοί ερευνητές έχουν εργαστεί στη μελέτη και την πρόβλεψη της τραχύτητας σε κατεργασίες συγκεκριμένων υλικών καθώς και στην προσπάθεια βελτίωσης των αντίστοιχων συνθηκών κοπής έτσι ώστε να επιτυγχάνονται καλύτερης ποιότητας επιφάνειες.

Η παραγωγή των προϊόντων συχνά ολοκληρώνεται μέσω κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Ως αποτέλεσμα της αφαίρεσης υλικού είναι η δημιουργία επιφάνειας με ορισμένη τραχύτητα στην επίτευξη της οποίας σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι τεχνικές προδιαγραφές του κοπτικού εργαλείου, οι ιδιότητες του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και οι διάφορες συνθήκες κοπής που εφαρμόζονται κατά την κατεργασία. Τέτοιες συνθήκες είναι το ακτινικό και το αξονικό βάθος κοπής, η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, η κλίση του κοπτικού κ.λπ.. Έτσι, η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κατεργασίας αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα στην επίτευξη της τελικής ποιότητας της επιφάνειας. Η γεωμετρία και η κινηματική του κοπτικού εργαλείου καθώς και το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, αποτελούν επίσης βασικούς παράγοντες της εμφανιζόμενης τραχύτητας επιφάνειας. Για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ποιότητας επιφανείας,

είναι απαραίτητος ο σωστός συνδυασμός των συνθηκών κοπής.

Μία ακόμα ανάγκη της σύγχρονης εποχής είναι η κατασκευή προϊόντων μικρής γεωμετρίας και υψηλής διαστατικής ακρίβειας. Ως συνέπεια αυτού, γίνεται εφαρμογή των κλασσικών τεχνικών αφαίρεσης υλικού στη μικρο-διάσταση με εργαλεία όμοιας γεωμετρίας με αυτά της μακρο-κλίμακας, αλλά πολύ μικρότερου μεγέθους και μεγαλύτερης ακρίβειας. Η μικροκοπή αποτελεί αντικείμενο έρευνας και μελέτης, μεγάλης σημασίας στις απαιτήσεις της παραγωγής.

## 2.2 Κατεργασία φραιζαρίσματος

Η συνήθης κατεργασία κοπής με εργαλείο πολλαπλής σημειακής επαφής είναι το φραιζάρισμα. Ως φραιζάρισμα καλείται η διεργασία κοπής με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου όπου το εργαλείο αυτό διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο. Οι κοπτικές ακμές φέρουν τη μορφή του σφήνα, όμοια με αυτόν του κοπτικού εργαλείου τόννευσης, για να μπορεί να εισέρχεται το κοπτικό εργαλείο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η κατεργασία του φραιζαρίσματος στηρίζεται σε δύο βασικές κινήσεις εκ των οποίων η πρώτη είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, η οποία ονομάζεται και κύρια κίνηση κοπής και η δεύτερη είναι η ταχύτητα της πρόωσης, δηλαδή η μετατόπιση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Οι βασικές συνθήκες κοπής κατά το φραιζάρισμα είναι:

- Η **πρόωση**, η οποία εκφράζει τη σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο. Η πρόωση σε κατεργασίες φραιζαρίσματος μπορεί να δοθεί με δύο μορφές: Είτε ως **πρόωση ανά περιστροφή  $f$**  του κοπτικού εργαλείου όπου γίνεται αναφορά στη μετατόπιση του εργαλείου στο διάστημα μιας πλήρους περιστροφής, είτε ως **πρόωση ανά δόντι  $f_z$**  σύμφωνα με την οποία ορίζεται η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου στο χρονικό διάστημα από την εισχώρηση ενός δοντιού (μιας κόψης), μέχρι την εισχώρηση του επόμενου. Εάν  $z$  είναι ο αριθμός των δοντιών του κοπτικού εργαλείου τότε:

$$f = f_z \cdot z \cdot n. \quad (2.1)$$

- Η **ταχύτητα κοπής  $v_c$** , που εκφράζει το ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση που είναι η περιστροφή του εργαλείου.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.2)$$

όπου  $D$  η εξωτερική διάμετρος του κοπτικού εργαλείου σε mm και  $n$  ο αριθμός των στροφών του (rpm).

- Το **βάθος (ή πλάτος) κοπής  $t$** , δηλαδή το καθορισμένο βάθος αφαίρεσης υλικού που επιτυγχάνεται μέσω της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στο περιφερικό φραιζάρισμα αντιστοιχεί στο πλάτος κοπής ενώ στο μετωπικό φραιζάρισμα στο αξονικό βάθος κοπής.

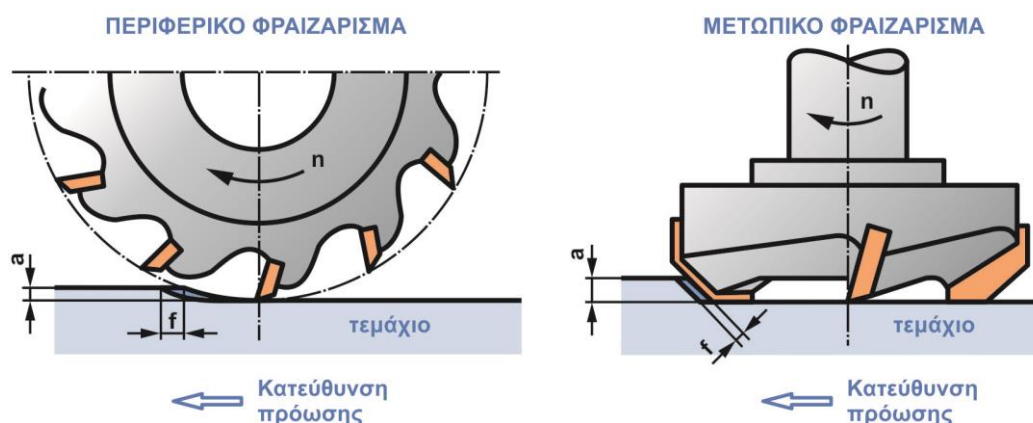
Αντίθετα προς τις άλλες συμβατικές κατεργασίες κοπής, στο φραιζάρισμα το απόβλιπτο έχει διατομή μεταβαλλόμενου πάχους, που είναι συνέπεια της επαλληλίας της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και της πρόωσης του τεμαχίου. Κατά τη διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια ενός κονδυλοφόρου εργαλείου, εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέσα σε ένα μικρό διάστημα της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει ως συνέπεια τα κοπτικά δόντια να πραγματοποιούν διακοπτόμενη κοπή, έτσι ώστε να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και να μην καταπονούν το εργαλείο θερμικά, αλλά από την άλλη πλευρά, η απότομη εμπλοκή του εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει ως συνέπεια την

καταπόνηση του εργαλείου λόγω κρουστικών φορτίων .

Τα είδη φραιζαρίσματος διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου:

- Το **περιφερικό φραιζάρισμα** όπου η κατεργαζόμενη επιφάνεια δημιουργείται από τα δόντια τα οποία βρίσκονται στην περιφέρεια του κοπτικού εργαλείου και ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια.
- Το **μετωπικό φραιζάρισμα** όπου το κοπτικό τοποθετείται σε άξονα κάθετο προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και η τελική επιφάνεια είναι το αποτέλεσμα της κοπής των κοπτικών ακμών που βρίσκονται στην περιφέρεια αλλά και στο εμπρός πρόσωπο του κοπτικού εργαλείου.

Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δύο είδη φραιζαρίσματος σύμφωνα με τη θέση του άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την κατεργαζόμενη επιφάνεια.



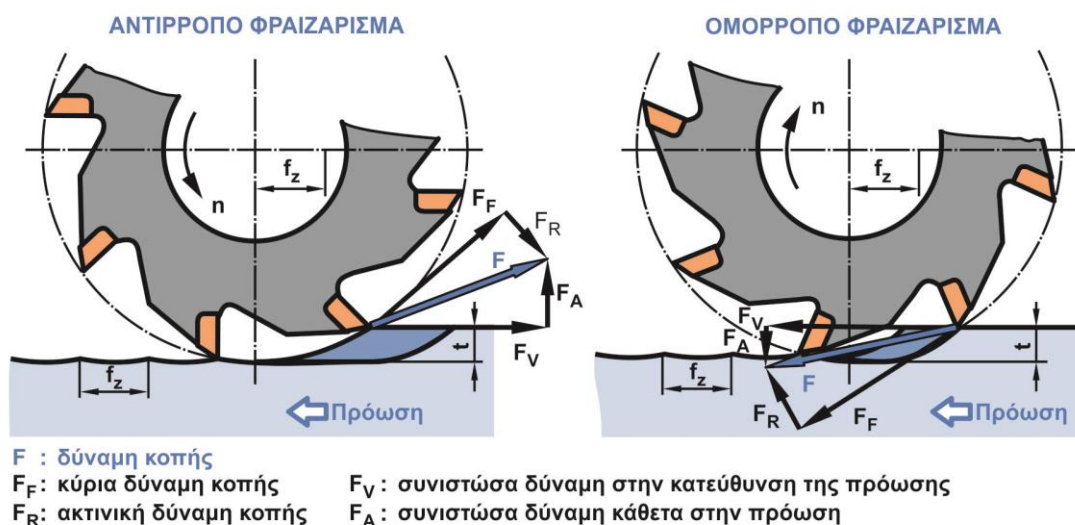
Σχήμα 2.1 Περιφερικό και μετωπικό φραιζάρισμα

Ανάλογα με την επιλογή της κίνησης του τεμαχίου σε σχέση με την περιστροφή του εργαλείου, το περιφερικό φραιζάρισμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως **αντίρροπο** ή **ομόρροπο** [2]. Ως αντίρροπο χαρακτηρίζεται το φραιζάρισμα κατά το οποίο η πρόωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι αντίθετη στην περιστροφή του κοπτικού εργαλείου. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου έχει την ίδια κατεύθυνση με την πρόωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το φραιζάρισμα χαρακτηρίζεται ως ομόρροπο.

Στο σχήμα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κινηματική για τα δύο είδη περιφερικού φραιζαρίσματος. Από το σχήμα γίνεται αντιληπτό πως στο αντίρροπο φραιζάρισμα, η κοπή ξεκινά από λεπτότερο απόβλιπτο, κάτι που δεν συμβαίνει στο ομόρροπο φραιζάρισμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο να δέχεται ισχυρότερες καταπονήσεις κατά την είσοδό του στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και έτσι να αυξάνεται ο κίνδυνος θραύσης του.

Παρ' όλα αυτά όμως, όπως προκύπτει από την κινηματική, το κοπτικό εργαλείο εφαρμόζει δύναμη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο προσθέτοντας σταθερότητα πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι η κοπή είναι πιο σταθερή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την κατεύθυνση των δυνάμεων κοπής στα δύο είδη φραιζαρίσματος όπου στο αντίρροπο φραιζάρισμα η συνισταμένη δύναμη κοπής  $F$  έχει φορά προς τα επάνω, προσπαθώντας ουσιαστικά να ανασηκώσει το τεμάχιο. Αντίθετα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα η συνισταμένη δύναμη κοπής έχει φορά προς το τραπέζι της

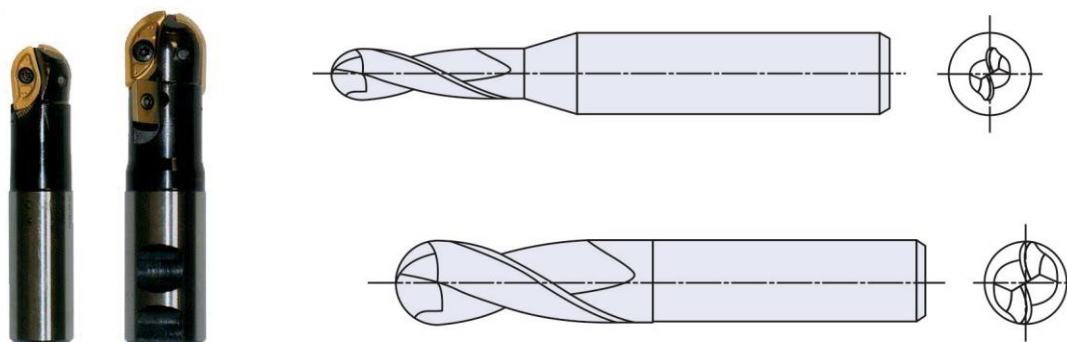
εργαλειομηχανής, ενισχύοντας τη σταθερότητα της σύνδεσης τεμαχίου – τραπέζιού.



Σχήμα 2.2 Αντίρροπο και ομόρροπο φραιζάρισμα

### 2.2.1 Κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης

Μια ευρέως διαδεδομένη κατεργασία για τη μορφοποίηση της τελικής επιφάνειας είναι η διαδικασία του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (Ball-end milling), όπως αυτό του σχήματος 2.3. Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και οι διαδρομές του είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τοπομορφία και την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Μελέτες έχουν εστιάσει στην επίδραση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου πάνω στην τραχύτητα της τελικής επιφάνειας [3, 4]. Οι διαδρομές του κοπτικού εργαλείου, στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, η κλίση του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και η κατεύθυνση της πρόωσης επηρεάζουν την επιφάνεια του τελικού προϊόντος [5, 6]. Η στρατηγική φραιζαρίσματος απορρέει από τις σχετικές θέσεις του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Πλήθος μοντέλων έχει αναπτυχθεί, τα οποία μπορούν να καθορίσουν την τοπομορφία μιας επιφάνειας που έχει παραχθεί από φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης έχει ήδη αναπτυχθεί [7].



Σχήμα 2.3 Εργαλεία σφαιρικής απόληξης

Στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, η ταχύτητα κοπής ποικίλει ανάλογα με το σημείο επαφής της κοπτικής ακμής και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η ρύθμιση των κλίσεων του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του κοπτικού εργαλείου καθώς και την επιφανειακή τραχύτητα, όπως αναφέρουν οι Κο και άλλοι [8]. Η τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου διαφοροποιείται ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει ο άξονας περιστροφής του εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και την κατεύθυνση της πρόωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του

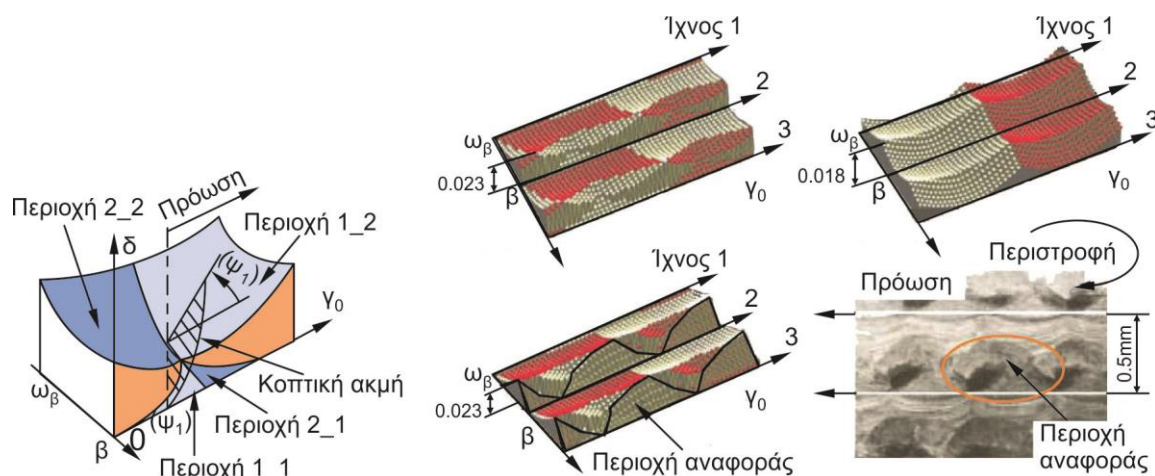


κοπτικού εργαλείου στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, έχουν κατασκευαστεί πολλά θεωρητικά μοντέλα προσέγγισης της επιφανειακής τραχύτητας, όπως αυτό του Quintana και άλλων [9], ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί για την κατεργασία αυτή εφαρμογές που βασίζονται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, όπως εκείνη του Quintana και άλλων [10].

### 2.2.2 Κατεργαζόμενη επιφάνεια και επιφανειακή τραχύτητα

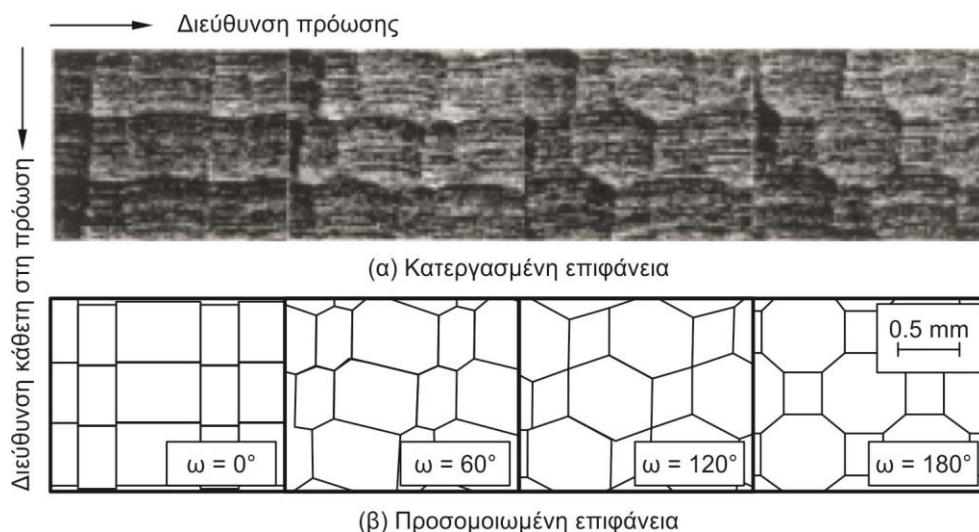
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον τομέα των κατεργασιών παρουσίαζε ανέκαθεν η προκύπτουσα τοπομορφία της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Ο κλασικός τρόπος φινιρίσματος επιφανειών με αφαίρεση υλικού που χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτός του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσπάθειες πρόβλεψης της τοπομορφίας των κατεργαζόμενων επιφανειών. Η πρόβλεψη αυτή συνήθως γίνεται είτε με αναλυτικές γεωμετρικές εξισώσεις και εφαρμόζοντας την κατάλληλη κινηματική της διαδικασίας είτε με ολοκληρωμένα συστήματα προσομοίωσης της κατεργασίας.

Ο Mizugaki και άλλοι [11] παρουσίασαν μια γεωμετρική μέθοδο εκτίμησης της κατεργασμένης επιφάνειας από εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Αρχικά διατυπώθηκε η γεωμετρική σχέση μεταξύ της κοπτικής ακμής και του κανονικού διανύσματος της σφαίρας. Μέσα από την ανάλυση των εξισώσεων, την κίνηση του κοπτικού εργαλείου και χρησιμοποιώντας έναν επιλύτη της μεθόδου Newton-Raphson πραγματοποιήθηκε η γραφική απεικόνιση σε ένα σύστημα CAD, η οποία επιβεβαιώνεται με την παρατήρηση της κατεργασμένης επιφάνειας. Στο ακόλουθο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται αποτελέσματα της τρισδιάστατης τοπομορφίας του μοντέλου.



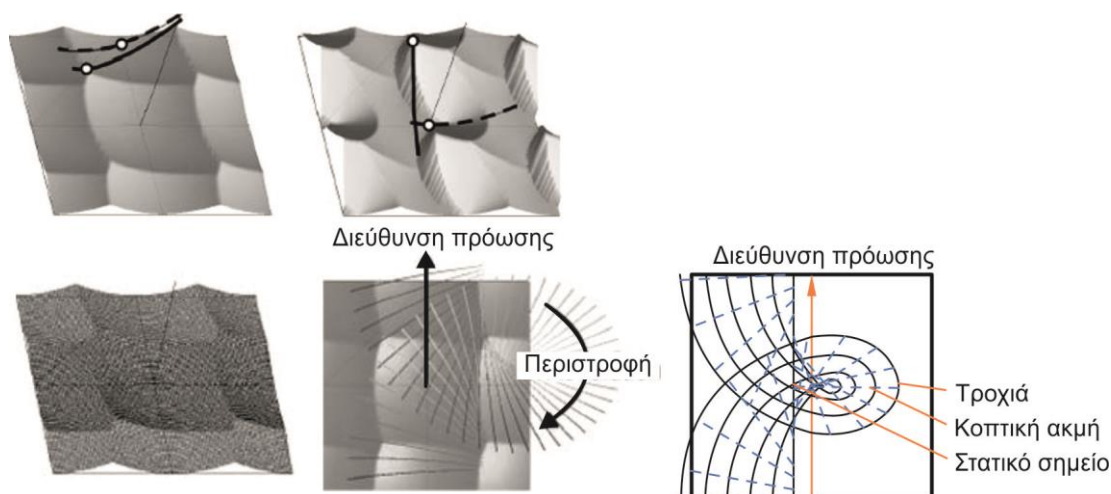
Σχήμα 2.4 Γεωμετρική ανάλυση και τρισδιάστατη τοπομορφία κατά Mizugaki et al.

Ο Saito και άλλοι [12] ανέλυσαν θεωρητικά και πειραματικά τον μηχανισμό του μοτίβου της επιφάνειας που δημιουργείται από την κατεργασία φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Στο πείραμα, η εκκεντρότητα του άξονα του εργαλείου και η γωνιακή θέση της κοπτικής ακμής ενός κονδυλιού σφαιρικής απόληξης ελέγχονται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο. Από τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι το μοτίβο που δημιουργείται σε επίπεδες ή κυλινδρικές επιφάνειες μπορεί να ελεγχθεί από αυτή τη μέθοδο. Το σχήμα 2.5 συγκρίνει την επιφάνεια που παράγεται από το μοντέλο προσομοίωσης με την κατεργασμένη επιφάνεια.



Σχήμα 2.5 Κατεργαζόμενη και προσομοιωμένη επιφάνεια κατά Saito et al.

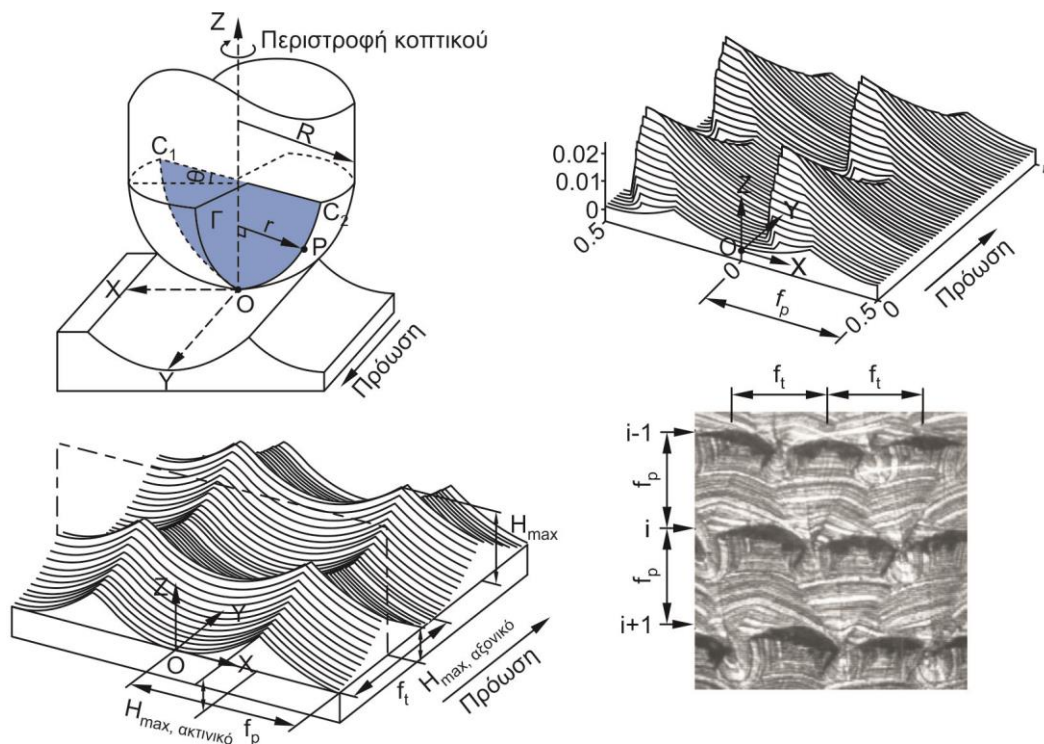
Ο Mizugaki και άλλοι [13] παρουσίασαν μια θεωρητική μέθοδο εκτίμησης του κατεργασμένου προφίλ επιφάνειας χωρίς πραγματική κατεργασία στο φραιζάρισμα σφαιρικής απόληξης (σχήμα 2.6). Οι εξισώσεις προσδιορισμού του ύψους των ακμών σε οποιοδήποτε σημείο του τεμαχίου της προσομοιωμένης επιφάνειας προέρχονται επιτυχώς από τη γεωμετρική σχέση μεταξύ της κίνησης της κοπτικής ακμής και την κάθετης ευθείας στο σημείο. Με αριθμητικό υπολογισμό, το προφίλ της κατεργασμένης επιφάνειας μπορεί να εκτιμηθεί και να απεικονιστεί γραφικά. Διαπιστώθηκε ότι τα μέγιστα και ελάχιστα ύψη των ακμών βρίσκονται σε ένα εύρος προσανατολισμού του εργαλείου μικρότερου των τριών μοιρών κοντά στην κανονική κατεύθυνση.



Σχήμα 2.6 Τρισδιάστατη τοπομορφία επιφάνειας κατά Mizugaki et al.

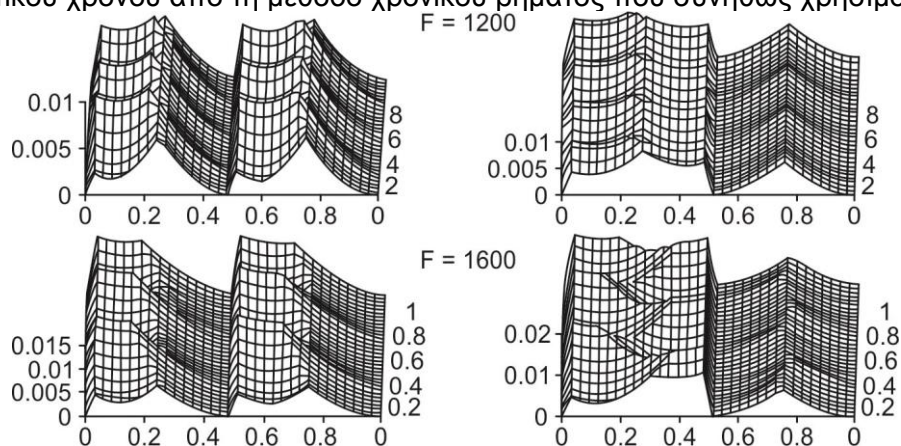
Ο Jung και άλλοι [14] ασχολήθηκαν με τη γεωμετρία της επιφανειακής τραχύτητας στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (σχήμα 2.7). Στην εργασία αυτή προτείνεται μια νέα μέθοδος, που ονομάζεται μέθοδος κορυφογραμμής, για την πρόβλεψη της διαδικασίας κατεργασίας της επιφάνειας. Μέσα από τη θεωρητική ανάλυση για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών γραμμών ορίστηκαν τρεις τύποι κορυφογραμμών. Για τον υπολογισμό του εναπομείναντος υλικού της κοπής λαμβάνονται υπόψη οι τροχιές των κοπτικών ακμών. Τέλος, τα προβλεπόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα ενός συμβατικού μοντέλου τραχύτητας. Επίσης, ο Jung και άλλοι [15] αξιολόγησαν τη μέγιστη τιμή τραχύτητας χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ανάλυσης κορυφογραμμών. Η κοπή εφαρμόστηκε, τόσο σε μονής κατεύθυνση, όσο και σε διπλής κατεύθυνσης λειτουργία. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν δείχνουν ότι η γεωμετρική

επιφανειακή τραχύτητα της αμφίδρομης λειτουργίας είναι συνήθως μεγαλύτερη από εκείνη της μονής κατεύθυνσης.



Σχήμα 2.7 Γεωμετρική ανάλυση κινηματικής και αποτελέσματα κατά Jung et al.

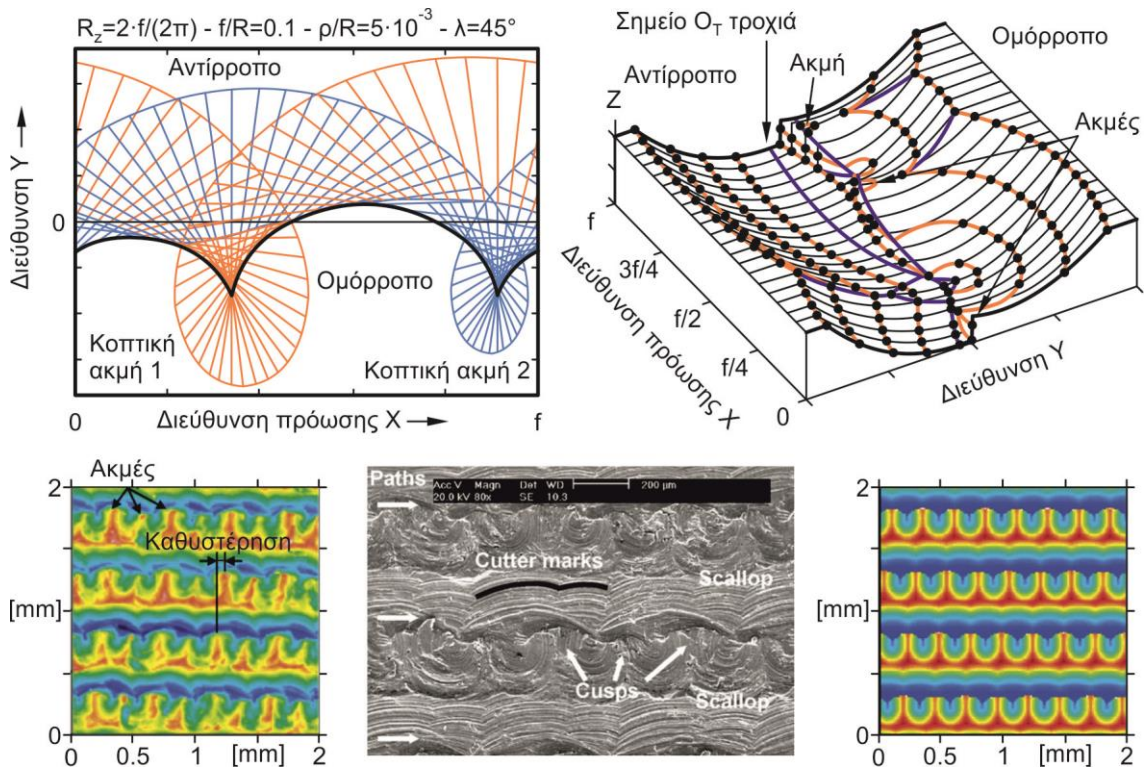
Ο Zhang και άλλοι [16] βασισμένοι στις διαδρομές του εργαλείου και την εξίσωση της πορείας της κοπτικής ακμής του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο κατεργασίας ανέπτυξαν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο για την αριθμητική προσομοίωση της τοπομορφίας της επιφάνειας σε κατεργασία φραιζαρίσματος πολλών αξόνων με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (σχήμα 2.8). Μελέτησαν λεπτομερώς την επίδραση των παραμέτρων κοπής, όπως η εκκεντρότητα του κοπτικού και η γωνία κλίσης του εργαλείου στην τοπομορφία και την τραχύτητα της επιφάνειας. Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους, τα βασικά πλεονεκτήματα και οι καινοτομίες της προτεινόμενης μεθόδου είναι οι εξής. Πρώτον, θεωρείται περιττή η διακριτοποίηση της κοπτικής ακμής και της περιστροφικής και αξονικής κίνησης του κοπτικού. Δεύτερον, για πρώτη φορά μελετήθηκε συστηματικά και ορίστηκε με σαφήνεια η επίδραση των στρατηγικών κοπής και της γωνίας κλίσης του εργαλείου. Η γενικότητα του αλγορίθμου καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της τιμής των σημείων της τοπομορφίας σε οποιαδήποτε κατεργασμένη επιφάνεια. Εκτός αυτού, η προτεινόμενη μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποτελεσματική στην εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου από τη μέθοδο χρονικού βήματος που συνήθως χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.8 Προσομοιώσεις επιφανειών σε διάφορες συνθήκες κοπής κατά Zhang et al.

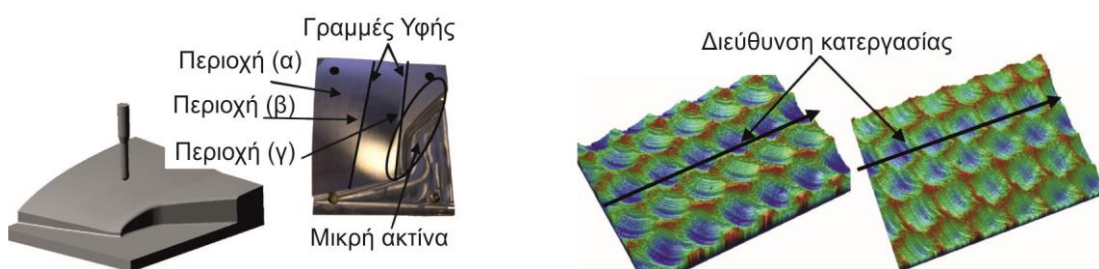


Ο Arizmendi και άλλοι [17] παρουσίασαν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της τοπομορφίας των φραιζαρισμένων με εργαλείο σφαιρικής απόληξης επιφανειών λαμβάνοντας υπόψη τον παράλληλο άξονα του εργαλείου (σχήμα 2.9). Αρχικά ορίζονται οι εξισώσεις των τροχιών της κοπτικής ακμής και της καμπύλης του υλικού που σαρώνεται από το εργαλείο. Έπειτα, οι τροχιές τέμνονται από επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση της πρόωσης αποκτώντας ένα σύνολο υπερβατικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με τη μετατροπή τους σε πολυωνυμικές εξισώσεις μέσω των επεκτάσεων του Chebyshev. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι δεν απαιτεί κανένα σημείο αφετηρίας για την επίτευξη της λύσης.



Σχήμα 2.9 Ανάλυση τροχιάς κοπτικής ακμής και προκύπτουσα επιφάνεια κατά Arizmendi et al.

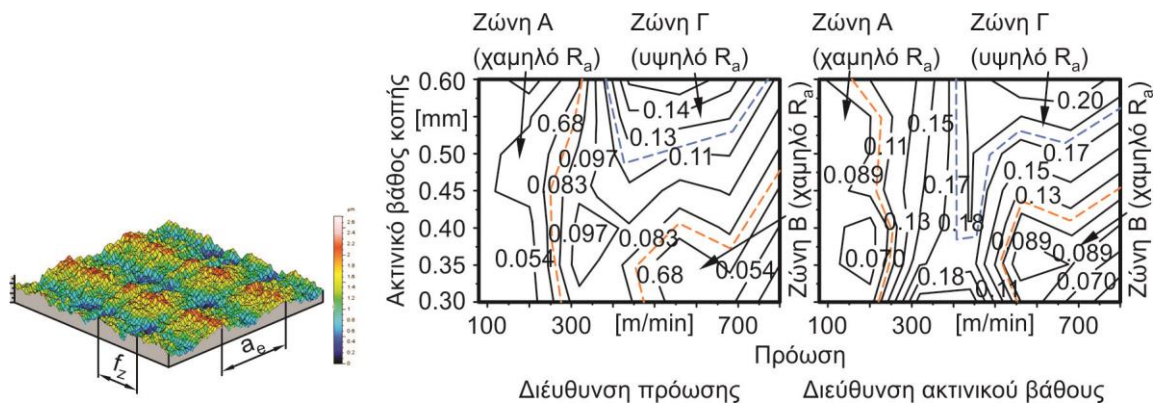
Ο Quinsat και άλλοι [18] προσδιόρισαν μια παράμετρο επιφανειακής τραχύτητας, η οποία κανονικοποιεί τη σχετική επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Αυτή η παράμετρος προέκυψε από την προσομοίωση της τρισδιάστατης επιφάνειας σε τριαξονική κατεργασία με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Η ανάλυση των μοτίβων που λαμβάνονται για διάφορα σύνολα μηχανικών παραμέτρων χρησιμεύει στην επισήμανση αυτών που επηρεάζουν τη 3D τοπομορφία της επιφάνειας (σχήμα 2.10). Η παράμετρος τραχύτητας επιφάνειας 3D επομένως ορίζεται σύμφωνα, τόσο με την παράμετρο της στρατηγικής της κατεργασίας, όσο και με τη περιγραφή της επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο η 3D απεικόνιση χρησιμοποιείται για την επιλογή των παραμέτρων κοπής που θα οδηγήσουν στο αναμενόμενο επίπεδο επιφανειακής τραχύτητας.



Σχήμα 2.10 Κατεργαζόμενη επιφάνεια κατά Quinsat et al.

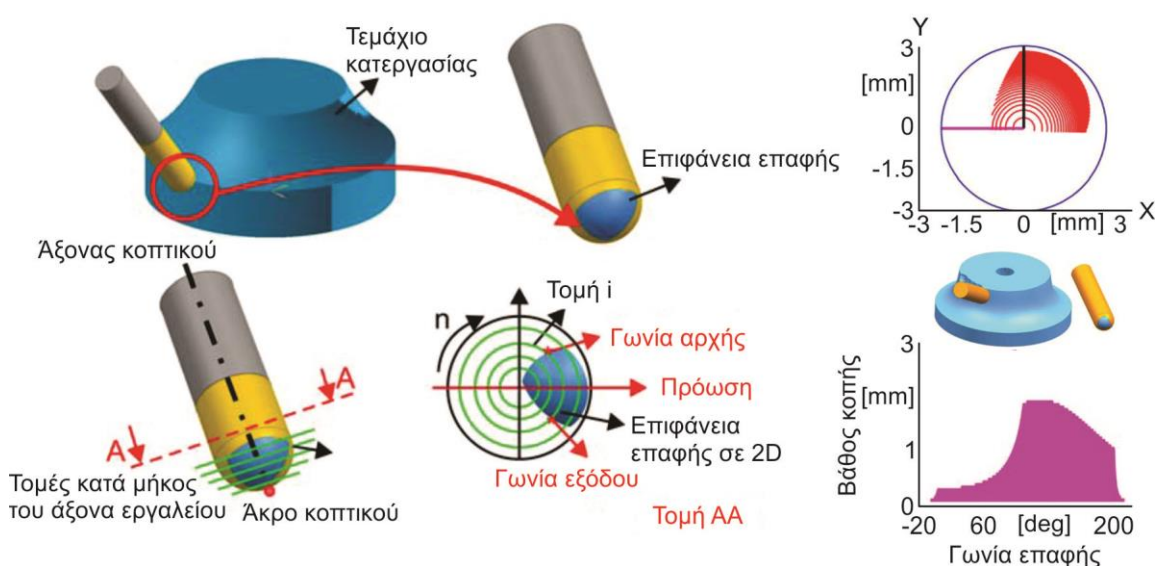


Ο Zhang και Guo [19] χρησιμοποίησαν επικαλυμμένα κονδύλια TiN και εφαρμόζοντας τη μέθοδο Taguchi σχεδιασμού πειραμάτων σε σκληροχάλυβα προσπάθησαν να διερευνήσουν τη βέλτιστη τοπομορφία και τραχύτητα επιφάνειας (σχήμα 2.11). Για τη διερεύνηση του μηχανισμού του σχηματισμού της υψής της επιφάνειας και τη συσχέτιση των υψών με τις μετρούμενες επιφάνειες ανέπτυξαν ένα κινηματικό μοντέλο για το κοπτικό εργαλείο. Οι τιμές τραχύτητας  $R_a$  της τρισδιάστατης επιφάνειας που προέκυψε βρέθηκαν μικρότερες του 0.1m στη διεύθυνση της πρόωσης και του 0.15m στη διεύθυνση του ακτινικού βάθους κοπής πράγμα το οποίο δείχνει ότι το μικροφραιζάρισμα υπό συγκεκριμένες συνθήκες κοπής μπορεί να αντικαταστήσει τη λείανση ως διαδικασία φινιρίσματος. Με τη δημιουργία ενός χάρτη επιφάνειας φαίνεται η επίδραση των παραμέτρων στην τοπομορφία της επιφάνειας.



Σχήμα 2.11 Μοντέλο επιφάνειας και χάρτες τραχύτητας κατά Zhang και Guo

Ο Lazoglu και άλλοι [20] παρουσίασαν μια γενικευμένη προσέγγιση για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής πολύπλοκης μορφής επιφανειών σε κατεργασία 5-αξόνων (σχήμα 2.12). Η συσχέτιση μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου στο μοντέλο προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε ακριβώς κατά μήκος της διαδρομής του εργαλείου από μια εξελεγμένη μέθοδο ορίου αναπαράστασης. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο για τη μηχανική φραιζαρίσματος 5-αξόνων για οποιαδήποτε δεδομένα στερεά μοντέλα τεμαχίων με ελεύθερης μορφής πολύπλοκη επιφάνεια. Θεωρητικές προσομοιώσεις και πειραματικές επαληθεύσεις δείχνουν ότι οι δυνάμεις κοπής προβλέπονται γρήγορα και με ακρίβεια για την κατεργασία 5-αξόνων επιφανειών σύνθετης μορφής.

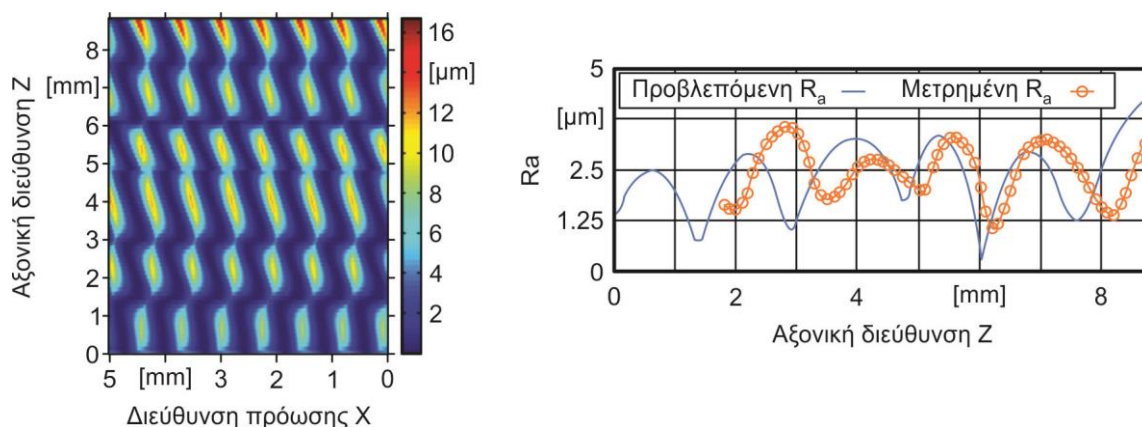


Σχήμα 2.12 Μοντέλο 5-αξονικής κοπής κατά Lazoglu et al..

Ο Boujelbene και άλλοι [21] έκαναν έρευνα πάνω στη μεταβολή της ταχύτητας κοπής και

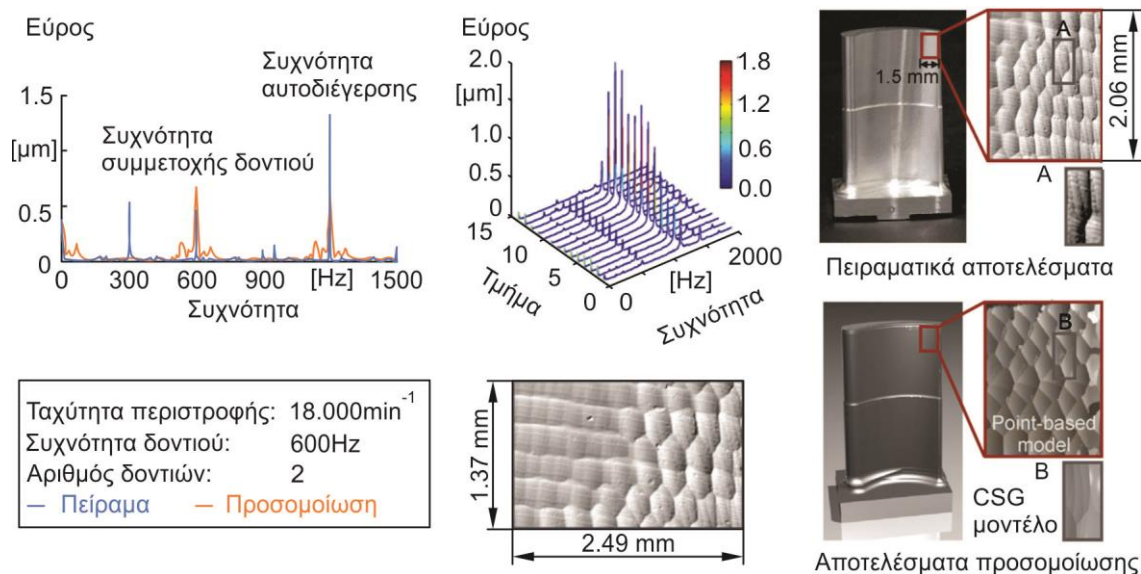
την επίδρασή της στην τοπομορφία επιφάνειας στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Διάφορες στρατηγικές φραιζαρίσματος εφαρμόστηκαν σε πειράματα χάλυβα και εκτιμήθηκε η επιφανειακή τραχύτητα. Η μεθοδολογία συνίσταται στον καθορισμό της ταχύτητας κοπής για κάθε γωνία κλίσης του εργαλείου και στην απόδειξη μιας σειράς διαμορφώσεων που απορρέουν από τους συνδυασμούς των ακόλουθων παραμέτρων κοπής: ταχύτητα κοπής  $v_c$ , ταχύτητα πρόωσης  $v_f$  και κλίση του εργαλείου. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε πολλές περιπτώσεις η κλίση του εργαλείου πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια μπορεί να επιφέρει καλύτερης ποιότητας επιφάνεια.

Ο Arizmendi και άλλοι [22] παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της επιφανειακής τραχύτητας (σχήμα 2.13) στο οποίο ενσωμάτωσαν τις ταλαντώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία φραιζαρίσματος. Το μοντέλο περιλαμβάνει την επίδραση των δονήσεων του εργαλείου στις εξισώσεις των διαδρομών της κοπτικής ακμής οι οποίες μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες πολυωνυμικές εξισώσεις και επιλύονται για διακριτές θέσεις κατά μήκος της κατεύθυνσης της πρόωσης.



Σχήμα 2.13 Πρόβλεψη επιφανειακής τραχύτητας κατά Arizmendi et al.

Ο Biermann και άλλοι [23] παρουσίασαν ένα σύστημα προσομοίωσης συνδυάζοντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του τεμαχίου με τη γεωμετρική προσομοίωση του φραιζαρίσματος για τον υπολογισμό των ταλαντώσεων κατά την κατεργασία 5-αξόνων (σχήμα 2.14). Επίσης περιέγραψαν μια μέθοδο για τη μοντελοποίηση και την οπτικοποίηση της προκύπτουσας επιφάνειας. Για την επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης κατεργάστηκαν πτερύγια και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της προσομοίωσης.



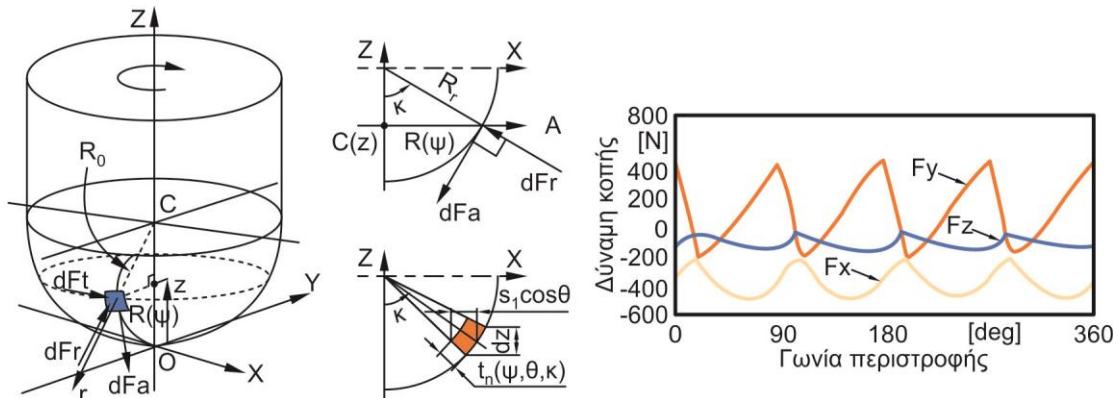
Σχήμα 2.14 Επιφάνεια κατεργασίας 5-αξόνων κατά Biermann et al.

### 2.2.3 Δυνάμεις κοπής

Εκτός από τη μελέτη της επιφάνειας, σημαντικός τομέας ενδιαφέροντος είναι και αυτός των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά τη κατεργασία του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Οι μετρήσεις των δυνάμεων κοπής αφορούν άμεσα τη φθορά του εργαλείου και συμπερασματικά το κόστος παραγωγής και τη ποιότητα της τελικής επιθυμητής επιφάνειας, ιδιαίτερα κατά την κατεργασία υλικών υψηλής σκληρότητας. Κυρίαρχο λόγο στον υπολογισμό των δυνάμεων έχουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αποβλίπτου της κατεργασίας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.

Ο Lee και Altintas [24] παρουσίασαν τη μηχανική του φραιζαρίσματος με ελικοειδές εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Εφαρμόζοντας πειράματα ορθογωνικής κοπής με διάφορες τιμές ταχύτητας κοπής και πρόωσης, μετρήθηκαν οι θεμελιώδεις παράμετροι κοπής, το όριο διαρροής των τάσεων, ο συντελεστής τριβής πάνω στην επιφάνεια αποβλίπτου και η γωνία διάτμησης. Με τη χρήση της μεθόδου πλάγιου μετασχηματισμού και θεωρώντας τη γωνία ροής του αποβλίπτου ίδια με τη γωνία ελίκωσης, υπολογίστηκαν οι παράμετροι της ορθογωνικής κοπής. Η κατανομή της δύναμης στις ελικοειδείς αυλακώσεις του κονδυλιού προβλέπεται με ακρίβεια με τη χρήση της μεθόδου και επαληθεύεται πειραματικά με πειράματα φραιζαρίσματος σφαιρικής απόληξης.

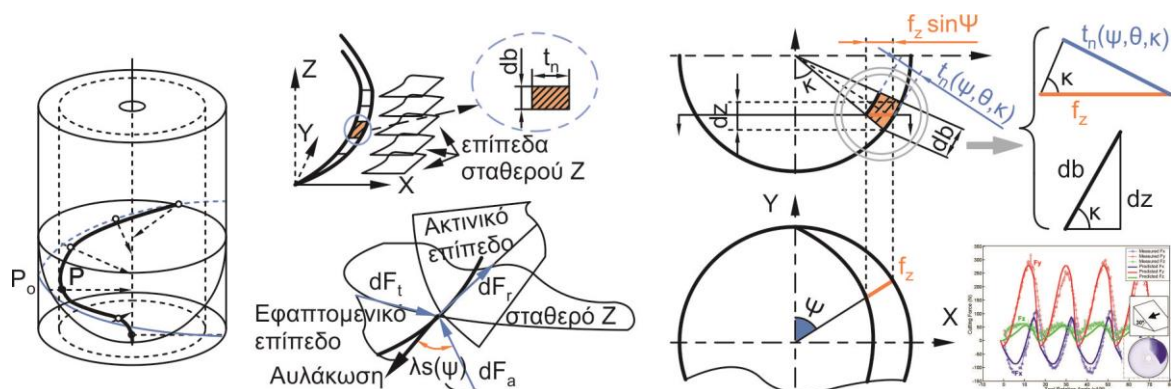
Ο Altintas και Lee [25] αξιολόγησαν τη γεωμετρία του αφαιρούμενου αποβλίπτου εξετάζοντας την κινηματική της κατεργασίας και τις αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις. Οι δυνάμεις κοπής προβλέπονται με ακρίβεια με μετασχηματισμό της γωνίας διάτμησης, της διατμητικής τάσης και της γωνίας τριβής σε μια ορθογωνική βάση δεδομένων πάνω σε πλάγια τμήματα των ελικοειδών αυλακώσεων. Το γενικό μοντέλο που δημιουργήθηκε επιτρέπει την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής, των ταλαντώσεων, των επιφανειακών σφαλμάτων και των αυτοδιεγερόμενων ταλαντώσεων στα ελικοειδούς μορφής κοπτικά εργαλεία. Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 2.15 Μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων κατά Altintas και Lee

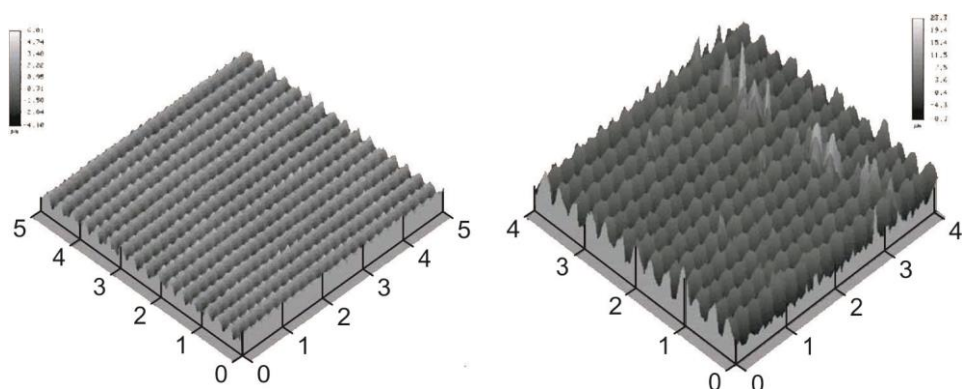
Ο Lamikiz και άλλοι [26] πρότειναν ένα μοντέλο που είναι σε θέση να εκτιμήσει τις δυνάμεις κοπής σε κεκλιμένες επιφάνειες, τόσο σε αντίρροπο, όσο και σε ομόρροπο φραιζάρισμα (σχήμα 2.16). Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που υπολογίζει τις δυνάμεις κοπής βασισμένο σε ένα σύνολο συντελεστών που εξαρτώνται από το υλικό, το εργαλείο, τις συνθήκες κοπής, την κατεύθυνση της κατεργασίας και την κλίση της επιφάνειας. Ένας μετασχηματισμός συντεταγμένων έχει συμπεριληφθεί προκειμένου να εξετάζεται η περίπτωση πλάγιου φραιζαρίσματος με διαφορετικές κατευθύνσεις κοπής. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε δύο υλικά, ένα κράμα αλουμινίου Al7075-T6 και 52 HRC AISI H13 χάλυβα.





Σχήμα 2.16 Υπολογισμός δυνάμεων κοπής κατά Lamikiz et al.

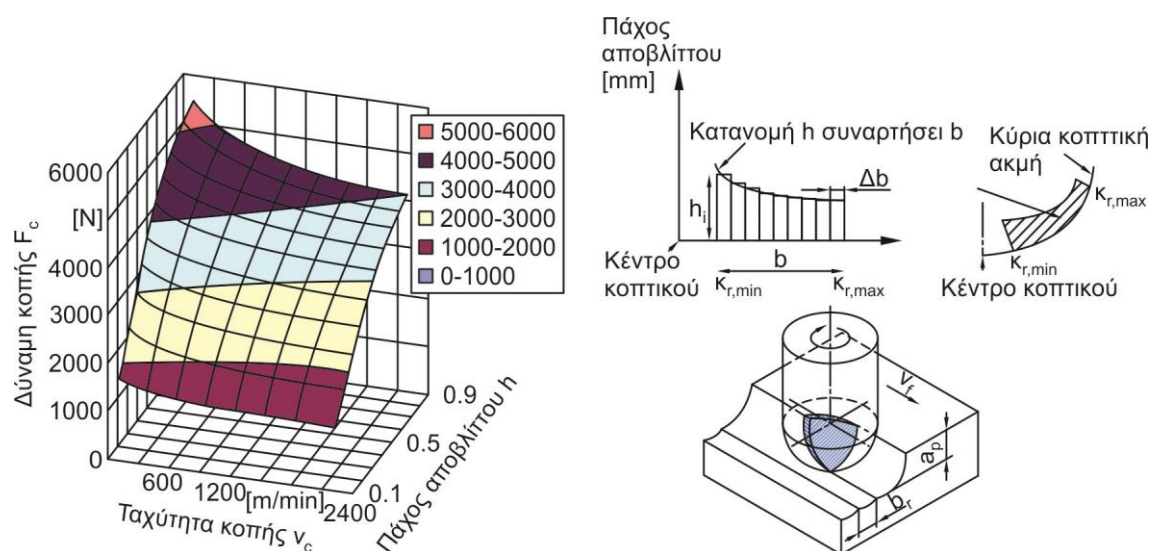
Ο Fan και Loftus [27] χρησιμοποίησαν εργαλεία σφαιρικής απόληξης καρβιδίων στην κατεργασία P20 χάλυβα (HRC 30) ώστε να συσχετίσουν τη δύναμη κοπής με την ποιότητα της επιφάνειας. Η κατεργασία των επιφανειών έγινε με εφαρμογή δύο διαφορετικών στρατηγικών. Η πρώτη στρατηγική κοπής χρησιμοποιεί ένα μοντέλο δύναμης κοπής πάνω στο δοκίμιο, ενώ η άλλη στρατηγική διέπεται από βελτιστοποίηση της πρόωσης, η οποία χρησιμοποιεί τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού ως ανάλογο της δύναμης κοπής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών (σχήμα 2.17) δείχνουν ότι η σταθερή ποιότητας επιφάνεια επιτυγχάνεται όταν οι δυνάμεις κοπής ελέγχονται με την προσαρμογή του ρυθμού πρόωσης. Ακόμη, μια επιθυμητής ποιότητας επιφάνεια μπορεί να επιτευχθεί με έλεγχο της δύναμης κατά έναν προκαθορισμένο τρόπο.



Σχήμα 2.17 Συσχέτιση δύναμης με απορρέουσα επιφάνεια κατά Fan και Loftus

Ο Naserian και άλλοι [28] χρησιμοποίησαν Visual Basic για τη χρήση ACIS γεωμετρικών δεδομένων στον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Το κομμάτι της κοπτικής ακμής που συμμετέχει στην κοπή χωρίστηκε σε μικρά πλάγια τμήματα. Η τριβή, η γωνία διάτμησης και οι διατμητικές τάσεις που προσδιορίζονται από ορθογωνική κοπή ήταν διαθέσιμες από τη βιβλιογραφία.

Ο Karpuschewski και άλλοι [29] ανέπτυξαν ένα μοντέλο δυνάμεων κοπής σε υψηλής ταχύτητας φραιζάρισμα με σφαιρικό εργαλείο κοπής (σχήμα 2.18). Βασισμένο στις θεωρητικές και πειραματικές βάσεις το μοντέλο καταλήγει στον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής ενώ οι συντελεστές του υλικού υπολογίστηκαν πειραματικά.



Σχήμα 2.18 Επίδραση πάχους αποβλίπτου στις δυνάμεις κατά Karpuschewski et al.

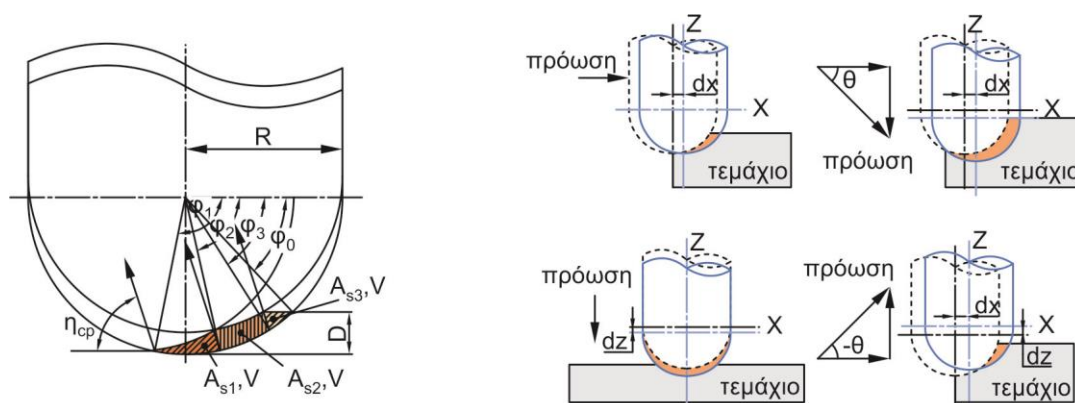
Ο Tsai και Liao [30] περιγράφοντας τις σχέσεις μεταξύ του πάχους अपαραμόρφωτου αποβλίπτου, τη γωνία κλίσης, την ταχύτητα κοπής, το επίπεδο διάτμησης και τη ροή αποβλίπτου στο φραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης πρότειναν ένα γεωμετρικό μοντέλο. Με μετασχηματισμό των πινάκων υπολογίζονται οι τρισδιάστατες δυνάμεις σε οριζόντιες και κάθετες διευθύνσεις για εργαλείο δύο και τεσσάρων κοπτικών ακμών.

Ο Said και άλλοι [31] πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση των δυνάμεων κοπής, τη γεωμετρία του εργαλείου καθώς και τη γεωμετρία του αποβλίπτου σε σχέση με τη φθορά του εργαλείου σφαιρικής απόληξης. Το μοντέλο βασίζεται στις θερμομηχανικά φαινόμενα του πλάγιου φραιζαρίσματος. Η γεωμετρία του φθαρμένου εργαλείου αναλύθηκε σε μια σειρά αξονικών στοιχειωδών ακμών κοπής. Σε οποιοδήποτε ενεργό στοιχείο του δοντιού, υπολογίζεται η φθορά και ο σχηματισμός του αποβλίπτου λαμβάνεται από τη διαδικασία της κοπής σε τοπικά τμήματα απαραμόρφωτου αποβλίπτου και τις τοπικές γωνίες κοπής.

Ο Rivière-Lorphèvre και Filippi [32] ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο αναγνώρισης, που μοντελοποιεί την επίδραση της εκκεντρότητας του εργαλείου στο πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου. Δύο διαφορετικά μοντέλα εκκεντρότητας κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν σε πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε στατικό δυναμόμετρο. Η επάρκεια μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος ήταν αρκετά καλή ώστε να επιτρέπει την αξιόπιστη πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής για διαφορετικές συνθήκες.

Ο Tsai και Liao [33] απεικόνισαν τη τρισδιάστατη γεωμετρική ανάλυση με διαφορετικές σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ της κοπτικής ακμής, του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και της ζώνης διάτμησης κατά μήκος μιας μη οριζόντιας κατεύθυνσης κοπής για την κατασκευή ενός γενικού γεωμετρικού μοντέλου κατεργασίας φραιζαρίσματος σφαιρικής απόληξης υπό κλίση (σχήμα 2.19). Σύμφωνα με την γεωμετρική ανάλυση, η διεύθυνση κοπής διακρίνεται σε οριζόντια, κάθετη, με κλίση προς τα πάνω και με κλίση προς τα κάτω σύμφωνα με την γωνία της πρόωσης. Με το γεωμετρικό μοντέλο που προέκυψε μπορούν να υπολογιστούν οι τρισδιάστατες συνιστώσες της δύναμης κοπής. Η επίδραση της διαφορετικής γωνίας πρόωσης και η γωνία ελίκωσης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα επιβεβαίωσαν το μοντέλο.

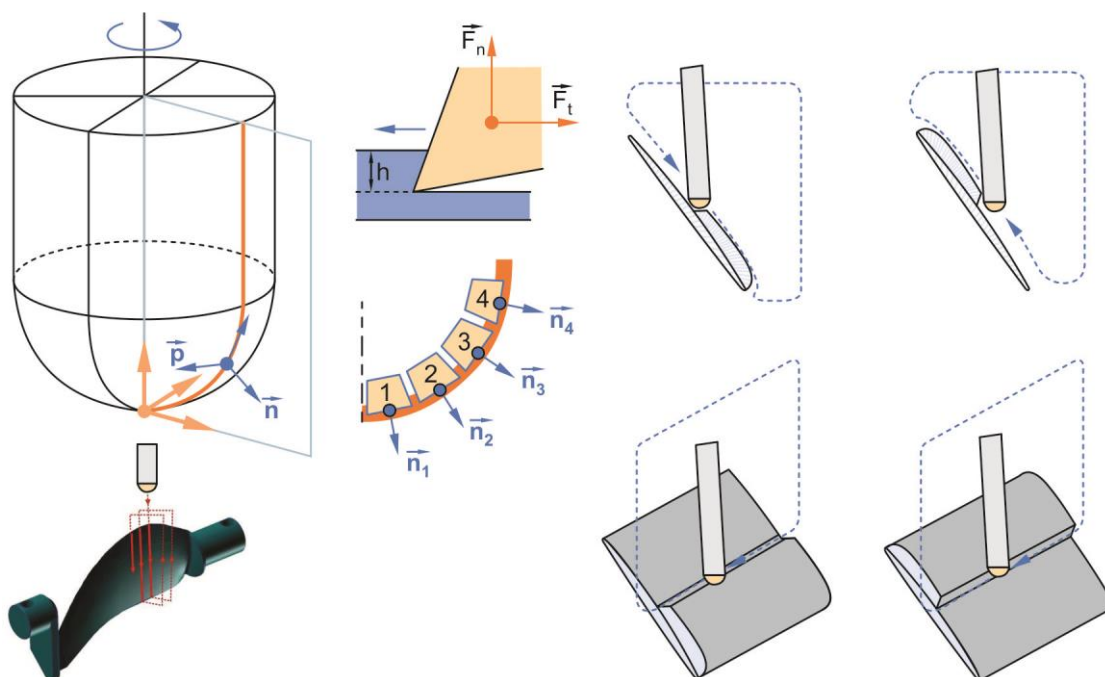
Ο Tukora και Szalay [34] χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο κατάφεραν μέσα από πειράματα να υπολογίσουν τους συντελεστές κοπτικών δυνάμεων και με τη χρήση αυτών τις συνολικές συνιστώσες των δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 2.19 Μέγεθος αποβλίπτου σε διαφορετικές στρατηγικές κατά Tsai και Liao

Ο Subramanian και άλλοι [35] ανέπτυξαν ένα στατιστικό μοντέλο για την πρόβλεψη της δύναμης κοπής με ορίσματα όπως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το αξονικό βάθος κοπής. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο κατεργασίας αλουμινίου Al7075-T6 και εργαλείο με ένθετα πλακίδια καρβιδίων ενώ για το σχεδιασμό των πειραμάτων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία απόκρισης επιφάνειας (RSM). Οι δυνάμεις κοπής μετρήθηκαν με χρήση δυναμόμετρου τριών αξόνων. Η γραφική απεικόνιση βοήθησε στη μελέτη των παραμέτρων της δύναμης κοπής. Ένας γενετικός αλγόριθμος που προγραμματίστηκε σε περιβάλλον MATLAB οδήγησε στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ώστε να αποκτήσει η διαδικασία την ελάχιστη δύναμη κοπής.

Ο Bolsunovsky και άλλοι [36] υπολόγισαν τις δυνάμεις κοπής σε φραιζάρισμα σφαιρικής απόληξης 5-αξόνων χωρίζοντας την καμπύλη γραμμή της κοπτικής ακμής σε τμήματα (σχήμα 2.20). Υπολογίζοντας τις τοπικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε τμήμα και αθροίζοντάς τις, κατέληξαν στη συνολική δύναμη κοπής. Με μια σειρά δοκιμών κοπής συσχέτισαν την επίδραση του προσανατολισμού του εργαλείου και την τιμή της πρόωσης με το εύρος της δύναμης κοπής. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση 5-αξονικής κατεργασίας πτερυγίων στροβίλων.



Σχήμα 2.20 Δυνάμεις κοπής σε διαφορετικές στρατηγικές κατά Bolsunovsky et al.

## 2.3 Μικροκοπή

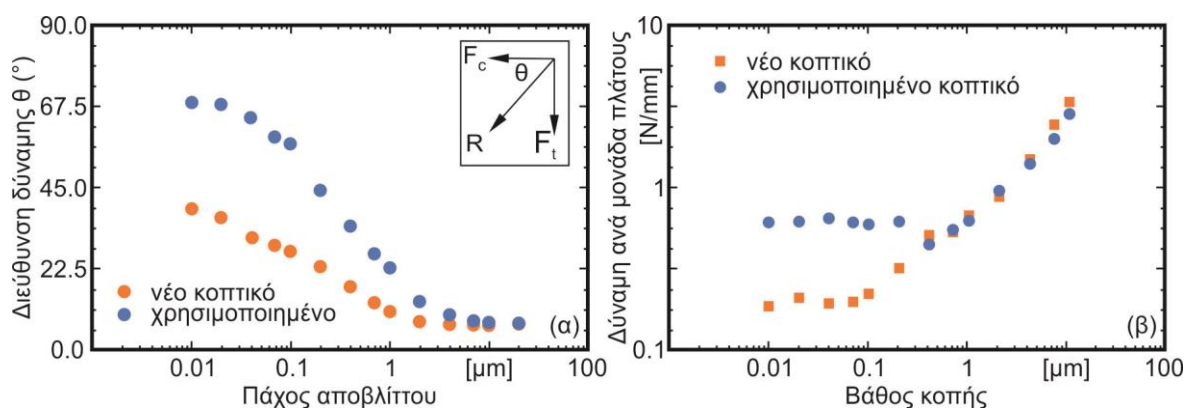
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει σήμερα η έρευνα και η ανάλυση των φαινομένων στη διάσταση της μικρο-κλίμακας καθ' ότι η τεχνολογία πολλές φορές επιβάλλει την κατασκευή μεταλλικών προϊόντων πολύ μικρών διαστάσεων.

Η ομάδα των X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor και K. F. Ehmann [37] δημοσίευσε μια αναλυτική περίληψη των τελευταίων χρόνων που αφορά τις μηχανουργικές κατεργασίες στην τάξη της μικρο-κλίμακας. Οι ερευνητικές εργασίες στον τομέα των μικροκατεργασιών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, σε αυτήν των πειραματικών μελετών και στην κατηγορία των μελετών μοντελοποίησης. Σε συνέχεια των προηγούμενων, οι D. Dornfeld, S. Min και Y. Takeuchi [38] δημοσίευσαν τις πρόσφατες εξελίξεις που παρατηρούνται στις μικροκατεργασίες.

### 2.3.1 Ειδική ενέργεια κοπής

Ο Lucca και άλλοι [39] απέδειξαν πειραματικά ότι η διαδικασία διάτμησης δεν μπορεί να αντιπροσωπεύει το σύνολο της ενέργειας που παρατηρείται κατά την κατεργασία OFHC χαλκού σε μικρές τιμές βάθους κοπής. Αυτοί παρατήρησαν ότι η κατάσταση κατά την οποία το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό (ploughing) και η ελαστική επαναφορά του τεμαχίου πάνω στο πρόσωπο του κοπτικού εργαλείου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά την κατεργασία, καθώς οι τιμές του πάχους του αποβλίττου πλησιάζουν τις τιμές της ακτίνας της κοπτικής ακμής των ένθετων πλακιδίων κοπής. Σημείωσαν επίσης ότι η ειδική ενέργεια κοπής που απαιτείται για την κατεργασία σε πολύ μικρές τιμές πάχους αποβλίττου δεν μπορεί να εξηγηθεί από την ενέργεια που απαιτείται για διάτμηση και για να υπερνικήσει την τριβή στην κλίση του προσώπου του κοπτικού. Η σημαντικότητα της κατάστασης όπου το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό κάτω από αυτές τις συνθήκες χρησιμοποιήθηκε για να εξηγήσει την αύξηση της ενέργειας κοπής.

Αργότερα, ο Lucca και ο Seo [40] εκπόνησαν μια άλλη πειραματική μελέτη για την επίδραση της γεωμετρίας της κοπτικής ακμής ενός μονό-κρυσταλλικού εργαλείου από διαμάντι στο αποτέλεσμα της κοπής, των δυνάμεων διάτμησης και της ειδικής ενέργειας σε υψηλής ακρίβειας ορθογωνική κοπή. Τόσο η ονομαστική γωνία κλίσης, όσο και το προφίλ της κοπτικής ακμής βρέθηκαν να έχουν σημαντική επίδραση στις δυνάμεις και την ενέργεια για εύρος τιμών συνεχούς πάχους αποβλίττου από 20μm έως 10nm. Όταν το πάχος του αποβλίττου προσεγγίζει την τιμή της ακτίνας της ακμής, η ενεργή γωνία κλίσης φαίνεται να καθορίζει τις προκύπτουσες δυνάμεις. Αυτό παρατηρείται κυρίως από τη φορά του διανύσματος της δύναμης που προκύπτει σε σχέση με το πάχος κοπής του αποβλίττου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21(α). Σε μικρές τιμές του πάχους αποβλίττου, η ενεργή γωνία κλίσης υπαγορεύει τη φορά της δύναμης περισσότερο από ότι η ονομαστική.



Σχήμα 2.21 Κατεύθυνση του προκύπτοντος διανύσματος δύναμης και επίδραση της κοπτικής ακμής στη δύναμη πρόωσης κατά Lucca et al.



Ο Lucca και άλλοι [41] εκπόνησαν δοκιμές τόννευσης με εργαλείο από διαμάντι σε ελατό Al 6061-T6. Ερεύνησαν τη μετάβαση από τη διαδικασία διάτμησης στην κατάσταση όπου το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό μελετώντας τη γωνία της προκύπτουσας δύναμης στην ορθογωνική κοπή. Χρησιμοποιώντας εργαλείο διαμαντιού με μετρημένη την ακτίνα της ακμής 200nm, διαπίστωσαν ότι για πάχος συνεχούς αποβλίττου με τιμές μικρότερες της ακτίνας της ακμής, η δύναμη ανά μονάδα πλάτους κατά τη διεύθυνση της διάτμησης αυξάνει γρηγορότερα από ότι η δύναμη ανά μονάδα πλάτους κατά τη διεύθυνση της κοπής. Η φθορά του εργαλείου βρέθηκε να έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις διάτμησης όταν το βάθος κοπής είναι μικρότερο της ακτίνας της κοπτικής ακμής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21(β).

Ο Taminiau και ο Dautzenberg [42] μαρτυρούν επίσης την αύξηση της ενέργειας κοπής κατά την κατεργασία ορείχαλκου με μειωμένο πάχος αποβλίττου. Εξήγαγαν αποτελέσματα τόσο σε εκχόνδριση χρησιμοποιώντας συνηθισμένα εργαλεία με ακτίνα κοπτικής ακμής μεταξύ 50 και 200nm, όσο και σε υψηλής ακρίβειας κοπή, με εργαλείο διαμαντιού ακτίνας ακμής 15μm. Οι συγγραφείς ανακάλυψαν ότι οι ειδικές δυνάμεις κοπής εξαρτώνται μόνο από το λόγο του πάχους του αποβλίττου προς την ακτίνα της κοπτικής ακμής, όταν το πάχος του αποβλίττου είναι μικρότερο της ακτίνας της ακμής. Με βάση τη μετρούμενη ειδική ενέργεια κοπής, εκτιμήθηκε το όριο διατμητικών τάσεων του υλικού κατεργασίας. Η τιμή του ορίου διατμητικών τάσεων σε υψηλής ακρίβειας κοπή βρέθηκε να είναι σχεδόν διπλάσια από τη συνηθισμένη της εκχόνδρισης για το ίδιο υλικό κατεργασίας. Η διαφορά αυτή αποδόθηκε στην παρουσία υψηλότερων τάσεων κατά την κοπή υψηλής ακρίβειας.

### 2.3.2 Δυνάμεις κοπής

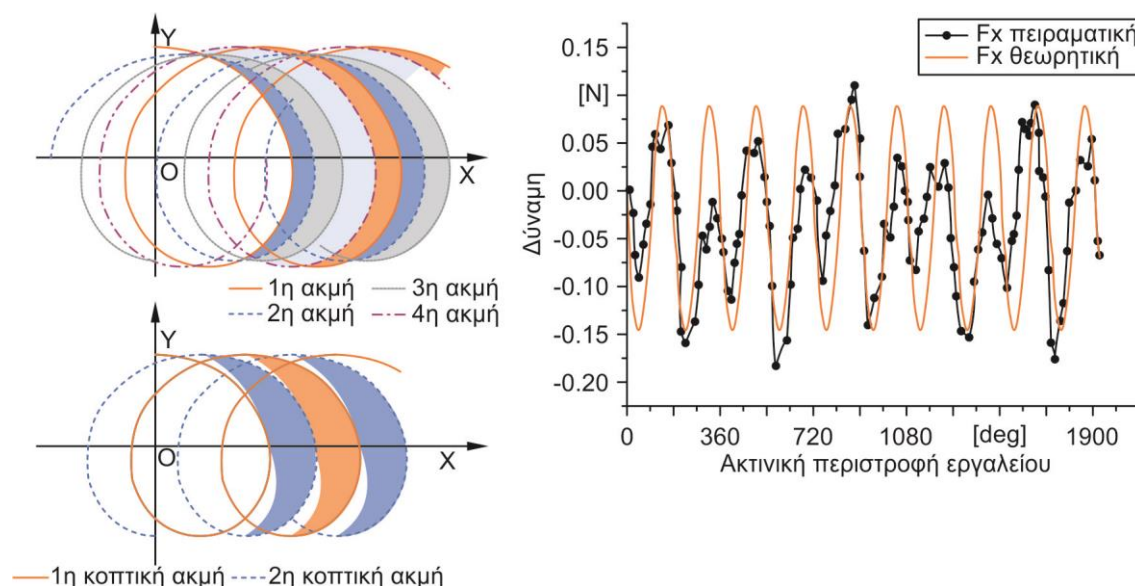
Ο Bao και Tansel [43] παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο για το μικροφραιζάρισμα που υπολογίζει το πάχος αποβλίττου εξετάζοντας την τροχιά του άκρου του εργαλείου καθώς αυτό περιστρέφεται και κινείται συνεχώς προς τα εμπρός. Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής με ακρίβεια για δυσμενείς τιμές του λόγου της πρόωσης ανά δόντι προς την ακτίνα του εργαλείου ( $f_t/r$ ).

Ο Vogler και άλλοι [44] ενσωμάτωσαν την έννοια του ελάχιστου πάχους αποβλίττου προκειμένου να προβλέψουν τις επιδράσεις της ακτίνας της κοπτικής ακμής στις δυνάμεις κοπής. Για τον σκοπό αυτό ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο υπολογισμού της δύναμης σε ένα μοντέλο πλαστικότητας, που εμπεριέχει την ελαστική επαναφορά και το ελάχιστο πάχος αποβλίττου. Επίσης, για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων κοπής χρησιμοποιήθηκε μοντέλο προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία στο επίπεδο της μικροδομής.

Ο Zaman και άλλοι [45] καθόρισαν τη θεωρητική περιοχή του αποβλίττου σε οποιαδήποτε γωνιακή θέση της κοπτικής ακμής του εργαλείου εξετάζοντας τη γεωμετρία της διαδρομής της και συσχετίζοντάς την με την εφαπτομενική δύναμη κοπής. Ένα μεγάλο ποσοστό του προσώπου της έλικας που συμμετέχει στη διαδικασία κοπής διαφοροποιεί το προφίλ της δύναμης από τις συμβατικές κατεργασίες φραιζαρίσματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος του βάθους κοπής προς τη διάμετρο του εργαλείου είναι αρκετά μεγαλύτερος στη μικροκοπή.

Ο Li και άλλοι [46] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης του φραιζαρίσματος για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής στις τρεις διαστάσεις. Λόγω της διακοπτόμενης δημιουργίας αποβλίττου, η διαδικασία φραιζαρίσματος χωρίζεται σε ένα στάδιο ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης και ένα στάδιο σχηματισμού αποβλίττου που διέπονται από την περιστροφή του εργαλείου χωρίς να αφαιρείται υλικό και τις δυνάμεις διάτμησης αντίστοιχα. Με βάση το συνδυασμό της τροχιάς του άκρου του εργαλείου με την εκκεντρότητα και το πάχος του πραγματικού αποβλίττου γίνεται ο υπολογισμός των δυνάμεων. Το σχήμα 2.22 προβάλλει τις τροχιές των κοπτικών ακμών και τις προκύπτουσες δυνάμεις από την ανάλυση του αποβλίττου.





Σχήμα 2.22 Τροχιές κοπτικών ακμών και υπολογισμός αποβλίπτου κατά Li et al.

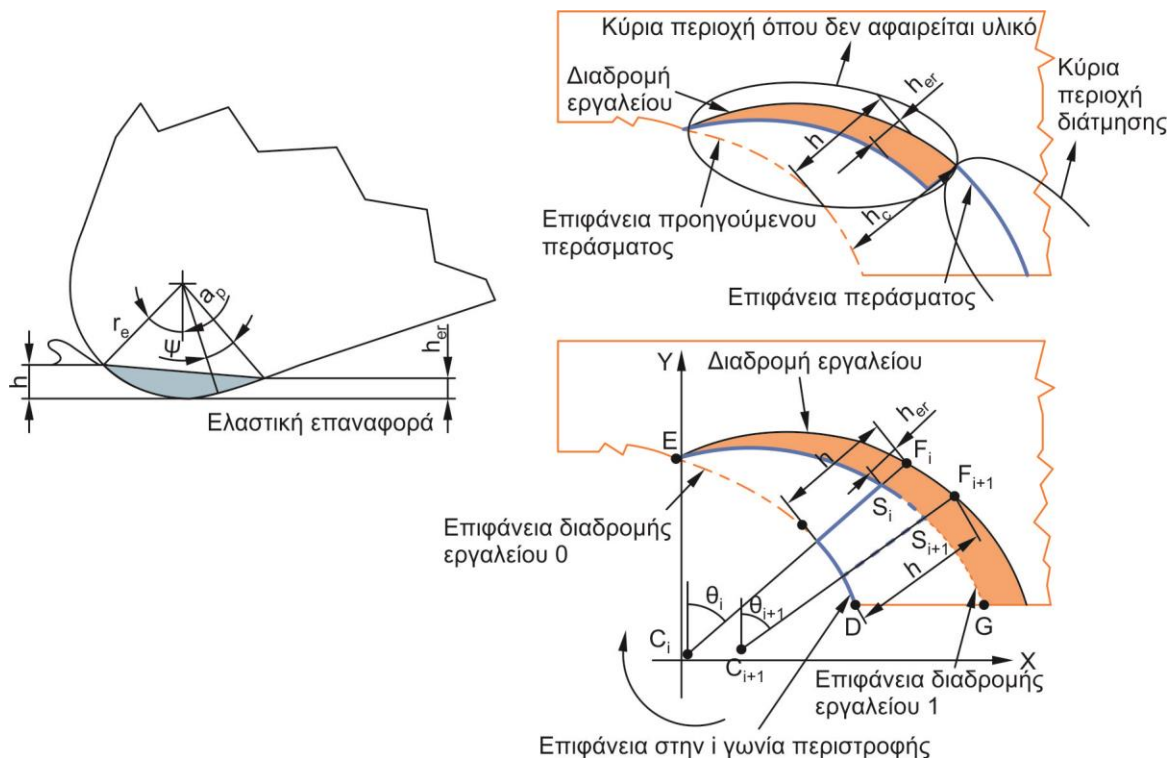
Ο Newby και άλλοι [47] παρουσίασαν ένα εμπειρικό μοντέλο για την ανάλυση των δυνάμεων κοπής. Η προσέγγιση αυτή, σε αντίθεση με τις συνήθεις κατεργασίες κοπής, χρησιμοποιεί υψηλότερη πρόωση ανά δόντι και ακτίνα κοπτικού, καθώς και την τροχιά της διαδρομής του εργαλείου για το σχηματισμό του πάχους του αποβλίπτου σε κατεργασία μικροφραιζαρίσματος. Για τη δημιουργία των εμπειρικών σχέσεων οι δυνάμεις που μετρήθηκαν πειραματικά αναλύθηκαν σε συνιστώσες. Το μοντέλο αυτό βοηθάει περισσότερο στην κατανόηση της τριβής και των δυνάμεων στο μικροφραιζάρισμα.

Ο Kang και άλλοι [48] δημιούργησαν ένα μοντέλο στο οποίο συμπεριέλαβαν την επαφή εργαλείου-τεμαχίου και την ακτίνα της κοπτικής ακμής. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης έγινε με την πραγματοποίηση πειραμάτων πάνω σε ειδικό δυναμόμετρο μικροφραιζαρίσματος.

Ο Bissacco και άλλοι [49] παρουσίασαν ένα θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης της δύναμης κοπής στο μικροφραιζάρισμα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του μεγέθους της ακτίνας ακμής του κοπτικού εργαλείου, της εκκεντρότητας του εργαλείου και της απόκλιση της γωνίας ροής του αποβλίπτου για κεκλιμένη κατεργασία. Με τη χρήση του κανόνα του Stabler προσεγγίζονται οι δυνάμεις κοπής και η εκκεντρότητα αντισταθμίζεται αποτελεσματικά από τις παραμορφώσεις που προκαλούν οι δυνάμεις κοπής.

Ο Park και Malekian [50] εξέτασαν τη διαδικασία διάτμησης και την περιστροφή του κοπτικού χωρίς να αφαιρεί υλικό για την ακριβή πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής μικροφραιζαρίσματος. Η μέθοδος αντιστάθμισης με φίλτρο Kalman χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής με ακρίβεια, ώστε να προσδιοριστούν οι σταθερές κοπής.

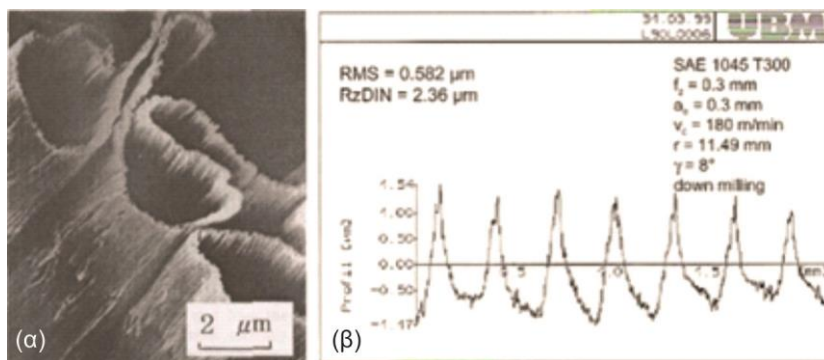
Ο Malekian και άλλοι [51] διερεύνησαν τη μηχανιστική μοντελοποίηση των δυνάμεων μικροφραιζαρίσματος, με την εξέταση των επιπτώσεων της κατάστασης όπου το εργαλείο δεν αφαιρεί υλικό, την ελαστική παραμόρφωση, την εκκεντρότητα και τη δυναμική. Κατά τη μοντελοποίηση της διαδικασίας όπου το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό, το μοντέλο συνυπολογίζει την επίδραση της ελαστικής επαναφοράς και βασίζεται στον παρεμβαλλόμενο όγκο μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται σχηματικά η ελαστική παραμόρφωση και φαινόμενο ολίσθησης.



Σχήμα 2.23 Ελαστική παραμόρφωση και φαινόμενο ολίσθησης κατά Malekian et al.

### 2.3.3 Ελάχιστο πάχος αποβλίπτου

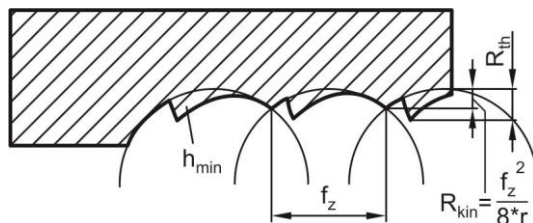
Ο Ikawa και άλλοι [52, 53] ανέφεραν τη σημασία του ελάχιστου πάχους της κοπής, το οποίο ορίστηκε ως το ελάχιστο πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου που αφαιρείται από την επιφάνεια κοπής κατά την τέλεια αφαίρεση μετάλλου. Ένα πολύ λεπτό απόβλιπτο με απαραμόρφωτο πάχος της τάξης των νανομέτρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24(α), προέκυψε από την τόννευση προσώπου ηλεκτρολυτικού χαλκού από ένα ορθώς ορισμένο εργαλείο διαμαντιού με ακτίνα κόψης 10nm.



Σχήμα 2.24 Συνεχές απόβλιπτο κατά Ikawa et al. και προφίλ τραχύτητας κατά Weule et al.

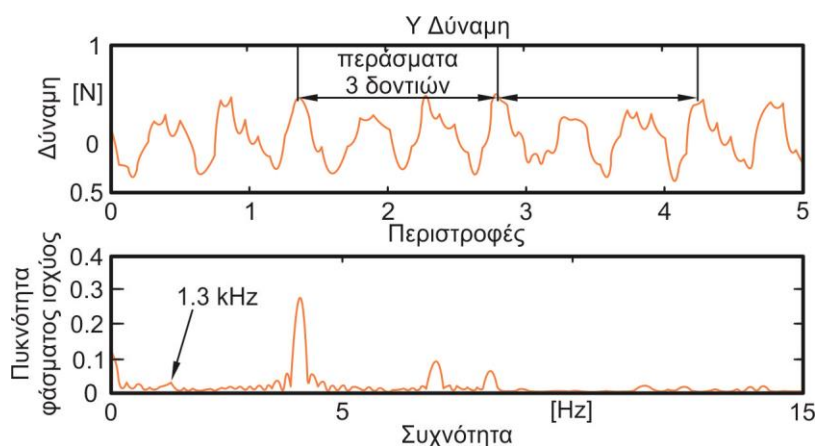
Η επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου παρουσιάζεται επίσης στην κατεργασία του μικροφραιζαρίσματος. Ο Weule και άλλοι [54] ήταν οι πρώτοι που βρήκαν την ύπαρξη του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου και τη σημαντικότητα της επίδρασής του στην απορρέουσα τραχύτητα επιφάνειας στο μικροφραιζάρισμα. Στα πειράματα κοπής που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν καρβίδια βολφραμίου με ακτίνα κοπτικής ακμής 5μm σε SAE 1045 κράμα χάλυβα σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η τοπογραφία της κατεργαζόμενης επιφάνειας μετρήθηκε με συσκευή μέτρησης με λείζερ. Το προφίλ φαίνεται στο σχήμα 2.24(β). Οι συγγραφείς υπέθεσαν ότι η επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου ευθύνεται για το προφίλ της επιφάνειας. Ο λόγος του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου προς την ακτίνα της κόψης στη μικροκατεργασία, εκτιμάται ότι είναι

0.293 [54], τιμή αρκετά μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση της νανομετρικής κοπής με αιχμηρό εργαλείο διαμαντιού (περίπου το 1/10 [52]). Το σχήμα 2.25 αναπαριστά τον σχηματισμό του προφίλ της επιφάνειας συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του ελάχιστου πάχους αποβλίττου. Οι συγγραφείς επισημαίνουν επίσης, ότι όσο μαλακότερο είναι το υλικό τόσο αυξημένη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας. Στην μικροκατεργασία όπου το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό, η αύξηση της τραχύτητας προκαλείται από την ένταση αυτού του φαινομένου, η οποία επηρεάζεται κυρίως από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου. Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πάχος του αποβλίττου εξαρτάται αυστηρά από τις ιδιότητες του υλικού και θεωρούν ότι οι μελλοντικές έρευνες θα βοηθήσουν στην κατανόηση των εσωτερικών σχέσεων μεταξύ του πάχους του αποβλίττου και των ιδιοτήτων του υλικού.



Σχήμα 2.25 Θεωρητικό προφίλ επιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου κατά Weule et al.

Ο Kim και άλλοι [55] πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη ώστε να αποδείξουν την ύπαρξη του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στο μικροφραιζάρισμα. Κατεργάστηκαν αυλακώσεις πλήρους κοπής σε ορείχαλκο χρησιμοποιώντας μικροεργαλείο κονδυλίου 635μm και προώσεις από 0.188μm έως 6μm ανά κοπτική ακμή. Τα απόβλιττα που παρήχθησαν εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM). Οι εικόνες της σάρωσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μήκους, πλάτους και πάχους των αποβλίττων. Οι όγκοι των αποβλίττων εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας τραπεζοειδή αριθμητική ολοκλήρωση και συγκρίθηκαν με τον ονομαστικό όγκο του αποβλίττου για διάφορες τιμές πρόωσης. Διαπιστώθηκε ότι για πολύ μικρές τιμές πρόωσης, η μετρούμενη τιμή του όγκου του αποβλίττου είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ονομαστική, δείχνοντας ότι το απόβλιττο δε δημιουργήθηκε με κάθε πέρασμα του κοπτικού δοντιού. Αυτό διαπιστώνεται ακόμη από την εξέταση της απόστασης μεταξύ των σημείων της πρόωσης που εμφανίζονται πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια. Για μικρή πρόωση, η απόσταση μεταξύ των σημείων της πρόωσης παρουσιάζεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή της πρόωσης ανά δόντι, πράγμα το οποίο καταδεικνύει ότι το απόβλιττο δε δημιουργείται μόνο από ένα πέρασμα του δοντιού.



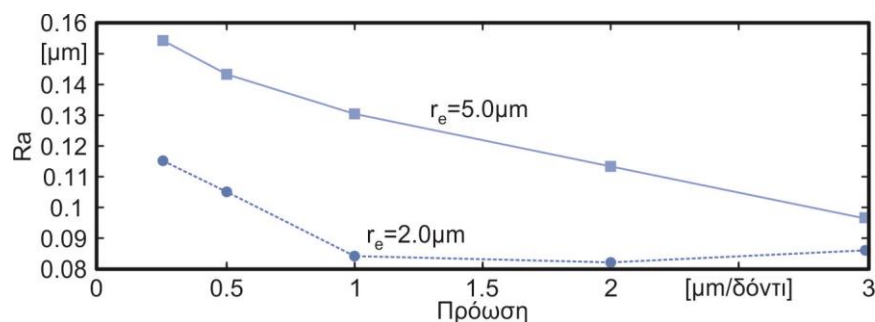
Σχήμα 2.26 Πειραματική δύναμη και αντίστοιχο φάσμα ισχύος κατά Kim et al.

Ο Vogler και άλλοι [56] μελέτησαν πειραματικά την επίδραση του πάχους του αποβλίττου στις δυνάμεις κοπής στο μικροφραιζάρισμα. Το φάσμα συχνοτήτων της δύναμης βρέθηκε

να εμπεριέχει υποαρμονικές συνιστώσες της συχνότητας περάσματος του δοντιού σε τιμές πρόωσης μικρότερες από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.26](#). Αυτή η υποαρμονική συχνότητα απεικονίζεται στο πεδίο του χρόνου σαν μια επαναλαμβανόμενη μορφή κάθε  $n$  ( $n=3$  για τη συγκεκριμένη μελέτη) περάσματα δοντιού. Εξαιτίας αυτής της επίδρασης του ελάχιστου πάχους αποβλίττου, κατά την κατεργασία σε χαμηλές προώσεις, το πάχος αποβλίττου συσσωρεύεται και η δύναμη αυξάνεται για κάθε πέρασμα δοντιού, για  $n$  περάσματα δοντιού μέχρι το πάχος του αποβλίττου να είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο.

#### 2.3.4 Δημιουργία επιφάνειας και σχηματισμός απόληξης (burr)

Η δημιουργία της επιφάνειας στο μικροφραιζάρισμα μελετήθηκε από τον Vogler και άλλους [57]. Η τραχύτητα της κάτω επιφάνειας ενός αυλακιού μετρήθηκε με τη χρήση οπτικού προφίλομέτρου Wyko. Η επιφανειακή τραχύτητα βρέθηκε να είναι αρκετά επηρεασμένη από την ακτίνα της κοπτικής ακμής. Το [σχήμα 2.27](#) παρουσιάζει ότι η επιφανειακή τραχύτητα που δημιουργήθηκε από ακτίνα ακμής  $5\mu\text{m}$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή ενός εργαλείου με ακτίνα  $2\mu\text{m}$ . Καθώς η πρόωση μειώνεται σε συγκεκριμένη τιμή, η επιφανειακή τραχύτητα αρχίζει να αυξάνει, συμπεραίνοντας ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή πρόωσης για την οποία επιτυγχάνεται η μικρότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας.



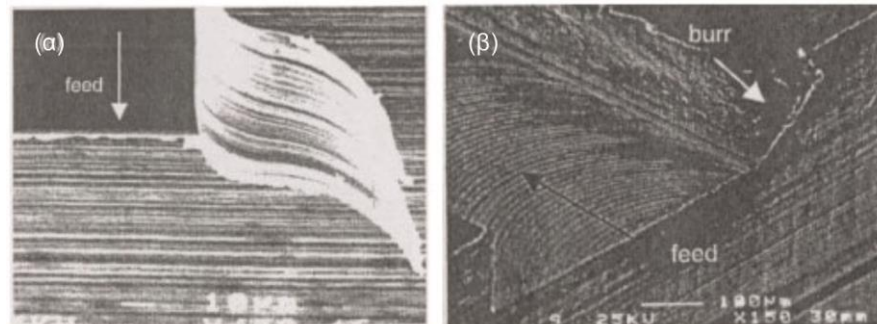
Σχήμα 2.27 Επίδραση κοπτικής ακμής στην επιφανειακή τραχύτητα περλίτη κατά Vogler et al.

Ο Domazo και άλλοι [58] έκαναν μια σύνοψη ορισμένων χαρακτηριστικών σε κατεργασίες χρησιμοποιώντας κονδύλια διαμέτρου  $200\mu\text{m}$ . Ανέφεραν ότι ο σχηματισμός της απόληξης ήταν ένας μεγάλος φραγμός στο ελάχιστο μέγεθος του τοιχώματος που μπορεί να κατεργαστεί. Τα υλικά κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αλουμίνιο, ορείχαλκος, χυτοσίδηρος, χάλυβας με πρόσμιξη χαλκού και σκληροχάλυβας. Στα τεμάχια έγινε επιτυχώς η κατεργασία πάχους τοιχώματος  $25.4\mu\text{m}$  με  $305\mu\text{m}$  ύψος.

Οι πειραματικές μελέτες των Lee και Dornfeld [59] έδωσαν αποτελέσματα για τον σχηματισμό της μικροαπόληξης στο φραιζάρισμα αλουμινίου 6061-T6 και χαλκού 110. Μια ποικιλία διαφορετικών αποβλίττων και βαθών κοπής εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας εργαλεία διαμέτρων 127, 254 και  $635\mu\text{m}$ . Τα αποτελέσματα μετρήθηκαν ποιοτικά με SEM και παρατηρήθηκαν διαφορετικοί τύποι σχηματισμού απόληξης σε μικροφραιζάρισμα με κλασσικές συνθήκες φραιζαρίσματος. Στο μικροφραιζάρισμα αλουμινίου και χαλκού παρατηρήθηκαν απολήξεις μορφής σημαίας, ανατροπής, κυματιστές και τραχείς απολήξεις. Η απόληξη ανατροπής στην είσοδο του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και οι απολήξεις σημαίας στην έξοδο του εργαλείου, όπως φαίνονται στο [σχήμα 2.28](#), βρέθηκε ότι είναι αναλογικά μεγαλύτερες από την παραδοσιακή διαδικασία φραιζαρίσματος συμπεριλαμβανομένου του λόγου του μεγέθους της απόληξης προς το απόβλιττο. Οι συγγραφείς απέδωσαν αυτή τη διαφορά στη χαμηλή ταχύτητα κοπής και στον λόγο της μεγάλης ακτίνας της κοπτικής ακμής προς το απόβλιττο στο μικροφραιζάρισμα. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής η κάμψη του αποβλίττου κυριαρχεί περισσότερο από τη θραύση. Καθώς η κοπτική ακμή εξέρχεται από το τεμάχιο, το απόβλιττο περιστρέφεται πάνω της σχηματίζοντας απολήξεις. Επιπλέον, η υψηλή τιμή του



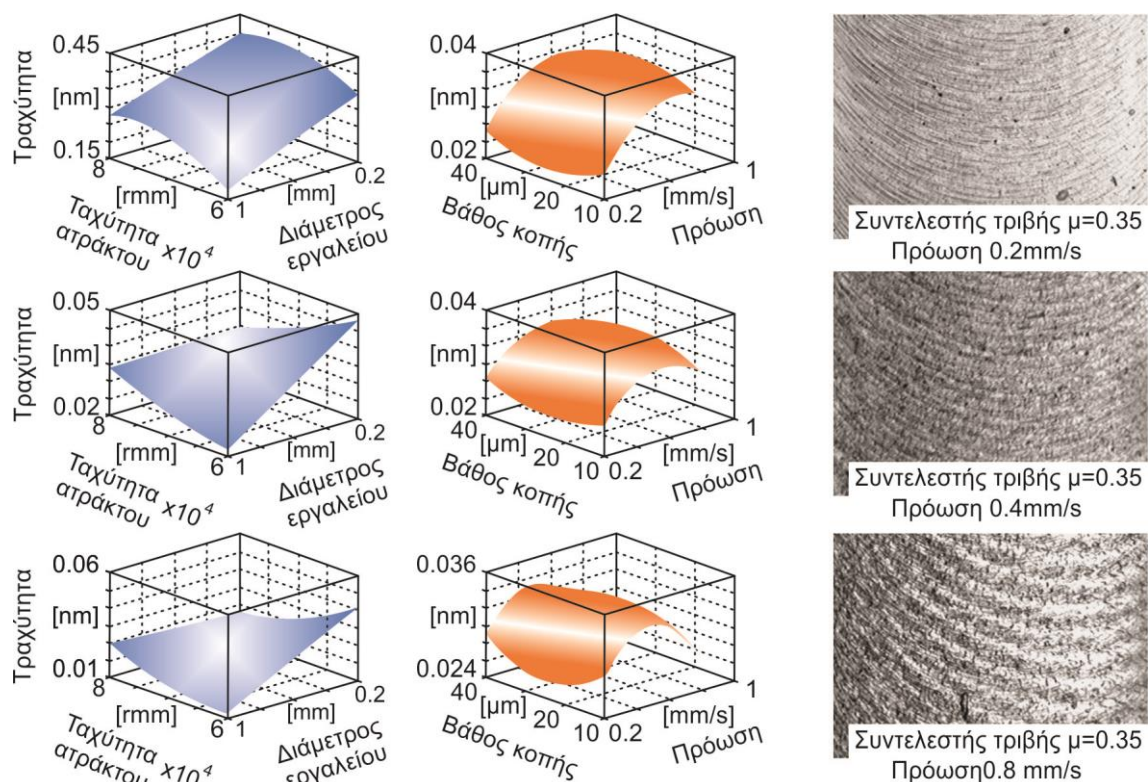
λόγου της ακτίνας της κοπτικής ακμής του εργαλείου προς το απόβλιπτο προκαλεί τριβή και συμπίεση αντί για κοπή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερων απολήξεων. Επισημαίνεται επίσης ότι στο αντίρροπο φραιζάρισμα δημιουργούνται μικρότερες πλευρικές απολήξεις από ότι στο ομόρροπο. Καθώς η πρόωση και το βάθος κοπής αυξάνουν, μέσα στο υπό μελέτη εύρος τιμών, το μέγεθος των απολήξεων φαίνεται να αυξάνει.



Σχήμα 2.28 Δημιουργία απόληξης στο μικροφραιζάρισμα: (α) τύπου σημαίας στην έξοδο του εργαλείου και (β) τύπου ανατροπής στην είσοδο του εργαλείου κατά Lee και Dornfeld

### 2.3.5 Επιφανειακή τραχύτητα

Ο Wang και άλλοι [60] παρουσίασαν την επίδραση που έχουν οι συνθήκες κοπής στην τραχύτητα της επιφάνειας στο μικροφραιζάρισμα με κονδύλι μικρού μεγέθους. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η ταχύτητα της ατράκτου, η πρόωση, το βάθος κοπής και η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου. Στο [σχήμα 2.29](#) παρουσιάζονται οι επιδράσεις των συνθηκών κοπής στην επιφανειακή τραχύτητα σύμφωνα με τα πειράματα που εκτελέστηκαν.

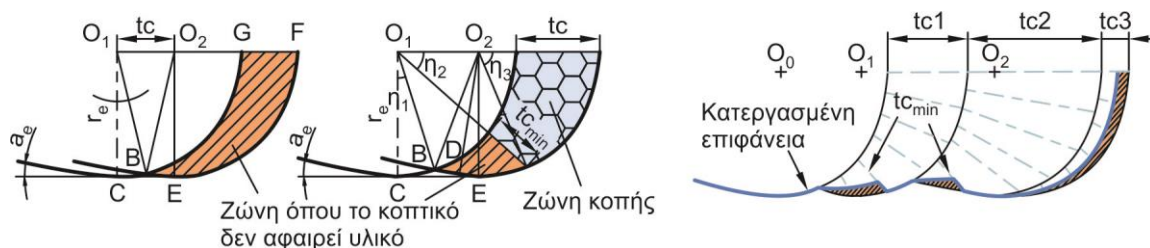


Σχήμα 2.29 Επιφανειακή τραχύτητα στο μικροφραιζάρισμα κατά Wang et al.

Ο Wang και άλλοι [61] ερεύνησαν την επίδραση των διαφορετικών ειδών κόκκων σε

τεμάχια κατεργασίας με ανισότροπων υλικών στο πεδίο της μικροδιάστασης. Σε αυτήν την έρευνα, τα φυσικά χαρακτηριστικά των διαφόρων κόκκων, ειδικά ο συντελεστής τριβής και το μέτρο ελαστικότητας, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία σχηματισμού αποβλίπτου και στη δημιουργία της επιφάνειας. Τα απόβλιττα προκύπτουν συχνά ασυνεχή λόγω της επίδρασης των ορίων των κόκκων. Μέσω πειραμάτων μικροκοπής τα αποτελέσματα της επιφάνειας συσχετίζονται πολύ καλά με τη θεωρητική ανάλυση.

Ο Liu και άλλοι [62] ανέπτυξαν ένα μοντέλο που περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας επιφάνειας σε μικροφραιζάρισμα (σχήμα 2.30). Το μοντέλο δημιουργίας επιφάνειας για πλευρικά τοιχώματα και επίπεδες επιφάνειες αποτελείται από ντετερμινιστικά και στοχαστικά μοντέλα. Στο μοντέλο δημιουργίας πλευρικού τοιχώματος, το ντετερμινιστικό μοντέλο χαρακτηρίζει την επιφανειακή τοπομορφία που παράγεται από τη σχετική κίνηση μεταξύ της κοπτικής ακμής και του υλικού του τεμαχίου. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της κινηματικής διαδικασίας, τη δυναμική συμπεριφορά και ελαττώματα της διαδικασίας όπως είναι η εκκεντρότητα του εργαλείου. Το στοχαστικό μοντέλο προβλέπει την αυξανόμενη επιφανειακή τραχύτητα από την κατάσταση που το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό εξαιτίας της επίδρασης της ακτίνας της ακμής του εργαλείου. Ως προς τη δημιουργία επιφάνειας, το ντετερμινιστικό μοντέλο χαρακτηρίζει την τρισδιάστατη τοπομορφία της επιφάνειας και εκτιμά τα αποτελέσματα του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου, της ελαστικής επαναφοράς και της εγκάρσιας ταλάντωσης. Η διακύμανση της κατάστασης όπου δεν κόβει το εργαλείο εκτιμάται από το στοχαστικό μοντέλο. Στη συνέχεια της έρευνάς τους [63] εκτέλεσαν πειράματα με τιμές προώσεων από 0.25 – 12μm/δόντι χρησιμοποιώντας δύο εργαλεία διαφορετικής ακτίνας ακμής (3μm και 2μm) και επίπεδα εκκεντρότητας (2μm και 3μm) για τη διερεύνηση του πλευρικού τοιχώματος και της επίπεδης επιφάνειας.



Σχήμα 2.30 Επίδραση φαινομένων στο μικροφραιζάρισμα κατά Liu et al.

### 2.3.6 Θερμοκρασία κοπής, ζωή εργαλείου, εσωτερικές ρωγμές, ολκιμότητα

Η θερμοκρασία της κοπής σε τórνευση με διαμάντι μελετήθηκε από τον Iwata και άλλους [64]. Εξαιτίας της χαμηλής ενέργειας κοπής όπως επίσης και της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του διαμαντιού και του υλικού κατεργασίας, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός, η θερμοκρασία κοπής είναι αρκετά μικρή σε σύγκριση με την παραδοσιακή κοπή. Παρ' όλα αυτά, μια μικρή θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εργαλείο πιθανώς προκαλεί την επιμήκυνση του στελέχους του εργαλείου και στην περιστροφή χειροτερεύει την ακρίβεια της κατεργασίας [65].

Ο Tansel και οι συνεργάτες του [66, 67] μελέτησαν το φαινόμενο της φθοράς στη διαδικασία του μικροφραιζαρίσματος. Βρήκαν ότι, αντίθετα από αυτό που ισχύει στα μεγέθη της μάκρο-κλίμακας, το εργαλείο δε φθείρεται προοδευτικά μέχρι να προκαλεί ανεπιθύμητα φαινόμενα στην επιφάνεια, αλλά το εργαλείο σπάει γρήγορα μόλις φθαρεί. Η θραύση των μικρο-κονδυλίων οφείλεται στις αυξημένες δυνάμεις κοπής με την άμβλυνση των κοπτικών ακμών να προκαλεί τάσεις που υπερβαίνουν τη δύναμη των μικρών διαμέτρου κονδυλίων.

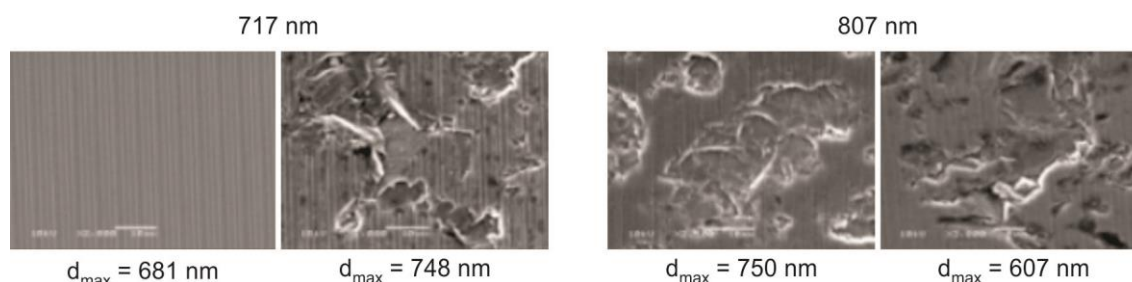
Σε υψηλής ακρίβειας κατεργασίες, η μεγάλη αρνητική γωνία αποβλίπτου και η έντονη παρουσία του φαινομένου όπου το εργαλείο περιστρέφεται χωρίς να κόβει δημιουργεί σημαντική καταστροφή κάτω από την επιφάνεια. Ο Lucca και άλλοι [68] μελέτησαν



πειραματικά το βάθος του επιπέδου πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του τεμαχίου σε κατεργασία ορθογωνικής κοπής υψηλής ακρίβειας στο επίπεδο τιμών του πάχους αποβλίπτου από 0.01-10μm. Δύο εργαλεία με την ίδια ονομαστική γεωμετρία αλλά με διαφορετικές γεωμετρικές κοπτικές ακμής χρησιμοποιήθηκαν. Οι γεωμετρικές των κοπτικών ακμών χαρακτηρίστηκαν από μικροσκοπιο ατομικής δύναμης (AFM). Το βάθος του επιπέδου πλαστικής παραμόρφωσης φάνηκε ανεπηρέαστο από το πάχος του αποβλίπτου αλλά ισχυρά επηρεασμένο από την ακτίνα της κοπτικής ακμής.

Αρκετοί ερευνητές έχουν εξετάσει την κατεργασιμότητα πυριτίου και γερμανίου. Κάτω από ένα κρίσιμο πάχος αποβλίπτου, βρέθηκε ότι η πλαστική παραμόρφωση υπερισχύει της θραύσης. Διαπιστώθηκε ότι το κρίσιμο πάχος αποβλίπτου αυξάνει για μεγαλύτερες αρνητικές γωνίες αποβλίπτου [69, 70]. Ο Inchida [71] καθόρισε ότι αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής αυξάνεται το πάχος αποβλίπτου για κατεργασία πυριτίου. Ο Kaji και άλλοι [72] επισήμαναν ότι ο πιο συνήθης τρόπος να διακρίνουν την παρουσία θραύσης (οπτική παρατήρηση της νέο-κατεργασμένης επιφάνειας) ίσως να μην είναι επαρκής διότι εσωτερικά ραγίσματα αναπτύσσονται σε κατώτερο επίπεδο πριν εμφανιστεί η ρωγμή στην επιφάνεια.

Ο Arefin και άλλοι [73] διεξήγαγαν μια μελέτη για να διερευνήσουν την επίδραση των συνθηκών κοπής και της ακτίνας της κόψης για την κοπή σε νάνο-κλίμακα ελατών δίσκων πυριτίου χρησιμοποιώντας εργαλείο μονοκρυσταλλικού διαμαντιού με ακτίνα κόψης από 23nm έως 807nm. Οι κατεργαζόμενες επιφάνειες εξετάστηκαν κάτω από SEM (σχήμα 2.31). Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η ακτίνα της κόψης πρέπει να είναι μικρότερη από το άνω όριο και το πάχος αποβλίπτου πρέπει να είναι μικρότερο από την ακτίνα της.



Σχήμα 2.31 SEM φωτογραφίες κατεργαζόμενου πυριτίου για διαφορετικά μέγιστα πάχη αποβλίπτου  $d_{\max}$  και διαφορετικές τιμές ακτίνας ακμής κατά Arefin et al.

### 2.3.7 Σταθερό σημείο πύκνωσης

Η επίδραση του μεγέθους και το φαινόμενο του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου στις μικροκατεργασίες, έχουν ως αποτέλεσμα την περιστροφή του εργαλείου χωρίς αφαίρεση υλικού και γι αυτό, το υλικό και η ελαστική παραμόρφωση πάνω στη στρογγυλεμένη κόψη διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις διεργασίες κοπής. Επομένως, είναι χρήσιμο να εξεταστεί το πως παραμορφώνεται το υλικό στις περιοχές της κόψης.

Πολλοί ερευνητές, συμπεριλαμβανομένου των Albrecht [74] και Manjunathaiah και Endres [75], παρατήρησαν την ύπαρξη ενός σταθερού σημείου πάνω στην ακτίνα της κόψης όπου μηδενίζεται η επαπτομενική ταχύτητα του υλικού κατεργασίας. Άλλοι ερευνητές [76, 77] πιστεύουν ότι εκεί βρίσκεται ένα σταθερό σημείο πύκνωσης (build-up), γνωστό ως νεκρό όριο του μετάλλου, προσκολλημένο στο εργαλείο, το οποίο είναι σταθερό καθώς επιτυγχάνεται σταθερή κατάσταση. Ο Waldorf και άλλοι [78] έκαναν μια σύγκριση για να ορίσουν ποια πλευρά της ροής του υλικού στην περιοχή της κοπτικής ακμής είναι πιο κατάλληλη να εξηγήσει τη δύναμη στην κατάσταση όπου το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό κατά την κατεργασία αλουμινίου 6061-T6. Το μοντέλο που ενσωματώνει την υπόθεση του σταθερού σημείου πύκνωσης, ήταν αυτό που ταίριαζε περισσότερο. Ο Kountanya και Endres [79] διεξήγαγαν μια υψηλής μεγέθυνσης οπτική μελέτη σε μικρο-

ορθογωνική κοπή χρησιμοποιώντας εργαλείο μίας κόψης. Παρατήρησαν τη δημιουργία μιας σταθερής πύκνωσης κατά την κατεργασία ορείχαλκου όπως στο σχήμα 2.14(β). Επίσης παρατήρησαν ότι αυτό το σημείο πύκνωσης δε δημιουργείται κατά την κατεργασία ψευδαργύρου.

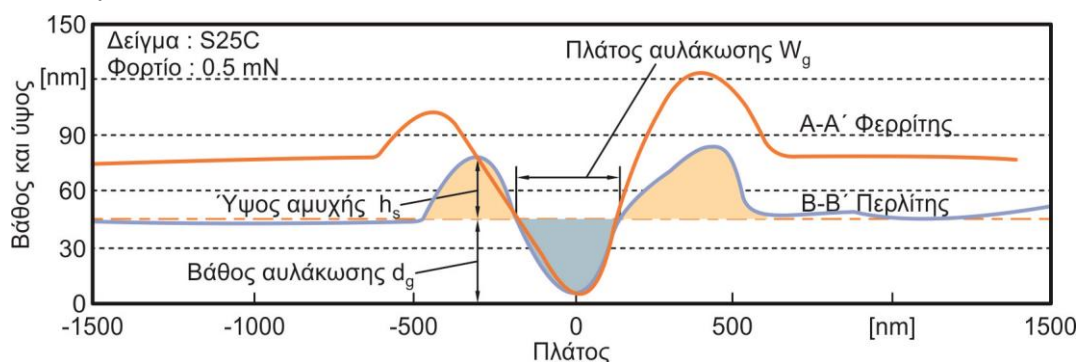
Ο Weule και άλλοι [54] διεξήγαγαν κοπή με ένα κοπτικό δόντι σε SAE 1045 χάλυβα υπό διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Εξετάζοντας την ακμή του εργαλείου μετά από κάθε πείραμα, βρήκαν ότι το σημείο πύκνωσης εμφανίζεται σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής πράγμα το οποίο οδηγεί σε φτωχές επιφάνειες φινιρίσματος. Αυτές οι μελέτες προτείνουν ότι η παρουσία ή απουσία της σταθερής πύκνωσης καθορίζεται, τόσο από το υλικό του τεμαχίου, όσο και από τις συνθήκες κοπής και ιδιαίτερα την ταχύτητα περιστροφής η οποία επηρεάζει ισχυρά τις συνθήκες τριβής μεταξύ τεμαχίου και κοπτικής ακμής μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία κοπής, την τάση και το όριο διαρροής.

### 2.3.8 Ελαστοπλαστική παραμόρφωση

Εξαιτίας του φαινομένου του ελάχιστου πάχους αποβλίπτου, οι μικροκατεργασίες επηρεάζονται από δύο μηχανισμούς, την κατάσταση σταθερής αφαίρεσης του αποβλίπτου και την κατάσταση όπου το εργαλείο περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό. Η έκταση της δεύτερης κατάστασης και η φύση της παραμόρφωσης κατά τη διάρκειά της συνεισφέρει αισθητά στη δημιουργία απόληξης [59] και στην αντίστοιχη αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας [57]. Για το σκοπό της ακριβούς μοντελοποίησης της διαδικασίας μικροκοπής, είναι σημαντική η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την ποσοτικοποίηση της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού. Πειράματα αμυχής δείχνουν ότι αποτελούν σημαντικό εργαλείο προσδιορισμού της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης των υλικών. Δεδομένου ότι η διαδικασία αμυχής μοιάζει της μικροκοπής, τα πειράματα αμυχής βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης στη μικροκοπή.

Ο Jardret και άλλοι [80] έκαναν πειράματα αμυχής με τη χρήση ειδικών οργάνων σε μεγάλη ποικιλία υλικών, από πολυμερή μέχρι μέταλλα, ώστε να καταλάβουν και να χαρακτηρίσουν την ελαστική παραμόρφωση των υλικών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αμυχής. Όλα τα πειράματα έγιναν με εργαλείο εσοχής Berkovich. Η 3D μορφολογία που δημιουργήθηκε, μετρήθηκε με τη χρήση 3D SURFASCAN. Παρατηρήθηκε ότι η συνήθης μορφολογία παρουσιάζει ένα αυλάκι με δύο σχηματισμούς σωρών γύρω του. Οι σχέσεις της ελαστικής επαναφοράς και της πλαστικής παραμόρφωσης υπολογίστηκαν βάση της μορφολογίας κατά την κατεργασία της εσοχής. Οι συγγραφείς ανακάλυψαν ότι η σχέση της πλαστικής παραμόρφωσης αυξάνει με το μέτρο ελαστικότητας του Young ( $E$ ) στη σκληρότητα ( $H$ ) με αναλογία  $E/H$  για τα πολυμερή και για τα μέταλλα.

Ο Taniyama και άλλοι [81] έκαναν επίσης πειράματα αμυχών σε JIS S25C χάλυβα με εργαλείο τριγωνικής πυραμίδας από διαμάντι κάτω από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εκπομπής πεδίου (FE-SEM) με σκοπό την απόδειξη της επίδρασης της ετερογένειας του υλικού κατά τη μικροκοπή. Τα αυλάκια των αμυχών συγκρίθηκαν σε διαφορετικές φάσεις. Το σχήμα 2.32 δείχνει τα διασταυρωμένα προφίλ αμυχών σε φερρίτη και περλίτη.



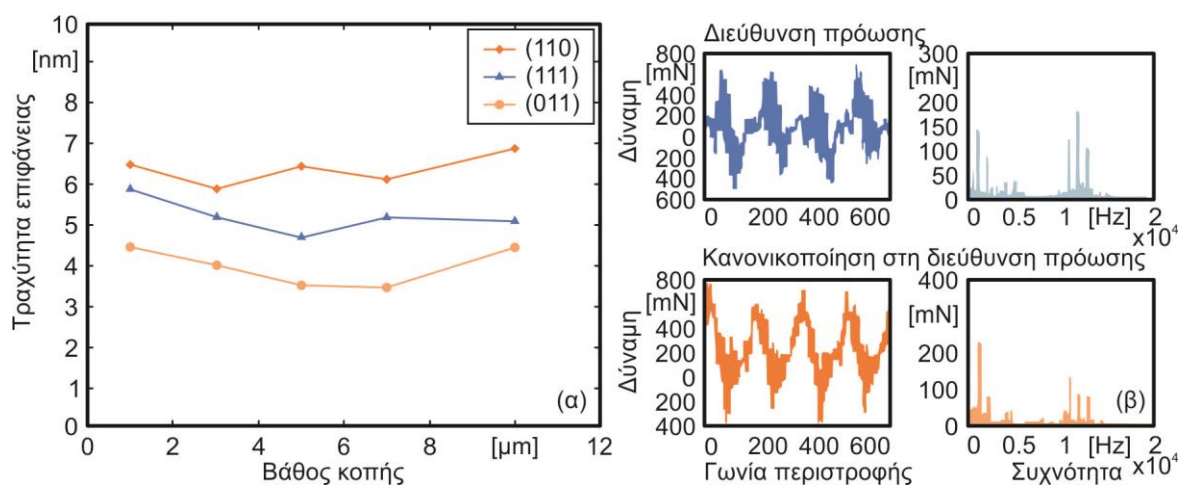
Σχήμα 2.32 Ανάγλυφο διατομής αυλακιού αιχμής κατά Taniyama et al.

### 2.3.9 Επίδρασεις μικροδομής

Στις κατεργασίες υψηλής ακρίβειας, είναι σύνηθες ένα τυπικό βάθος κοπής κάποιων μικρόμετρων. Με τόσο μικρό βάθος κοπής, η δημιουργία του αποβλίττου γίνεται μέσα σε μεμονωμένους κόκκους του πολυκρυσταλλικού υλικού. Σε προηγούμενες εργασίες μελετήθηκε η επίδραση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού στον μηχανισμό δημιουργίας του αποβλίττου [82, 83], στη δημιουργία της επιφάνειας [83, 84], και η μεταβολή των δυνάμεων κοπής [82, 83, 85, 86].

Ο Moriawaki και άλλοι [82] εφάρμοσαν τοπικά πειράματα εντός ενός SEM σε μονοκρυσταλλικό χαλκό, με διάφορες διευθύνσεις κοπής και σε βάθη από 0.1  $\mu\text{m}$  έως 5  $\mu\text{m}$  και ταχύτητα κοπής 120 mm/min. Εντοπίστηκε ότι ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός επηρεάζει τη διαδικασία δημιουργίας αποβλίττου σε όρους του μεγέθους της γωνίας διάτμησης και των δυνάμεων κοπής. Η γωνία διάτμησης βρέθηκε να παίρνει υψηλές τιμές όπως 60°. Ο Ueda και Iwata [83] διερεύνησαν την επίδραση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού σε διαδικασία κοπής ορείχαλκου με διαμάντι. Παρατήρησαν μια δομή φύλλου ελάσματος πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του αποβλίττου και ανέφεραν τη δημιουργία ασυνεχούς αποβλίττου σε ένα συγκεκριμένο εύρος κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Με αλλαγές στον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις της γωνίας διάτμησης από 15° έως 60°. Οι δυνάμεις κοπής και οι τιμές της επιφανειακής τραχύτητας διαπιστώθηκε ότι εξαρτώνται από την ανισοτροπία του υλικού.

Ο Το και άλλοι [84] διεξήγαγαν πειράματα τόννευσης με διαμάντι μονοκρυσταλλικών ράβδων αλουμινίου με κανονικοποιημένους κρυσταλλογραφικούς άξονες στο  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ , και  $\langle 111 \rangle$  επίπεδο χρησιμοποιώντας εργαλείο με 0° γωνία αποβλίττου και 5° γωνία ελευθερίας. Το βάθος κοπής κυμαίνεται από 1 έως 10  $\mu\text{m}$ . Συνεχής δημιουργία αποβλίττου παρατηρήθηκε κάτω από όλες τις συνθήκες κοπής. Ανέφεραν ότι η υψηλότερη δύναμη παράχθηκε για  $\{110\}$  κρυσταλλικό προσανατολισμό ενώ η χαμηλότερη για  $\{111\}$ . Παρατηρήθηκε επίσης ότι το καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας προκύπτει για κατεργασία κρυστάλλων με  $\{100\}$  επίπεδα, ενώ αντίθετα στα  $\{110\}$  επίπεδα βρίσκεται η μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα λόγω των υψηλών δυνάμεων κοπής και του μεγάλου μεγέθους των διακυμάνσεων της δύναμης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η επιφανειακή τραχύτητα επηρεάζεται ουσιαστικά από τον κρυσταλλικό προσανατολισμό, αλλά όχι σημαντικά από το βάθος κοπής στο εξεταζόμενο εύρος των πειραμάτων. Το [σχήμα 2.33\(α\)](#) δείχνει τα αποτελέσματα του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού και του βάθους κοπής πάνω στην τραχύτητα επιφάνειας.



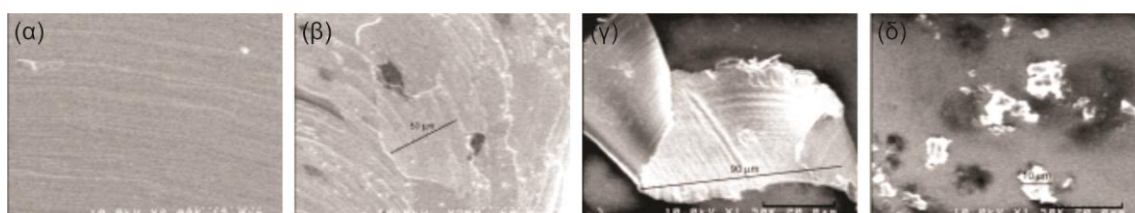
Σχήμα 2.33 Επίδραση κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού κατά Το et al. και πειραματικές δυνάμεις μικροφραιζαρίσματος κατά Vogler et al.

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της πολυφασικής μικροδομής στο

σύστημα δυνάμεων της διαδικασίας μικροφραιζαρίσματος, ο Vogler και άλλοι [56] πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων αυλακώσεων φραιζαρίσματος με διάμετρο 500μm, με κονδύλια καρβιδίου δύο κόψεων, τόσο σε μονοφασικό φερρίτη και περλίτη, όσο και σε πολυφασικό ελατό σίδηρο. Το [σχήμα 2.33\(β\)](#) παρουσιάζει τις πειραματικές δυνάμεις κοπής και το φάσμα συχνοτήτων τους όταν κατεργάζονται 50% περλιτικό ελατό σίδηρο σε 30.000rpm ταχύτητα περιστροφής και 2μm/δόντι πρόωση. Εκτός από την ενέργεια στη συχνότητα της ατράκτου (500Hz), τη συχνότητα περάσματος του δοντιού (1000Hz), και τις αρμονικές τους, υπάρχει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας της μεταβολής της δύναμης γύρω στα 12kHz. Για ταχύτητα κοπής 48m/min παραγόμενη από 30.000rpm ταχύτητα περιστροφής, συχνότητα 12kHz αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 65.4μm. Αυτή η τιμή είναι εξαιρετικά κοντά στο μέσο όρο της απόστασης των κόκκων φερρίτη σε 70μm. Το φάσμα της δύναμης κοπής για κατεργασία μονοφασικού φερρίτη και περλίτη εμφανίζει μηδανική ενέργεια σε συχνότητες πάνω από 10kHz. Η παρουσία των συνιστωσών υψηλής συχνότητας σε πειράματα ελατού σιδήρου, αλλά όχι σε πειράματα φερρίτη και περλίτη, σηματοδοτεί ότι αυτές οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας οφείλονται στην πολυφασική μικροδομή.

Επιπροσθέτως της διακύμανσης της δύναμης κοπής, μελετήθηκε επίσης από τον Vogler και άλλους [57] η επίδραση της πολυφασικής μορφής του υλικού στη δημιουργία της επιφάνειας. Οι τιμές της τραχύτητας (Ra) για πολυφασικό ελατό σίδηρο είναι μεγαλύτερες από εκείνες ενός μονοφασικού υλικού για τις εξεταζόμενες συνθήκες κοπής. Η αυξανόμενη επιφανειακή τραχύτητα οφείλεται στη διακοπτόμενη δημιουργία του αποβλίπτου που συμβαίνει καθώς η κοπτική ακμή κινείται μεταξύ των περιοχών διαφορετικών φάσεων. Αυτή η υπόθεση εξαρτάται από το φάσμα συχνοτήτων της καθορισμένης επιφάνειας. Για φερρίτη και περλίτη, το φάσμα ισχύος είναι σχετικά επίπεδο και αρκετά μικρότερο σε μέγεθος από ότι το φάσμα επιφάνειας του ελατού σιδήρου. Στην περίπτωση των δειγμάτων ελατού σιδήρου, υπάρχουν αξιοσημείωτες κορυφές (picks) στην ενέργεια στο φάσμα γύρω από το μήκος κύματος των 55 και 67μm για φερριτικό και περλιτικό ελατό σίδηρο αντίστοιχα. Αυτά τα μήκη κύματος του δείγματος ελατού σιδήρου είναι κοντά στο μέσο της απόστασης της φάσης των 50 και 70μm και αυτό ως αποτέλεσμα δείχνει ότι ορισμένα φαινόμενα σχηματίζονται στα όρια των φάσεων.

Για πιο λεπτομερή μελέτη των ορίων φάσης, εξετάστηκε με SEM το κάτω μέρος των αυλακώσεων, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.34](#). Για το κάτω επίπεδο της αυλάκωσης φερρίτη ([Σχήμα 2.34\(α\)](#)), η επιφάνεια φαίνεται σχετικά λεία και χωρίς πολλά σημάδια από την επίδραση του μεγέθους των κόκκων. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση του φερριτικού ελατού σιδήρου ([Σχήμα 2.34\(β\)](#)), υπάρχουν κάποιες μικροσκοπικές απολήξεις που έχουν σχηματιστεί σε αποστάσεις που είναι συγκρίσιμες με τις αποστάσεις μεταξύ των ορίων των κόκκων (λευκές γραμμές στο σχήμα). Μια πιθανή εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά στα όρια φάσης, είναι ότι η δημιουργία αποβλίπτου δεν είναι συνεχής καθώς η κόψη κινείται από την μία φάση στην άλλη. Καθώς η κόψη κινείται ανάμεσα στις φάσεις, η διαδικασία δημιουργίας αποβλίπτου διαταράσσεται καθώς το εργαλείο εξέρχεται μιας φάσης στο όριο του κόκκου και σχηματίζεται απόληξη στο όριο της φάσης. Προκειμένου να συγκεντρωθούν δεδομένα που αποδεικνύουν την παραπάνω υπόθεση, συγκεντρώθηκαν απόβλιττα και εξετάστηκαν με SEM όπως στο [σχήμα 2.34](#). Καθώς τα απόβλιττα φερρίτη ([σχήμα 2.34\(γ\)](#)) φαίνονται συνεχή, τα απόβλιττα φερριτικού ελατού σιδήρου ([σχήμα 2.34\(δ\)](#)) σχηματίζονται σε μικρού μεγέθους κομμάτια, υποδηλώνοντας την ασυνεχή/διακοπτόμενη φύση της διαδικασίας δημιουργίας αποβλίπτου.



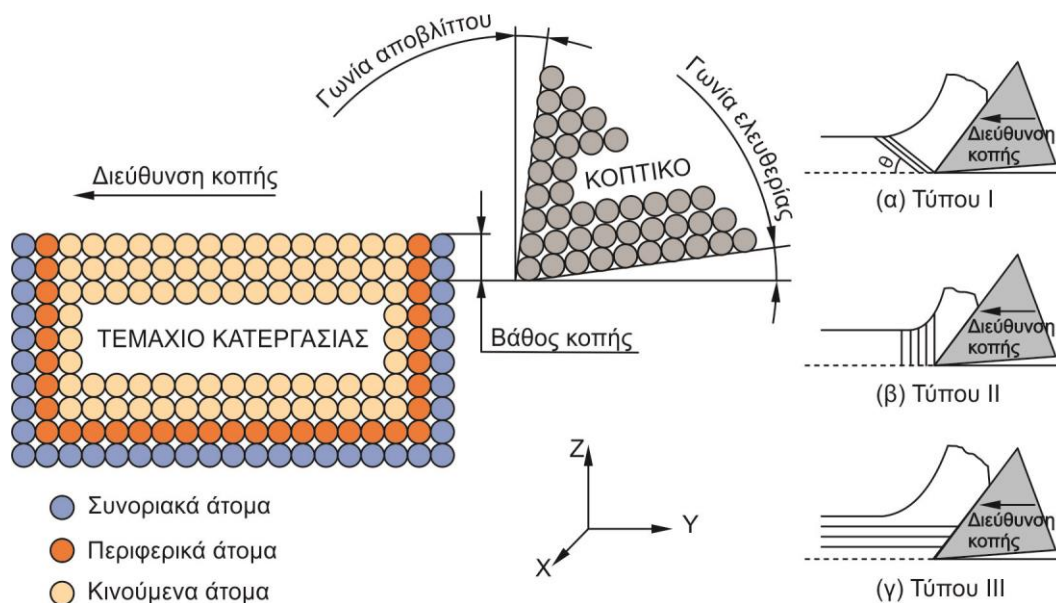
Σχήμα 2.34 Επιφάνεια και απόβλιττα κοπής κατά Vogler et al.



### 2.3.10 MD προσομοίωση σε νανομετρική κοπή

Η εφαρμογή της μοριακής δυναμικής (MD) προσομοίωσης στις κατεργασίες άρχισε από την ερευνητική ομάδα στο Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) στα τέλη του 1980 [87]. Η MD προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της κοπής σε νανόμετρα χαλκού με εργαλείο διαμαντιού [88]. Αυτή η δουλειά οδήγησε τους άλλους ερευνητές στην εξερεύνηση και επέκταση της MD προσομοίωσης της νανομετρικής κοπής σε πολλές πρακτικές εφαρμογές κατεργασιών.

Ο Ikawa και άλλοι [89] μελέτησαν τη 2D νανομετρική κοπή χαλκού με εργαλείο διαμαντιού. Ανακάλυψαν την επίδραση της ακτίνας της κόψης και του ελάχιστου πάχους κοπής στη διαδικασία παραγωγής αποβλίττου και επισήμαναν ότι όταν το πάχος αποβλίττου είναι μικρότερο από το κλάσμα της ακτίνας κόψης, το απόβλιττο δεν μπορεί να απομονωθεί από το τεμάχιο. Σύμφωνα με αυτό, οι παραγόμενες επιφάνειες δεν είναι λείες αλλά ατομικά σταδιακές. Ο Shimada και άλλοι [90] διεξήγαν MD προσομοίωση για να καθορίσουν την τελική κατεργασμένη ποιότητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται στην τόννευση χαλκού με διαμάντι με πολύ καλή κοπτική ακμή κάτω από υποθετικά τέλεια μηχανική κίνηση. Βασισμένοι στις αναλύσεις, έδειξαν ότι το ελάχιστο πάχος μιας κόψης μπορεί να είναι από 1nm ή μικρότερο, που είναι, 1/20 με 1/10 της ακτίνας της ακμής μιας πραγματικά διαθέσιμης καλής κοπτικής ακμής. Η τελική τραχύτητα και το βάθος του παραμορφωμένου επιπέδου της κατεργασμένης επιφάνειας βρέθηκαν να αυξάνουν με την αύξηση της ακτίνας της ακμής του εργαλείου.



Σχήμα 2.35 Μοντέλο MD προσομοίωσης νανομετρικής κοπής κατά Komanduri et al.

Ο Komanduri και άλλοι [91-93] ανέφεραν ανεπάρκεια στη δυνατότητα μοντελοποίησης και μέτρησης της απαιτούμενης κλίμακας ώστε να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της κοπής στη νανοκλίμακα. Για να εξομαλύνουν αυτό το πρόβλημα ανέπτυξαν ένα MD μοντέλο για κοπή σε νανοκλίμακα. Το σχήμα 2.35 είναι μια σχετική αναπαράσταση του MD μοντέλου προσομοίωσης μονοκρυσταλλικής κοπής αλουμινίου για τη διερεύνηση της επίδρασης του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού και της διεύθυνσης της κοπής. Καθώς δεν εκτελείται κανένα πείραμα, μπορούν να παρατηρήσουν τρεις διακριτούς τύπους (τύπος I, II, III) της κίνησης εξάρθρωσης όταν προσομοιώνουν μονοκρυσταλλικό αλουμίνιο σε διάφορους προσανατολισμούς (σχήμα 2.35):

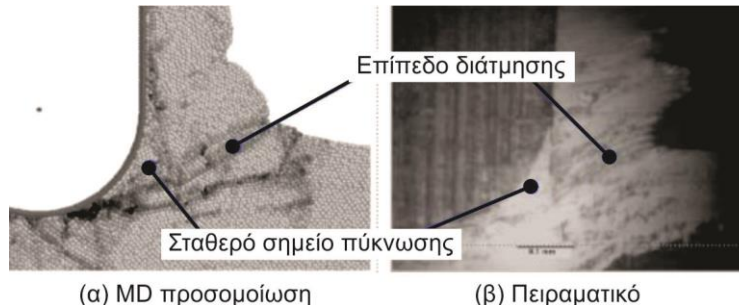
1. Όταν κατεργάζεται η  $[-1\ 1\ 0]$  διεύθυνση πάνω σε  $(111)$  επίπεδο, η δημιουργία του αποβλίττου φαίνεται να προκύπτει εξαιτίας της διάτμησης και της συμπίεσης μπροστά από το εργαλείο.

2. Όταν κατεργάζεται η  $[0\ 0\ 1]$  διεύθυνση πάνω σε  $(110)$  επίπεδο, η εξάρθρωση δημιουργείται κανονικά στη διεύθυνση της κοπής.
3. Όταν κατεργάζεται η  $[-1\ 1\ 0]$  διεύθυνση πάνω σε  $(001)$  επίπεδο, η εξάρθρωση δημιουργείται παράλληλα στη διεύθυνση της κοπής.

Για τους τρεις τύπους, η δύναμη κοπής είναι η μικρότερη για τον τύπο I και η μεγαλύτερη για τον τύπο II.

### 2.3.11 MD προσομοίωση στη μικροκατεργασία

Οι MD προσομοιώσεις απευθύνονται κυρίως στη νανομετρική κοπή και όχι σε όλο το εύρος της μικροκοπής. Παρ' όλα αυτά ο μηχανισμός της κοπής αποκάλυψε ότι μοιράζονται κάποιες ομοιότητες μικροκοπής. Στο [94], οι συγγραφείς συνέκριναν τη ροή του υλικού που απέκτησαν από την προσομοίωση MD προσομοίωση με αποτελέσματα από πειράματα που διεξήχθησαν από τους Kountanya και Endres [79]. Παρατηρήθηκε μια ξεκάθαρη συσχέτιση μεταξύ της MD προσομοίωσης της ροής του υλικού και του πραγματικού πειραματικού αποτελέσματος. Η γεωμετρία της τριγωνικής σταθεράς συσσώρευσης και η ζώνη διάτμησης που προβλέφθηκε από τη MD προσομοίωση είναι όμοιες με αυτές των πειραμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.36. Περαιτέρω, η MD προσομοίωση και το μοντέλο πλαστικότητας λεπτής γραμμής, που αναπτύχθηκε από τον Waldorf και άλλους [76], συνδυάστηκαν για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής για διαφορετικά βάθη κοπής. Τα αποτελέσματα της MD προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν γεωμετρικές παράμετροι, όπως η γωνία διάτμησης. Οι προβλεπόμενες δυνάμεις κοπής κανονικοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα μικροκοπής. Υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση στην τάση των κανονικοποιημένων δυνάμεων, με τα δεδομένα να δείχνουν την ύπαρξη ενός τοπικού μεγίστου στην δύναμη της ώθησης σε σχέση με το πάχος αποβλίπτου.



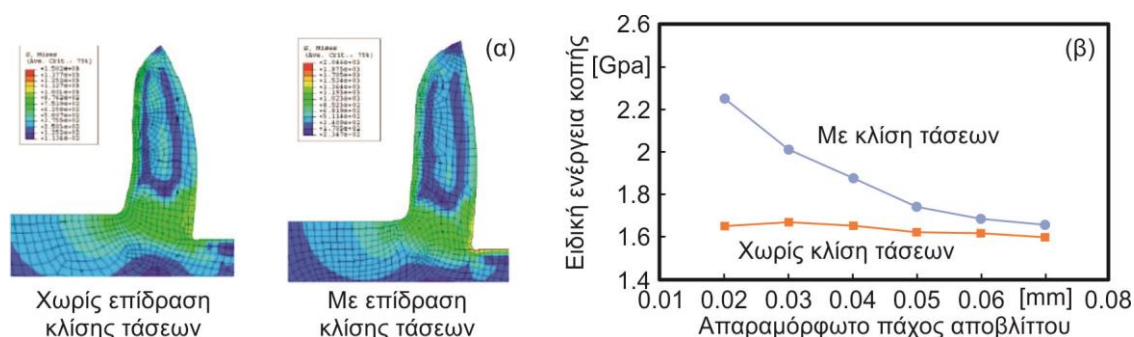
Σχήμα 2.36 Ροή υλικού γύρω από την ακτίνα κοπτικής ακμής κατά Liu et al.

### 2.3.12 Ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Ο Moriwaki και άλλοι [95] ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της διαδικασίας κοπής ικανό να μοντελοποιήσει τις θερμομηχανολογικές ιδιότητες του τεμαχίου κατά την κοπή με ακίνητης ακμής εργαλείο. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των τάσεων, των πιέσεων, της ροής του υλικού, της ροής θερμότητας, και τη θερμοκρασιακή μεταβολή εντός του τεμαχίου και του εργαλείου σε ορθογωνική μικροκοπή χαλκού. Είδαν ότι στη συγκεκριμένη κοπή οι ενέργειες της ώθησης αυξάνουν καθώς ο λόγος της ακτίνας ακμής του εργαλείου προς το βάθος κοπής μειώνεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κατανομής των τάσεων αποκαλύπτουν ότι η επηρεασμένη ζώνη στο τεμάχιο επεκτείνεται καθώς ο λόγος της ακτίνας της ακμής προς το βάθος κοπής αυξάνεται. Οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες κοπής βρέθηκαν να αυξάνουν με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Η θερμοκρασία κοπής είναι περίπου 270K υψηλότερη από τη μέση θερμοκρασία του τεμαχίου όταν ο χαλκός κόβεται με ταχύτητα κοπής 4.3m/s και βάθος κοπής 1μm. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο τεμάχιο γίνεται μεγαλύτερη μπροστά στην κοπτική ακμή εξαιτίας της ροής του υλικού σε σχέση με το κοπτικό εργαλείο.



Επιπλέον, στην ακτίνα της ακόψης, ο Dinesh και άλλοι [96] πρότειναν ότι η κλίση των τάσεων μπορεί να αποτελεί μεγάλο αίτιο της επίδρασης του μεγέθους στις μικροκατεργασίες αφού η κλίση των τάσεων στις κατεργασίες είναι πολύ έντονη. Ο Liu και Melkote [97] παρουσίασαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο στην κλίση των τάσεων για ορθογωνική κοπή ώστε να προβλέψουν την επίδραση του μεγέθους στη μικροκοπή. Η κλίση των τάσεων οδηγεί σε υψηλή ενεργή πίεση στις ζώνες παραμόρφωσης, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη ειδική ενέργεια κοπής με μειωμένο πάχος αποβλίπτου. Τα περιγράμματα των ενεργών πιέσεων, που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.37(α), δείχνουν ότι η μέγιστη ενεργή πίεση είναι υψηλότερη με την επίδραση της κλίσης των τάσεων από ότι χωρίς αυτή. Το σχήμα 2.37(β) συγκρίνει την προβλεπόμενη ειδική ενέργεια κοπής έναντι του πάχους του αποβλίπτου με και χωρίς την επίδραση της κλίσης των τάσεων. Η ειδική ενέργεια κοπής που προβλέπεται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κλίσης των τάσεων αυξάνει με έναν μη γραμμικό τρόπο διαμόρφωσης σχεδόν 40% όταν το πάχος αποβλίπτου μικραίνει από 50 σε 20  $\mu\text{m}$ . Αυτή η αυξητική τάση της ειδικής ενέργειας κοπής, όσο το πάχος του αποβλίπτου μειώνεται, συμφωνεί απόλυτα με τα πειραματικά αποτελέσματα των Korpalinsky και Oxley [98].



Σχήμα 2.37 Ενεργή τάση και ειδική ενέργεια κοπής κατά Liu και Melkote

Ο Chuzhoy και άλλοι [99] ανέπτυξαν ένα μοντέλο FE για ορθογωνική κατεργασία ελατού σιδήρου. Αυτή είναι η πρώτη δημοσίευση κατεργασίας στην άμεση μοντελοποίηση των διαφόρων φάσεων του σιδήρου – φερριτικού και περλιτικού – με μοντέλα διαφορετικής σύστασης που αντιπροσωπεύουν την ετερογένεια του υλικού του τεμαχίου. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού πιέσεων, τάσεων, θερμοκρασίας και φθοράς. Μπορεί επίσης να προβλέψει το μέγεθος της θραύσης και των ζωνών ασυνέχειας για κατεργασία ελατού σιδήρου. Η εργασία αυτή έδειξε τη δυνατότητα εντοπισμό της θραύσης μεταξύ των φάσεων στην κατεργασία πολυφασικού ελατού σιδήρου. Ο Vogler και άλλοι [57] χρησιμοποίησαν το μοντέλο του Chuzhoy ώστε να καθορίσουν την ελάχιστη τιμή του πάχους αποβλίπτου για περλίτη και φερρίτη, στο οποίο συμπεριέλαβαν την επίδραση του υλικού στο ελάχιστο πάχος αποβλίπτου. Η ολκιμότητα του υλικού φάνηκε να έχει τη σημαντικότερη επίδραση στο ελάχιστο πάχος αποβλίπτου. Ο περισσότερος ελατός φερρίτης βρέθηκε να έχει μεγαλύτερο πάχος αποβλίπτου από τον περλίτη.

Με σκοπό τη διερεύνηση των διαφορών μεταξύ του μηχανισμού κοπής σε νανοκλίμακα και μικρο-κλίμακα, ο Inamura και άλλοι [100] εισήγαγαν μια μέθοδο μετασχηματισμού από ένα ατομικό MD μοντέλο νανομετρικής κοπής σε ένα ισοδύναμο συνεχές FEM μοντέλο για να εκτιμήσουν την πίεση και τη μεταβολή των τάσεων στη νανομετρική κοπή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πίεση/μεταβολή της τάσης κατά τη νανομετρική κοπή δεν μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία της πλαστικότητας στη μακροκλίμακα. Η κλίμακα μήκους της μικροκατεργασίας εμπίπτει, τόσο στη νανομετρική κοπή, όσο και στη μακροκατεργασία. Η μηχανική της μικροκατεργασίας εγγενώς έχει τα χαρακτηριστικά και των δύο. Η μηχανική σε διαφορετικές κλίμακες μήκους επιδρά έντονα στην παραγωγή της παρατηρούμενης συμπεριφοράς. Για παράδειγμα, η δημιουργία μικροαπόλξης στις οριακές φάσεις ίσως περιγράφεται καλύτερα στη νανοκλίμακα με MD προσομοίωση, ενώ η πίεση και η μεταβολή των τάσεων εντός των κόκκων ή σε μακρινό πεδίο του τεμαχίου

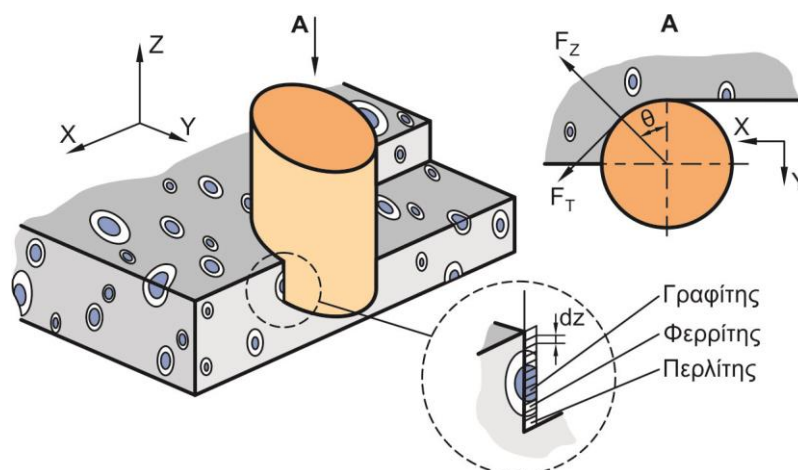
αναπαριστάται ακριβώς με τον συνεχή μηχανισμό της μακροκλίμακας μέσω FE μοντελοποίησης.

### 2.3.13 Πολυδιάστατη προσομοίωση

Στα [101, 102], ο Abraham, ο Broughton, και οι συνεργάτες τους ανέπτυξαν μια μεθοδολογία όπου παντρεύουν τις διαφορετικού μεγέθους κλίμακες από συνεχείς (μακροκλίμακα) έως στατικές (ατομική κλίμακα) σε κβαντικά μηχανικές (κλίμακα ηλεκτρονίων) εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο που είναι ικανός να συμφωνεί μεταξύ FEM, MD και ημιεμπειρικούς σφιχτούς δεσμούς. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται επιτυχώς στη μελέτη διάδοσης ρωγμών σε πυρίτιο. Ο Lidorikis και άλλοι [103] χρησιμοποίησαν μια υβριδική προσέγγιση MD και FEM προσομοίωσης στη μελέτη μεταβολής των τάσεων σε νανοεικονοστοιχεία πυριτίου/νιτρίδιου του πυριτίου. Η υβριδική προσέγγιση παρέχει μια ατομική περιγραφή κοντά στη διεπαφή και μια συνεχή περιγραφή βαθιά μέσα στα κατώτερα στρώματα, αυξάνοντας τις προσπελάσιμες κλίμακες μήκους και μειώνοντας αισθητά το υπολογιστικό κόστος. Ο Zhigilei [104] παρουσίασε μια μελέτη χρησιμοποιώντας προσομοίωση πολλαπλών κλιμάκων για να ερευνήσει το φαινόμενο αφαίρεσης υλικού με laser. Η προσέγγιση με πολλαπλές κλίμακες αφορά διαφορετικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της κοπής με laser με κατάλληλες αναλύσεις και την ίδια στιγμή, συνυπολογίζει τους συσχετισμούς μεταξύ των διεργασιών. Ενώ μέχρι σήμερα η προσομοίωση σε πολλαπλές κλίμακες δεν έχει εφαρμοστεί ιδιαίτερα στις μικροκατεργασίες, δείχνει πολλά υποσχόμενη στην αντιμετώπιση της πολλαπλότητας των θεμάτων που αναπτύσσονται γύρω από τις μικροκατεργασίες και στις γειτονικές μεγέθους κλίμακες.

### 2.3.14 Μηχανιστική μοντελοποίηση

Ένα μηχανιστικό μοντέλο για το μικροφραιζάρισμα, που αναπτύχθηκε από τον Vogler και άλλους [56] χρησιμοποιεί την τεχνική της χαρτογράφησης για να αναπαραστήσει τη μικροδομή διαφορετικών φάσεων πολυφασικών υλικών με τον καθορισμό του μεγέθους και της μεταβολής των δυνάμεων κοπής. Το σχήμα 2.38 απεικονίζει τη διεργασία φραιζαρίσματος ελατού σιδήρου. Το μοντέλο αναγνωρίζει σε κάθε στιγμή της κοπής, επακριβώς τι μέρος της κόψης δεσμεύεται σε κάθε φάση του πολυφασικού υλικού. Το μοντέλο επαληθεύεται χρησιμοποιώντας βαθμονομημένες συγκεκριμένες συνιστώσες του ελατού σιδήρου, για την πρόβλεψη του μεγέθους της δύναμης κοπής και τη μεταβολή του ελατού σιδήρου στο μικροφραιζάρισμα.



Σχήμα 2.38 Φραιζάρισμα ελατού σιδήρου κατά Vogler et al.

Το μοντέλο δείχνει να έχει τη δυνατότητα λήψης της υψηλής συχνότητας μεταβολή των δυνάμεων κοπής που παρατηρείται στα πειράματα αλλά δεν εξηγεί την κινηματική της διεργασίας κατά το μικροφραιζάρισμα ελατού σιδήρου. Οι μελέτες προσομοίωσης δείχνουν ότι η συχνότητα της μεταβολής μπορεί να αποδοθεί στην απόσταση της

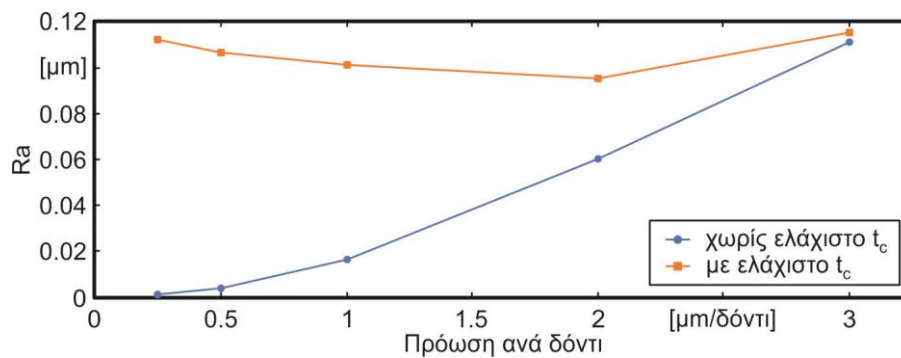
δευτερεύουσας φάσης και αυτό το μέγεθος της μεταβολής καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων της δευτερεύουσας φάσης.

Ο Kim και ο Kim [105] ανέπτυξαν ένα μοντέλο ορθογωνικής κοπής, το οποίο εμπεριέχει την επίδραση της ακτίνας της κοπτικής ακμής και την ελαστική επαναφορά στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού. Τέσσερις περιοχές πίεσης ορίστηκαν στην ανάπτυξη του μοντέλου στρογγυλεμένης κοπτικής ακμής (RECM): οι κανονικές πιέσεις και οι πιέσεις τριβής πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου και πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου εξαιτίας της ελαστικής επαναφοράς του τεμαχίου, οι πιέσεις πάνω στο στρογγυλεμένο άκρο του και η επίδραση της αρνητικής γωνίας αποβλίττου στη γεωμετρία διάτμησης. Για τον υπολογισμό των κανονικών πιέσεων πάνω στην ακτίνα της κοπτικής ακμής, ένα μοντέλο εργο-σκληρύνωσης χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του υλικού του τεμαχίου. Οι προβλέψεις του μοντέλου συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα του Lucca και άλλων [39]. Το RECM δείχνει να προβλέπει τις παρατηρούμενες τάσεις ακριβέστερα από το μοντέλο της αιχμηρής κοπτικής ακμής του Merchant.

Προκειμένου να συνυπολογίσουν την ακτίνα της κοπτικής ακμής, ο Vogler και άλλοι [106] επέκτειναν το ήδη αναπτυγμένο μοντέλο δυνάμεων μικροφραιζαρίσματος [56] ενσωματώνοντας την επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στο αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του αποβλίττου. Οι δυνάμεις κοπής που προέρχονται από δύο μηχανισμούς – αφαίρεση αποβλίττου και περιστροφή χωρίς να αφαιρείται υλικό – υπολογίστηκαν ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας την πλαστικότητα γραμμής ολίσθησης και την παρεμβολή όγκου, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο προβλέφθηκε με ακρίβεια το παρατηρούμενο πειραματικό υποαρμονικό φάσμα συχνοτήτων περάσματος του δοντιού σε κατεργασία με μικρή ταχύτητα πρόωσης που παρουσιάστηκε προηγουμένα στο σχήμα 2.27. Επισημάνθηκε επίσης ότι το προβλεπόμενο σήμα της δύναμης κοπής περιέχει ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο για κάθε η περάσματα δοντιού, παρόμοιο με τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.27, τα οποία παρέχουν μια επιπλέον απόδειξη του φαινομένου του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στη μικροκατεργασία.

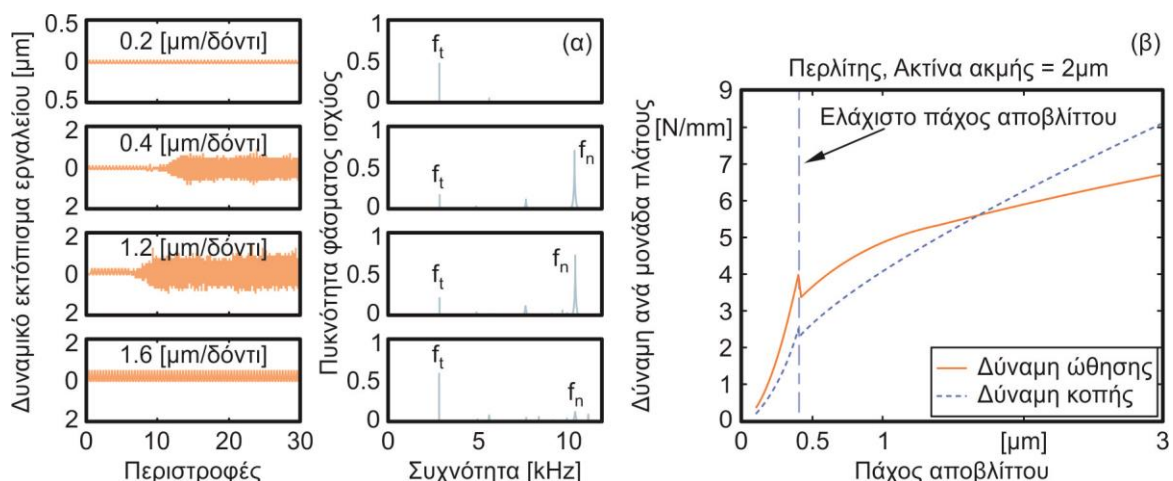
Ο Joshi και ο Melkote [107] έκαναν μια προσπάθεια να εξηγήσουν την επίδραση του μεγέθους του αποβλίττου στην πρωτοβάθμια ζώνη παραμόρφωσης (PDZ) σε μια διαδικασία ορθογωνικής κοπής με την ανάπτυξη ενός μοντέλου βασισμένο στην κλίση της παραμόρφωσης. Λαμβάνοντας υπόψη μια παράλληλη όψη της PDZ, σχεδιάστηκαν μοντέλα για την κλίση παραμόρφωσης, την πυκνότητα των απαραίτητων γεωμετρικά ασυνεχειών, την αντοχή σε διάτμηση, και την ειδική ενέργεια διάτμησης. Η ανάλυση δείχνει ότι για την παραμόρφωση της PDZ, το μήκος του επιπέδου διάτμησης αντιπροσωπεύει την κλίμακα μεγέθους του υλικού. Το μοντέλο παρέχει επίσης μια εκτίμηση του κάτω ορίου της επίδρασης του μεγέθους του αποβλίττου που παρατηρήθηκε στην ειδική ενέργεια διάτμησης. Οι τάσεις στην προβλεπόμενη ειδική ενέργεια διάτμησης συγκλίνουν αρκετά με τις πειραματικές τιμές που λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία.

Ο Vogler και άλλοι [57] ανέπτυξαν ένα μοντέλο της κατεργασίας μικροφραιζαρίσματος για την πρόβλεψη της επιφανειακής τραχύτητας της κεντρικής γραμμής ενός αυλακιού και των δυνάμεων κοπής. Το μοντέλο αντιπροσωπεύει την επίδραση της πεπερασμένης ακμής ενσωματώνοντας την έννοια του ελάχιστου πάχους αποβλίττου. Οι τιμές του ελάχιστου πάχους αποβλίττου βρέθηκαν μέσω προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων για φερριτικά και περλιτικά υλικά. Το μοντέλο φαίνεται να προβλέπει με ακρίβεια την επιφανειακή τραχύτητα για τα μονοφασικά υλικά δηλαδή τον φερρίτη και τον περλίτη. Δύο φαινόμενα βρέθηκαν να συνδυάζονται στη δημιουργία ενός βέλτιστου ρυθμού πρόωσης για τη δημιουργία επιφάνειας μονοφασικού υλικού: η γεωμετρική επίδραση του εργαλείου και η επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου. Το σχήμα 2.39 δείχνει την επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου πάνω στην επιφανειακή τραχύτητα. Η επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου είναι κυρίαρχης σημασίας σε χαμηλές τιμές πρόωσης.



Σχήμα 2.39 Επίδραση ελάχιστου πάχους αποβλίττου κατά Vogler et al.

Ο Liu και άλλοι [108] ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεταβαλλόμενης δύναμης κοπής και ταλάντωσης της διαδικασίας μικροφραιζαρίσματος που συμπεριλαμβάνει τη δυναμική της μικροκοπής, τις επιρροές του σταθερού άκρου πύκνωσης, τις επιδράσεις του ελάχιστου πάχους αποβλίττου, την ελαστική επαναφορά και την ελαστοπλαστική φύση της ολίσθησης όταν το εργαλείο δεν αφαιρεί υλικό. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο, οι συγγραφείς μελέτησαν τις επιδράσεις του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στις δυνάμεις κοπής και τις ταλαντώσεις καθώς και στη σταθερότητα της διαδικασίας μικροφραιζαρίσματος. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της σταθερότητας στο μικροφραιζάρισμα, που το διαφοροποιεί από τη σταθερότητα του συμβατικού φραιζαρίσματος, είναι ότι η σταθερότητα εξαρτάται πολύ από την πρόωση, με αποτέλεσμα οι χαμηλές τιμές πρόωσης να δημιουργούν φαινόμενο αστάθειας. Το [σχήμα 2.40\(α\)](#) δείχνει τις προβλεπόμενες δονήσεις του εργαλείου και το φάσμα συχνοτήτων για την κατεργασία περλίτη χρησιμοποιώντας εργαλείο μικροφραιζαρίσματος ακτίνας ακμής 2mm με βάθος κοπής 50mm σε διαφορετικές προώσεις. Φαίνεται σαφώς ότι καθώς η πρόωση αυξάνει από 0.2 σε 0.4mm/δόντι, το επίπεδο κραδασμών αυξάνει δραματικά και το φάσμα συχνοτήτων περιέχει σημαντική ενέργεια στη φυσική συχνότητα του εργαλείου ( $f_n$ ) (10.4kHz). Από την άλλη πλευρά, καθώς αυξάνεται η πρόωση από 1.2 σε 1.6mm/δόντι, το επίπεδο των κραδασμών μειώνεται και το φάσμα συχνοτήτων κυριαρχείται από τη συχνότητα περάσματος του δοντιού ( $f_t$ ) (2.8kHz), υποδηλώνοντας αλλαγές στη διαδικασία παραγωγής από ασταθή σε σταθερή κατάσταση.



Σχήμα 2.40 Ταλάντωση εργαλείου, φάσμα ισχύος και σχέση δυνάμεων-αποβλίττου σε κατεργασία περλίτη κατά Liu et al.

Οι συγγραφείς αποδίδουν την εξάρτηση της σταθερότητας από την πρόωση στην εξαιρετικά μη γραμμική σχέση και ασυνέχεια του αποβλίττου προς τη δύναμη που φαίνεται στο [σχήμα 2.40\(β\)](#). Πρώτον, ο ρυθμός αύξησης, τόσο για τη δύναμη κοπής, όσο και για τη δύναμη ώθησης είναι πολύ υψηλότερος στην κατάσταση όπου το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό όταν το πάχος αποβλίττου είναι μικρότερο από το ελάχιστο πάχος

αποβλήττου από ότι για τη διαδικασία σχηματισμού αποβλήττου όταν το πάχος αποβλήττου είναι μεγαλύτερο του ελάχιστου. Επιπλέον, ξεκάθαρα εμφανίζεται ένα τοπικό μέγιστο της δύναμης ώσης πάνω στο ελάχιστο πάχος αποβλήττου εξαιτίας της μετάβασης από την κατάσταση περιστροφής χωρίς αφαίρεση υλικού στη διάτμηση, η οποία είναι σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται [94].

## 2.4 Αναγκαιότητα της εργασίας

Στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον, η ανάγκη για πρόβλεψη της ποιότητας του τελικού προϊόντος και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων από το στάδιο της σχεδίασης, είναι αναγκαίες, καθώς οδηγούν σε μείωση του κόστους παραγωγής. Από την άλλη μεριά, οι απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας στοχεύουν στη δημιουργία προϊόντων μεγάλης πολυπλοκότητας και καλύτερης δυνατής ποιότητας και έτσι είναι απαραίτητη η χρήση ανθεκτικών υλικών που εξασφαλίζουν μεγάλη αντοχή και ελάχιστο βάρος.

Το κενό το οποίο έρχεται να καλύψει η παρούσα διατριβή είναι η ανάγκη της κατασκευής ενός αξιόπιστου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης στη διάσταση της μικρο-κλίμακας που να βοηθάει στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της κατεργασίας χωρίς αυτή να λάβει χώρα. Για την υλοποίηση του μοντέλου έγινε χρήση συστήματος CAD στο οποίο αναπτύχθηκε προγραμματιστικά η κινηματική της κατεργασίας και βρίσκει εφαρμογή και στη μικρο-κλίμακα. Τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι η παραγόμενη τοπομορφία, η τραχύτητα και οι δυνάμεις κοπής, σημαντικά για την αξιολόγηση της κατεργαζόμενης επιφάνειας υπό διάφορες συνθήκες κοπής καθώς και για τον υπολογισμό της φθοράς του εργαλείου.

Παράλληλα έγινε επαλήθευση του μοντέλου αλλά και πειραματική διερεύνηση των συνθηκών κοπής του κράματος Αλουμινίου Al7075-T651, καθώς το συγκεκριμένο κράμα, λόγω του συνδυασμού υψηλής αντοχής και μικρού βάρους, καθίσταται ως ένα ευρείας χρήσης υλικό κατεργασίας.









### 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο, τόσο στον τομέα της βιομηχανίας, όσο και στον τομέα της έρευνας. Οι ανάγκες της σύγχρονης εποχής για προϊόντα υψηλής ακρίβειας και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη λογισμικών προγραμμάτων προσομοίωσης που βοηθούν κατά την παραγωγική διαδικασία καθώς ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος παραγωγής. Στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης κατασκευάστηκε ένας κώδικας τρισδιάστατης προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος σε μικρο-κλίμακα.

Η τρισδιάστατη προσομοίωση της κατεργασίας προσφέρει πλεονέκτημα σε σχέση με άλλου είδους αλγεβρικές προσομοιώσεις στο γεγονός ότι τα στερεά τριών διαστάσεων που δημιουργούνται περιέχουν ολόκληρη την πληροφορία για τη διαδικασία της κοπής. Η μελέτη των στερεών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση χρήσιμων παραγόντων και νέων αποτελεσμάτων.

Ο λόγος της κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης είναι η εύκολη και γρήγορη αξιολόγηση του αποτελέσματος, τόσο της τοπομορφίας, όσο και της επιφανειακής τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής μετά από διαδοχικά στάδια κατεργασίας. Τα αποτελέσματα αυτά ανταποκρίνονται στα πραγματικά αποτελέσματα της διαδικασίας έχοντας μια απόκλιση εντός επιτρεπτών ορίων.

Η χρήση του λογισμικού είναι εύκολη και εξάγει αποτελέσματα σε γρήγορο σχετικά χρόνο ανάλογα βέβαια την περίπτωση και τα δεδομένα της προσομοίωσης. Καθώς το λειτουργικό που αναπτύχθηκε είναι φιλικό προς το χρήστη και η διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων σύντομη, η χρήση του με διαφορετικά σύνολα παραμέτρων εισόδου οδηγεί σε ένα πλήθος διαφορετικών αποτελεσμάτων μέσα από τα οποία μπορεί να γίνει διαλογή και επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας.

Για την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αναπτύχθηκαν ξεχωριστά λογισμικά που λαμβάνουν δεδομένα από το μοντέλο τρισδιάστατης προσομοίωσης που αναπτύχθηκε. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιολογηθούν μόνο γεωμετρικά καθ' ότι το μοντέλο δε συμπεριλαμβάνει τις υφιστάμενες ταλαντώσεις της κατεργασίας, τη φθορά του κοπτικού εργαλείου και τη σύσταση του υλικού κατεργασίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της κατασκευής του λογισμικού τρισδιάστατης προσομοίωσης με τη χρήση ενός έτοιμου συστήματος απεικόνισης στερεών τριών διαστάσεων όπου γίνεται λεπτομερής αναφορά στα διαδοχικά βήματα και τον τρόπο κατασκευής που ακολουθείται για την επίτευξη της προσομοίωσης.

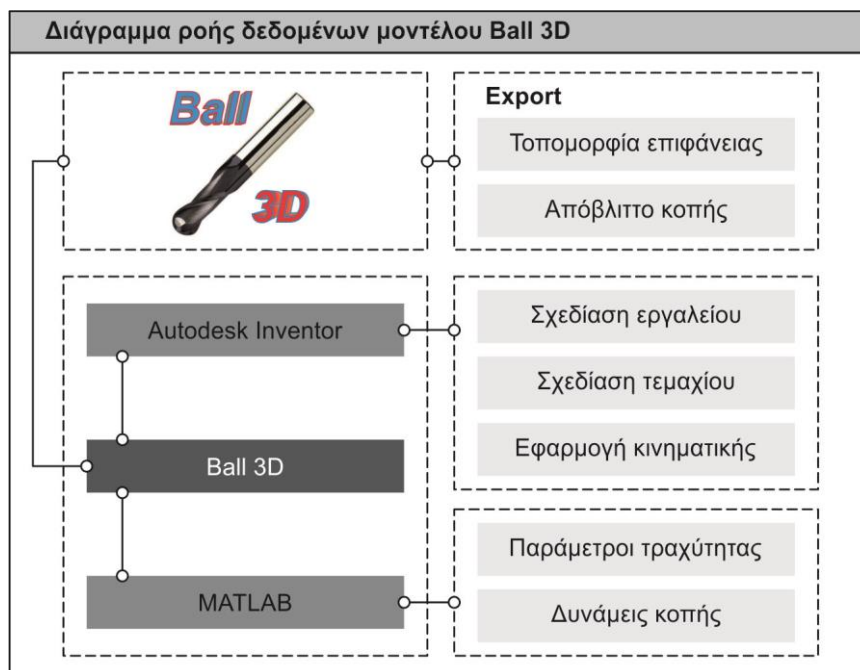
#### 3.2 Περιβάλλοντα ανάπτυξης του μοντέλου

Για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης επιλέχθηκε ένα σύστημα CAD και συγκεκριμένα το λογισμικό Inventor της Autodesk. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε διότι προσφέρει τη δυνατότητα εύκολου προγραμματισμού στο χρήστη μέσω προγραμματιστικού πλαισίου κειμένου σε Visual Basic for Applications (VBA) γλώσσα προγραμματισμού. Μέσω αυτής της γλώσσας προγραμματισμού και του Application Programming Interface (API) της Autodesk γίνεται εφικτή η κατασκευή τρισδιάστατων

αντικειμένων στο περιβάλλον του χρήστη. Η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού διευκολύνει την παραμετροποίηση των δεδομένων εισόδου και η δημιουργία φόρμας εισαγωγής δεδομένων διευκολύνει το χρήστη στο χειρισμό και την εκτέλεση του προγράμματος. Το σχήμα 3.1 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής δεδομένων του μοντέλου.

Το πρόγραμμα της προσομοίωσης με την ονομασία Ball 3D αναπτύχθηκε και εκτελείται μέσα από το περιβάλλον του Autodesk Inventor στο οποίο γίνονται όλες οι απαραίτητες ενέργειες της προσομοίωσης στο περιβάλλον των τριών διαστάσεων του χώρου. Ως ένα σύστημα CAD, το Inventor είναι αρμόδιο, τόσο για την κατασκευή των τρισδιάστατων στερεών του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου κατεργασίας, όσο και για τη συνδεσμολογία των δύο αυτών βασικών στερεών της προσομοίωσης σε διαδοχικά βήματα-στάδια. Τα αποτελέσματα της 3D προσομοίωσης είναι αυτά της τοπομορφίας της επιφάνειας και του απαραμόρφωτου αποβλήτου της κοπής.

Το δεύτερο περιβάλλον που επιλέχθηκε για την προβολή χρήσιμων πληροφοριών που απορρέουν από τα δύο τρισδιάστατα αποτελέσματα είναι το περιβάλλον του MATLAB. Μέσα από το περιβάλλον αυτό αναπτύχθηκαν δύο λογισμικά για την εκτίμηση των παραμέτρων της τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής αντίστοιχα. Τα δεδομένα εισόδου των συγκεκριμένων λογισμικών προέρχονται από τα ήδη υπάρχοντα στερεά του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του απαραμόρφωτου αποβλήτου.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής δεδομένων μοντέλου

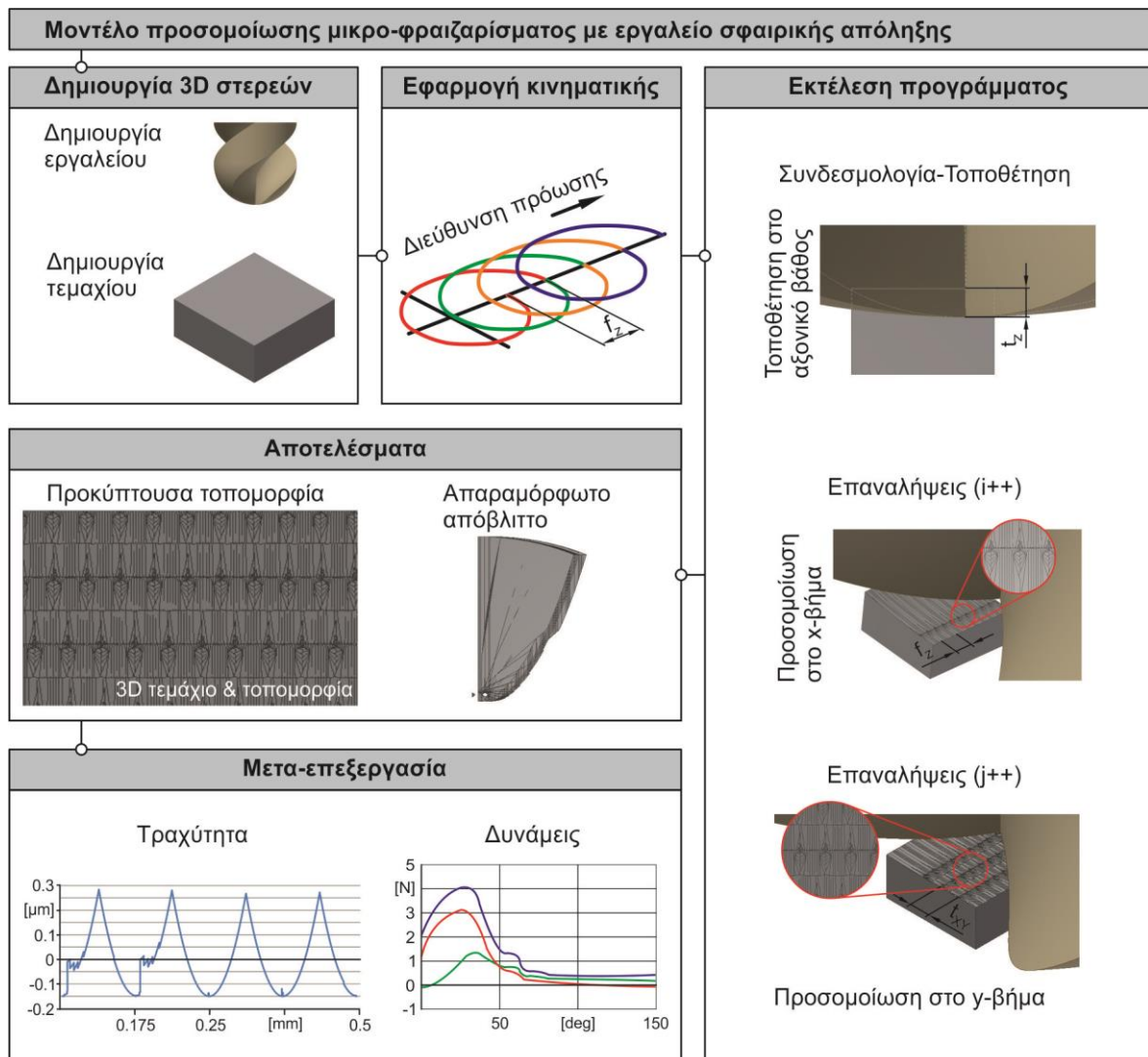
### 3.3 Δομή του μοντέλου

Η προσομοίωση της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης έγινε μέσω διακριτών σταδίων τα οποία εικονίζονται στο σχήμα 3.2. Η διαδικασία της προσομοίωσης συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

- **Δημιουργία των 3D στερεών:** Στο στάδιο αυτό ο χρήστης εισάγει τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου κατεργασίας. Με τις παραμέτρους αυτές κατασκευάζονται τα τρισδιάστατα στερεά του κοπτικού και του τεμαχίου και αποθηκεύονται για μετέπειτα χρήση.
- **Εφαρμογή της κινηματικής:** Στο στάδιο αυτό εισάγονται οι συνθήκες κοπής. Οι παράμετροι που εισάγονται αφορούν τον τρόπο δημιουργίας της κατεργαζόμενης

επιφάνειας. Στις παραμέτρους αυτές συγκαταλέγονται το αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής, η πρόωση, οι κλίσεις του άξονα του κοπτικού και η διακριτοποίηση της περιστροφής του εργαλείου.

- **Εκτέλεση του λογισμικού:** Σε αυτό το στάδιο εκτελείται η προσομοίωση της κατεργασίας μέσα από διαδοχικές τοποθετήσεις του εργαλείου πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η εκάστοτε τοποθέτηση στο κάθε βήμα γίνεται με βάση τις παραμέτρους που έχουν οριστεί στο προηγούμενο βήμα.
- **Εξαγωγή αποτελεσμάτων:** Μετά το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης, γίνεται αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Τα κύρια αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι η προκύπτουσα τοπομορφία της επιφάνειας και το αντιπροσωπευτικό απαραμόρφωτο απόβλιπτο της κοπής σε μια ενδιάμεση θέση. Και τα δύο αυτά αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία τρισδιάστατης στερεής μορφής.
- **Μετά-επεξεργασία αποτελεσμάτων:** Στο τελευταίο στάδιο γίνεται η ανάλυση της τοπομορφίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας και του στερεού απαραμόρφωτου αποβλήττου με σκοπό την εκτίμηση των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής που προκύπτουν αντίστοιχα από τα δύο στερεά.

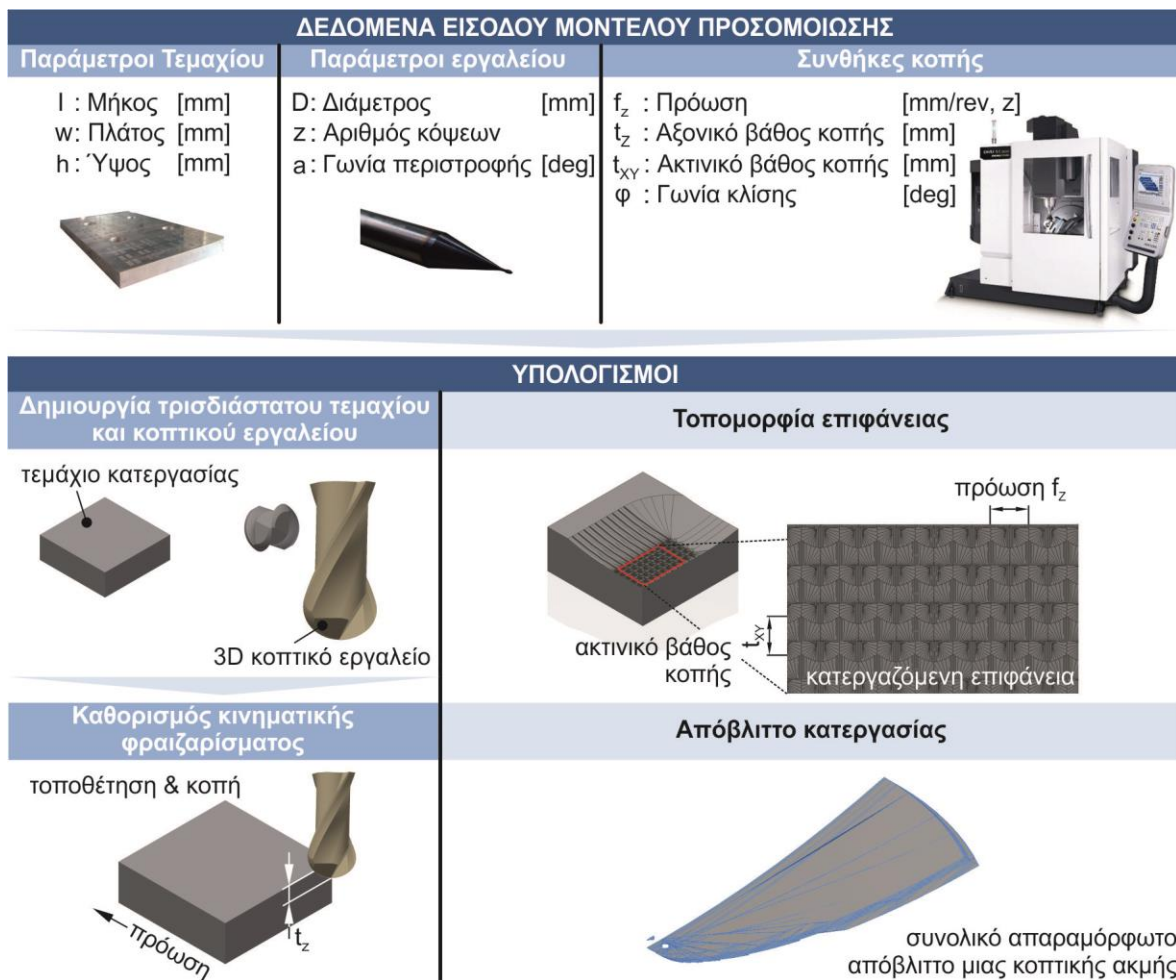


Σχήμα 3.2 Βασικά στάδια προσομοίωσης – λογικό διάγραμμα

### 3.4 Ανάπτυξη μοντέλου τρισδιάστατης προσομοίωσης φραιζαρίσματος

Αρχικά πρέπει να δημιουργηθούν τα τρισδιάστατα αντικείμενα του εργαλείου και του τεμαχίου κατεργασίας έτσι ώστε στη συνέχεια να εφαρμοσθεί η κατάλληλη κινηματική για την επίτευξη της προσομοίωσης του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3 όπου φαίνεται το λογικό διάγραμμα ροής δεδομένων της προσομοίωσης.

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης είναι οι γεωμετρικές παράμετροι του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή μήκος, πλάτος και ύψος, οι παράμετροι του κοπτικού εργαλείου σφαιρικής απόληξης, διάμετρος, αριθμός κόψεων και γωνία περιστροφής και τέλος οι συνθήκες κοπής, πρόωση, αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής και γωνία κλίσης του κοπτικού εργαλείου, που είναι βασικές παράμετροι ορισμού της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα ροής δεδομένων προσομοίωσης φραιζαρίσματος

Στο κομμάτι των υπολογισμών, πρώτα γίνεται η κατασκευή των τρισδιάστατων στερεών κατεργαζόμενου τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου και με τον καθορισμό της κατάλληλης κινηματικής περατώνεται μετά από διαδοχικά, επαναληπτικά βήματα η προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παράγονται δύο αρχεία στερεών. Το πρώτο είναι αυτό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και το δεύτερο είναι αυτό του απαραμόρφωτου αποβλίττου της κοπής.

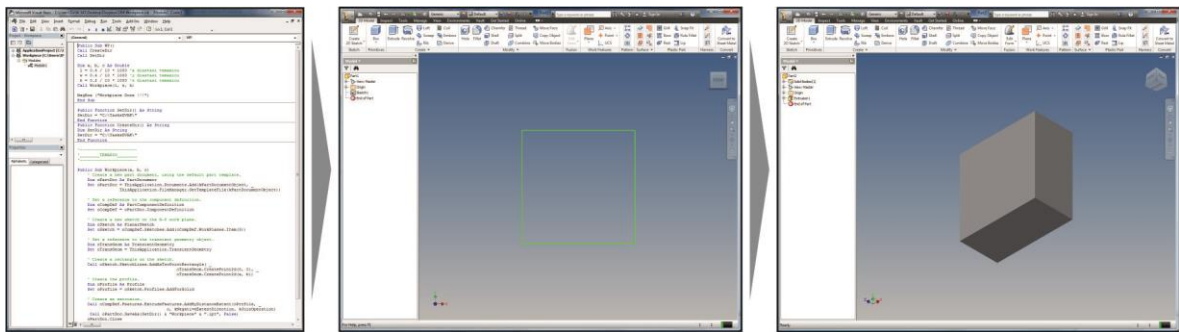
Τα δύο τρισδιάστατα αποτελέσματα του μοντέλου περιέχουν ολόκληρη την γεωμετρική πληροφορία έτσι ώστε με κατάλληλη μετά-επεξεργασία τους να προκύπτουν μετρούμενα



αριθμητικά χαρακτηριστικά. Έτσι, το κατεργαζόμενο τεμάχιο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής τραχύτητας ενώ το απόβλιττο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Η ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης επεξηγείται αναλυτικά, βήμα προς βήμα στη συνέχεια.

### 3.4.1 Δημιουργία κατεργαζόμενου τεμαχίου

Στο κομμάτι της προσομοίωσης το πρώτο αντικείμενο που δημιουργείται είναι το ακατέργαστο τεμάχιο κατεργασίας. Ως κατεργαζόμενο τεμάχιο ορίζεται πάντοτε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο συγκεκριμένων επιθυμητών διαστάσεων που δίδονται από το χρήστη. Τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα είναι το μήκος, το πλάτος και το ύψος του τεμαχίου. Με τα μεγέθη του μήκους και του πλάτους δημιουργείται αρχικά ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που στη συνέχεια συμπεριλαμβανομένου του ύψους εξελίσσεται σε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που αναπαριστά το τεμάχιο κατεργασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Το κομμάτι αυτό αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή και χρησιμοποιείται αργότερα στην προσομοίωση της κατεργασίας.



Σχήμα 3.4 Δημιουργία ορθογωνικού ακατέργαστου 3D τεμαχίου

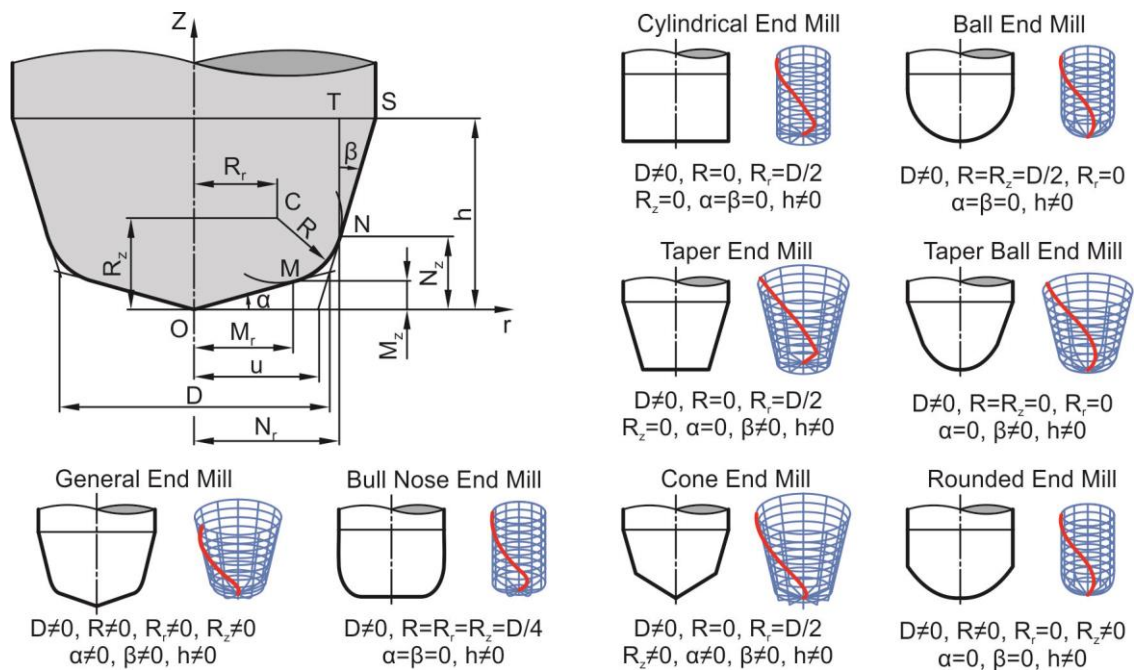
Για την προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος στη μικρο-κλίμακα και για την αποφυγή μεγάλου χρόνου προσομοίωσης είναι συνήθως επιθυμητή η κατασκευή ενός τεμαχίου διαστάσεων μικρότερων ή ίσων του ενός χιλιοστού κατά περίπτωση καθώς οι τιμές των παραμέτρων είναι της τάξης μερικών δεκάδων μικρομέτρων.

### 3.4.2 Δημιουργία κοπτικών εργαλείων

Η δημιουργία τρισδιάστατων στερεών εργαλείων κοπής είναι αρκετά δύσκολη καθ' ότι φέρουν μια πολύπλοκη γεωμετρία η οποία διαφέρει μερικώς από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και αποτελεί επτασφράγιστο μυστικό της εκάστοτε εταιρείας. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα αυτοματοποίησης της κατασκευής 3D εργαλείων σύμφωνα με τις εξισώσεις που βρίσκονται στη βιβλιογραφία από τους S. Engin και Y. Altintas. Στο ακόλουθο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι μορφές των κοπτικών απολήξεων των εργαλείων φραιζαρίσματος. Σύμφωνα με τους Engin και Altintas υπάρχουν οχτώ είδη κοπτικών εργαλείων ανάλογα με τη μορφή των κοπτικών τους ακμών και ανάλογα με την ύπαρξη καμπύλων τόξων στην απόληξη του εκάστοτε κοπτικού εργαλείου.

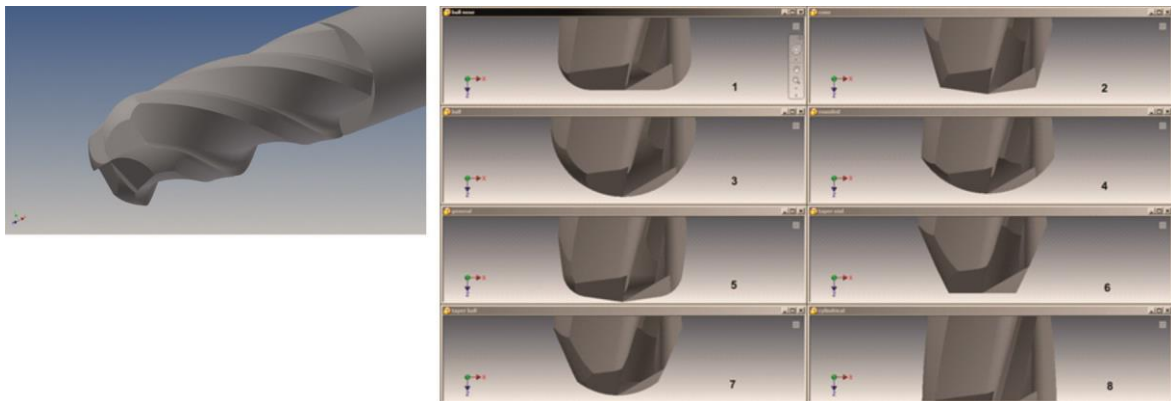
Η γενική μορφή ενός εργαλείου απαρτίζεται από την ύπαρξη δύο ευθύγραμμων τμημάτων με δύο αντίστοιχες γωνίες προσδιορισμού της διεύθυνσής τους και την ύπαρξη ενός ακτινικού τόξου στην ένωση των ευθειών. Ως εργαλείο σφαιρικής απόληξης χαρακτηρίζεται το κοπτικό εργαλείο που φέρει μηδενικά ευθύγραμμα τμήματα κοπτικής ακμής και ακτινικό τόξο ίσο με την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου.

Με τη χρήση συστήματος CAD και εφαρμόζοντας τις γεωμετρικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το κάθε κοπτικό εργαλείο, αναπτύχθηκε ένα λογισμικό τρισδιάστατης ψηφιακής απεικόνισης κοπτικών εργαλείων φραιζαρίσματος όλων των ειδών κοπτικών απολήξεων. Ανάλογα με το είδος κοπτικής απόληξης, η πολυπλοκότητα κατασκευής ενός τρισδιάστατου κοπτικού εργαλείου ποικίλει.



Σχήμα 3.5 Μορφές κοπτικών εργαλείων κατά Engin και Altintas

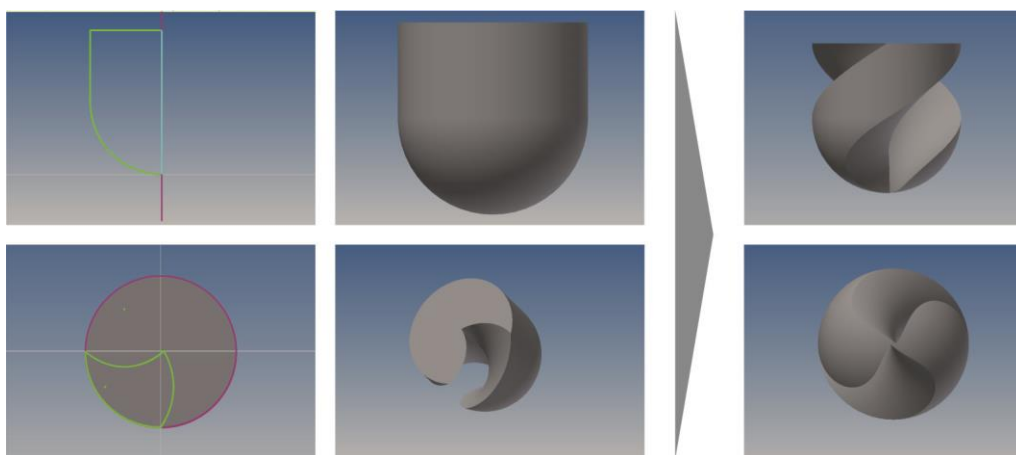
Ένα από τα προβλήματα των συστημάτων CAD για τη χρήση τους σε μοντέλα προσομοίωσης είναι η αρκετά μεγάλη δέσμευση της χωρητικότητας της μνήμης του υπολογιστή καθ' ότι τα τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργούνται και τα αρχεία συνδεσμολογίας φέρουν μεγάλο υπολογιστικό μέγεθος. Καθ' ότι η προσομοίωση που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί δεδομένα που παράγονται στο προηγούμενο βήμα, η εισαγωγή μιας σύνθετης γεωμετρίας επιβαρύνει κατά πολύ, τόσο σε υπολογιστικό χρόνο, όσο και σε απαιτήσεις χώρου μνήμης. Για το λόγο αυτό αποφεύχθηκε η χρήση κοπτικού εργαλείου πλήρους γεωμετρικής αντιστοίχισης με πραγματικό εργαλείο κοπής όπως αυτό του σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.6 Τρισδιάστατο εργαλείο σφαιρικής απόληξης και άλλων απολήξεων εργαλεία

Το παραπάνω γεγονός οδήγησε στην ανάγκη δημιουργίας ενός εργαλείου απλουστευμένης μορφής. Για το λόγο αυτό, στις προσομοιώσεις μικροφραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης χρησιμοποιήθηκε ένα ψεύδο-εργαλείο με μεγάλη παρειά και μικρό κύριο στέλεχος έτσι ώστε να επιτευχθεί η σωστή κοπτική ακμή της απόληξης ακόμα και στην άκρη του κοπτικού. Τα στάδια της δημιουργίας ενός τέτοιου εργαλείου παρουσιάζονται στο σχήμα 3.7 και περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.





Σχήμα 3.7 Κατασκευή ψευδο-εργαλείου σφαιρικής απόληξης

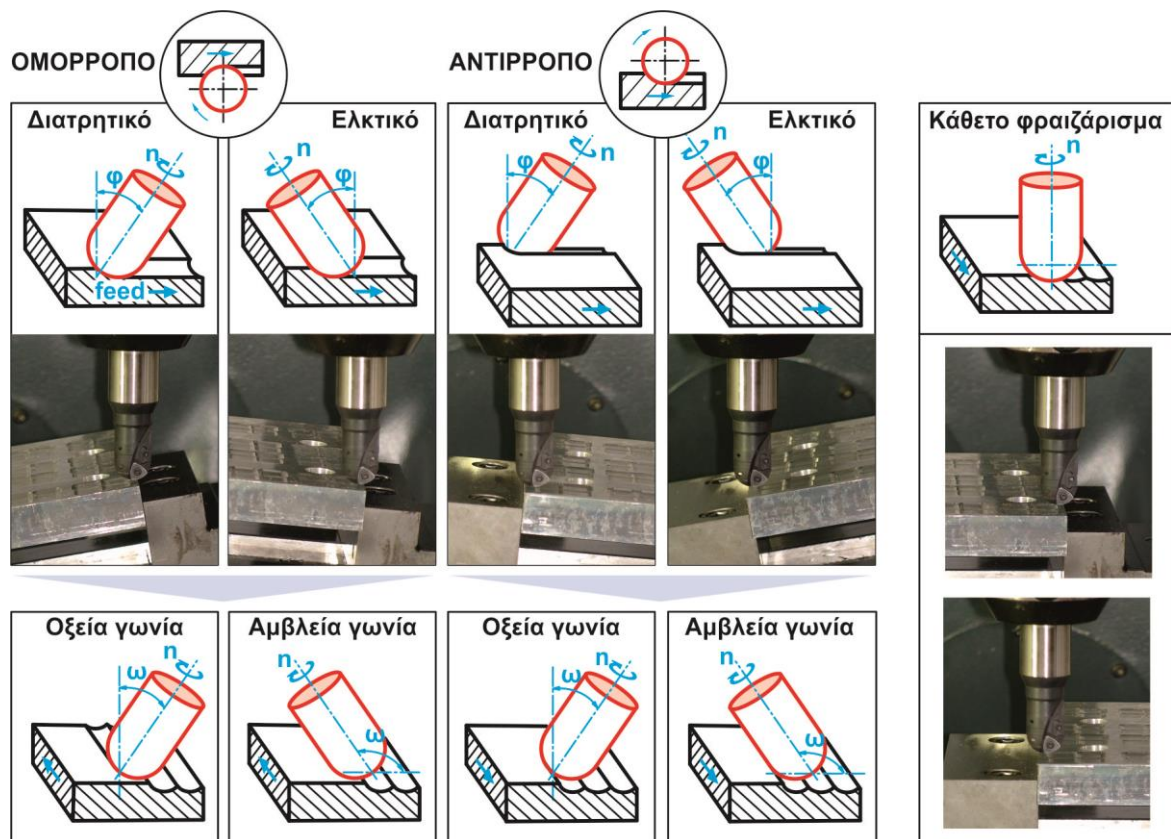
Αρχικά, σχεδιάστηκε σε ένα επίπεδο η γεωμετρία του εργαλείου σφαιρικής απόληξης και με την πλήρη περιστροφή της ως προς τον κάθετο άξονα δημιουργήθηκε ένας τρισδιάστατος όγκος. Καθώς τα εργαλεία διαμέτρου μικρότερης των 2mm διαθέτουν αποκλειστικά και μόνο δύο αυλακώσεις, σχεδιάστηκε η διατομή που αφαιρείται με ελίκωση και έγινε αντιγραφή αυτής για δύο φορές στην πλήρη περιστροφή με αποτέλεσμα τη δημιουργία του ψεύδο-εργαλείου στο μέγεθος διαμέτρου 1mm. Με βάση αυτή τη γεωμετρία μπορούν να κατασκευαστούν τα εργαλεία διαφόρων διαμέτρων ως μεγέθυνση ή σμίκρυνση αυτού.

Η αποδοχή της συγκεκριμένης γεωμετρίας ως αντιπροσωπευτικό κοπτικό εργαλείο φραιζαρίσματος σφαιρικής απόληξης γίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της τοπομορφίας της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου που προκύπτει από το μοντέλο προσομοίωσης με την αντίστοιχη επιφάνεια των πειραμάτων στις ίδιες συνθήκες κοπής, όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο κεφάλαιο της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, όπου τα οπτικά αποτελέσματα δείχνουν αυτήν την παραδοχή ως ισχύουσα.

### 3.4.3 Εφαρμογή κινηματικής και στρατηγικών φραιζαρίσματος

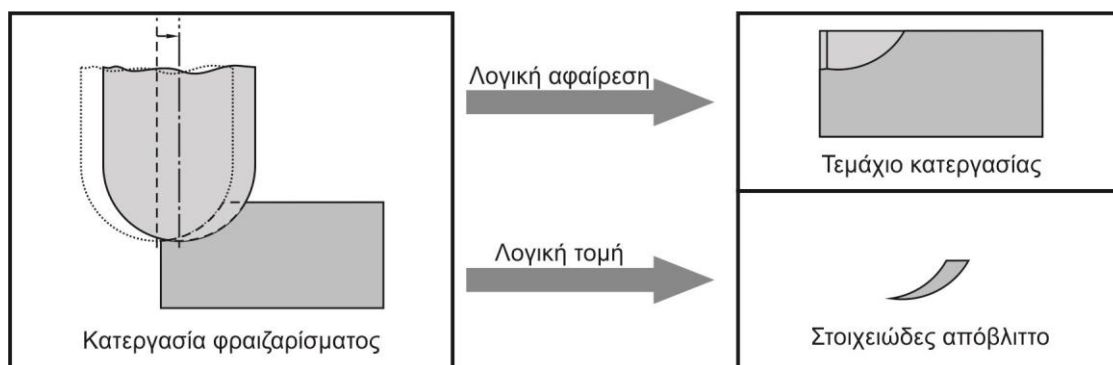
Η δημιουργία μιας επίπεδης επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο βάθος κοπής απαιτεί διαδοχικά περάσματα τα οποία αντιπροσωπεύονται από το ακτινικό βάθος κοπής. Οι κύριες παράμετροι που ρυθμίζονται από τον χρήστη είναι το αξονικό βάθος κοπής, το ακτινικό βάθος κοπής, η πρόωση του κοπτικού εργαλείου και οι κλίσεις που μπορεί να φέρει ως προς τη διεύθυνση του κοπτικού. Οι στρατηγικές της κοπής παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8 που ακολουθεί. Ανάλογα με την κλίση του κοπτικού εργαλείου το φραιζάρισμα διακρίνεται σε κάθετο, πλάγιο, διατρητικό και ελκτικό. Επίσης μπορούν να επιτευχθούν άλλοι δύο συνδυασμοί του πλάγιου ελκτικού και πλάγιου διατρητικού φραιζαρίσματος.

Η κινηματική της κατεργασίας αποτελεί παράγοντα δεσπόζουσας σημασίας για τη σωστή μοντελοποίηση του προβλήματος καθώς οποιοδήποτε λάθος εντός αυτής επηρεάζει άμεσα όλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό ο καθορισμός των σωστών παραμέτρων κατεργασίας χρίζει ιδιαίτερης προσοχής και είναι αναγκαίος για την αποφυγή σφαλμάτων.



Σχήμα 3.8 Παράμετροι και στρατηγικές κοπής

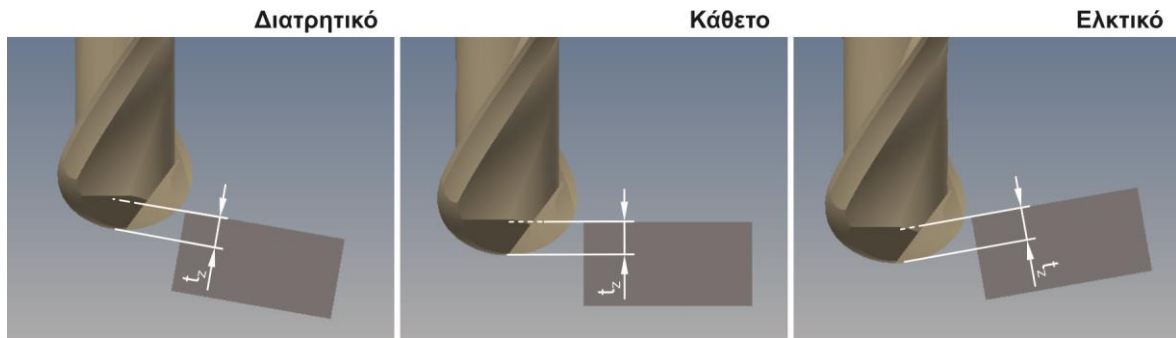
Εφόσον έχουν κατασκευαστεί το τεμάχιο κατεργασίας και το κοπτικό εργαλείο, η διαδικασία του φραιζαρίσματος προσομοιώνεται με την τοποθέτηση του αντικειμένου του τεμαχίου εντός ενός αρχείου συνδεσμολογίας (assembly) και στη συνέχεια εισάγεται το αρχείο του κοπτικού εργαλείου. Μέσα από το συγκεκριμένο αρχείο εκρέουν δύο αποτελέσματα. Το πρώτο αποτέλεσμα είναι η προκύπτουσα επιφάνεια της κατεργασίας φραιζαρίσματος και το δεύτερο είναι το στοιχειώδες απαραμόρφωτο απόβλιττο κοπής. Η μεν επιφάνεια κατεργασίας προκύπτει ως η λογική αφαίρεση των δύο αντικειμένων (τεμαχίου - εργαλείου), ενώ το απαραμόρφωτο απόβλιττο προκύπτει ως η λογική τους τομή (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Προκύπτουν τεμάχιο κατεργασίας και το αντίστοιχο απόβλιττο κοπής

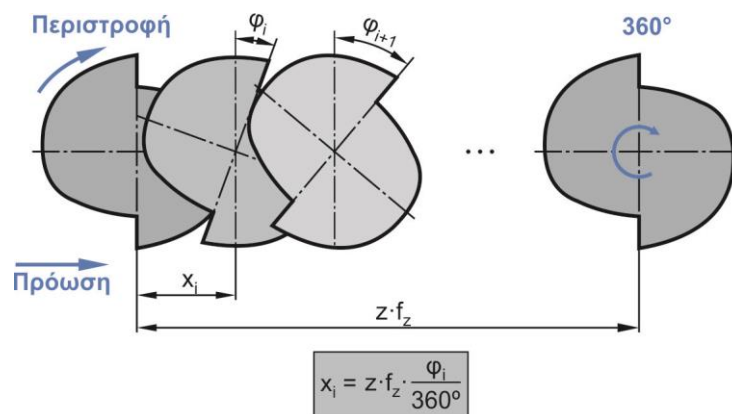
Σημαντικό σημείο για τη σωστή λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης αποτελεί η ορθή τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου πάνω στο προς κατεργασία τεμάχιο. Το σημείο μηδέν του κοπτικού εργαλείου είναι πάντοτε στο κατώτερο σημείο της απόληξης του κοπτικού και πάνω στον άξονα περιστροφής του. Ως επίπεδο αναφοράς ορίζεται η επάνω επιφάνεια του ακατέργαστου τεμαχίου. Με βάση το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς το μηδέν του εργαλείου πρέπει να βυθιστεί στο τεμάχιο σε απόσταση όσο είναι το αξονικό

βάθος κοπής ( $t_z$ ) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 3.10 για τις διάφορες στρατηγικές φραιζαρίσματος. Το εργαλείο αρχικά τοποθετείται σε σημείο που δεν κόβει δηλαδή σε απόσταση ίση με την ακτίνα του εργαλείου, αυξημένη κατά έναν τυχαίο αριθμό από το μηδέν έως το ένα πολλαπλασιασμένο επί την τιμή της πρόωσης. Ο τυχαίος αυτός αριθμός είναι εκείνος που καθορίζει τη μη δομημένη τοπομορφία που θα προκύψει στην επιφάνεια μετά από συνεχόμενα περάσματα. Σε αντίθετη περίπτωση η τοπομορφία που θα προέκυπτε θα είχε τη μορφή πλέγματος.



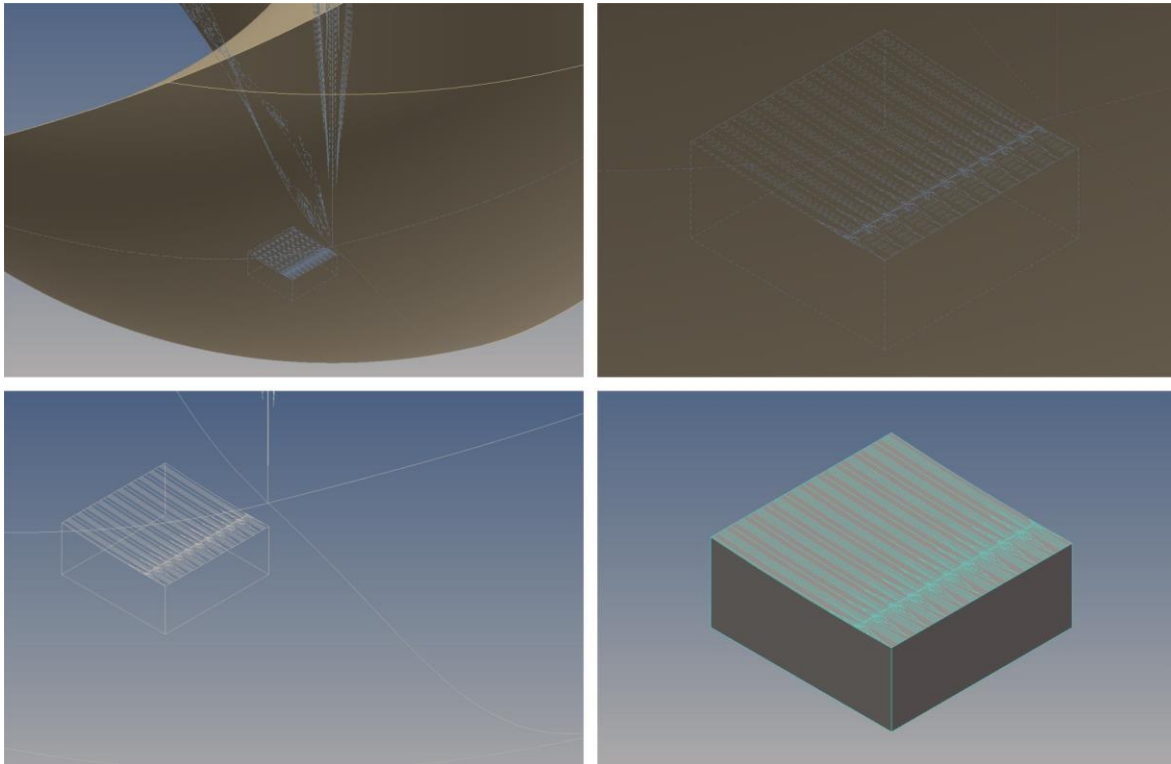
Σχήμα 3.10 Τοποθέτηση στο σωστό αξονικό βάθος κοπής

Η σύνθετη κίνηση του κοπτικού εργαλείου προκύπτει από ταυτόχρονη περιστροφή γύρω από τον άξονά του και από ευθύγραμμη μετατόπιση του κέντρου του εργαλείου. Σε μια πλήρη περιστροφή του κοπτικού εργαλείου ο άξονάς του έχει μετατοπιστεί κατά την τιμή της πρόωσης ( $f_z$ ). Ως εκ τούτου μπορεί να υπολογισθεί η στοιχειώδης μετακίνηση του εργαλείου για κάθε αντίστοιχη μοίρα περιστροφής (σχήμα 3.11) με βάση τον τύπο που ακολουθεί.



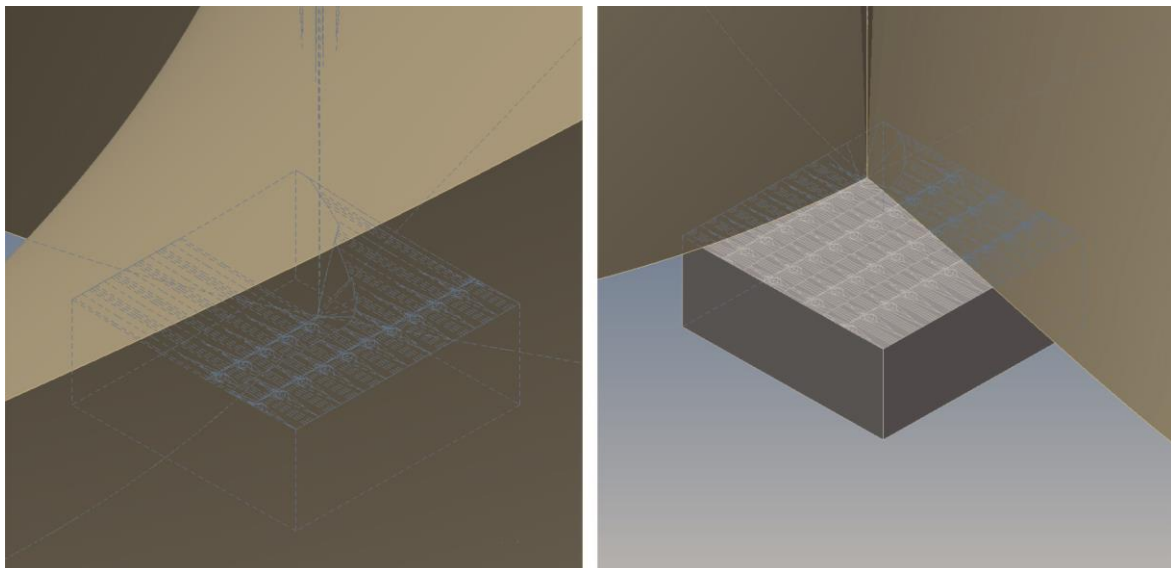
Σχήμα 3.11 Σχέση μετατόπισης ανάλογα με τη γωνία περιστροφής

Η διαδικασία της προσομοίωσης εκτελείται σε διαδοχικά βήματα τοποθετώντας κάθε φορά τη νέα προκύπτουσα επιφάνεια και το εργαλείο περιστρεμμένο και μετατοπισμένο σύμφωνα με την παραπάνω σχέση (σχήμα 3.11). Η επιλογή των μοιρών περιστροφής γίνεται από το χρήστη και λειτουργεί σωστά για τιμές ακέραιες και μεγαλύτερες ή και ίσες της μιας μοίρας που διαιρούν τέλεια την πλήρη περιστροφή των  $360^\circ$ . Για μεγαλύτερη ακρίβεια προτιμάται μικρός αριθμός των μοιρών περιστροφής. Ο υπερβολικά μικρός αριθμός μοιρών περιστροφής αυξάνει πολύ την πολυπλοκότητα της επιφάνειας ως εκ τούτου και τον υπολογιστικό χρόνο ενώ ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει και υπερφόρτωση της μνήμης. Αντίθετα η επιλογή αριθμού μοιρών μεγαλύτερη των  $45^\circ$  μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή ή λανθασμένα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.12 Πρώτο ολοκληρωμένο πέρασμα

Αφού το κοπτικό εργαλείο ολοκληρώσει ένα πέρασμα (σχήμα 3.12) από τη μια άκρη του τεμαχίου ως την άλλη, τότε τοποθετείται εκ νέου στην αρχή πάλι σε τυχαία θέση και παράλληλα μετατοπισμένο στη διεύθυνση της πρόωσης με τιμή ίση με το ακτινικό βάθος κοπής ( $t_{xy}$ ). Έπειτα εκτελεί το δεύτερο πέρασμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το εργαλείο να κατεργαστεί ολόκληρη την επιφάνεια. Η διαδικασία της προσομοίωσης σε δύο ενδιάμεσα σημεία προβάλλεται στο σχήμα 3.13 όπου είναι πλέον ορατοί οι παράγοντες κοπής.



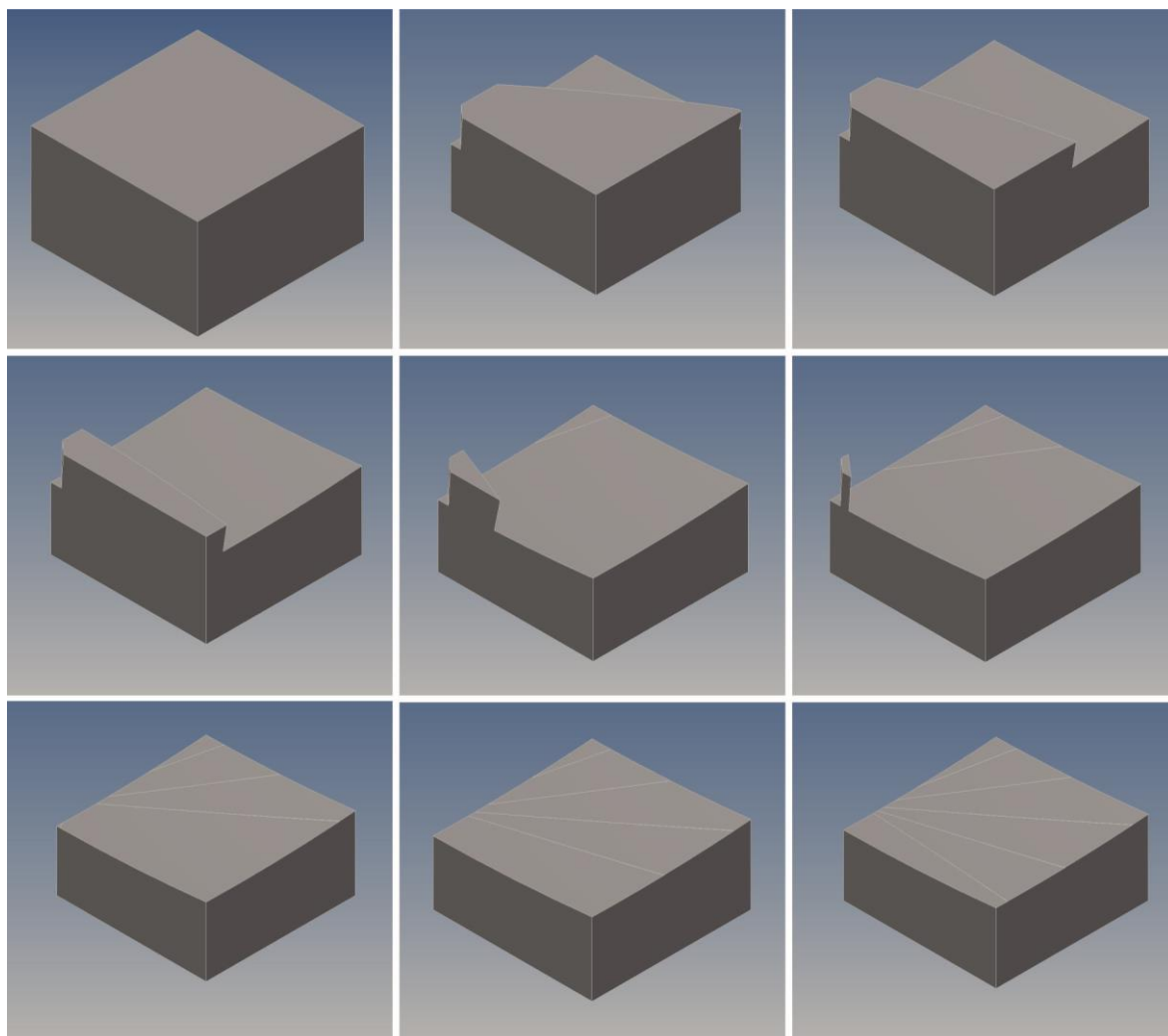
Σχήμα 3.13 Ενδιάμεσα βήματα προσομοίωσης

Όταν ολοκληρωθούν τα περάσματα, το στερεό που προκύπτει στο τέλος αποτελεί το κατεργασμένο τεμάχιο πάνω στο οποίο έχει αποτυπωθεί η τοπομορφία της επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει ολόκληρη η πληροφορία της επιφάνειας αποθηκευμένη σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

### 3.5 Προκύπτουσα τοπομορφία

Το άμεσο αποτέλεσμα του μοντέλου προσομοίωσης που απορρέει χωρίς επεξεργασία είναι η τοπομορφία της επιφάνειας. Επιλέχθηκαν συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων για την εκτέλεση του προγράμματος προσομοίωσης με βάση τα πειραματικά, πραγματικά δεδομένα που εκτελέστηκαν, όπως αναφέρεται και στο ακόλουθο Κεφάλαιο 4.

Η λογική αφαίρεση μεταξύ κοπτικού και τεμαχίου αποτελεί το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στο ακόλουθο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται το αρχικό στάδιο εισόδου του κοπτικού εργαλείου στο ακατέργαστο τεμάχιο. Σε αυτό το σημείο, καθώς το κοπτικό εισέρχεται για πρώτη φορά στο τεμάχιο κατεργασίας, ο όγκος του υλικού που αφαιρείται είναι μεγάλος. Η πρώτη περιστροφή του εργαλείου αποτελεί την αρχή της διαμόρφωσης της επιφάνειας και δεν αντιπροσωπεύει ολόκληρη την κατεργασία παρά μόνο την αρχική διαμόρφωση της εισόδου του κοπτικού εργαλείου.



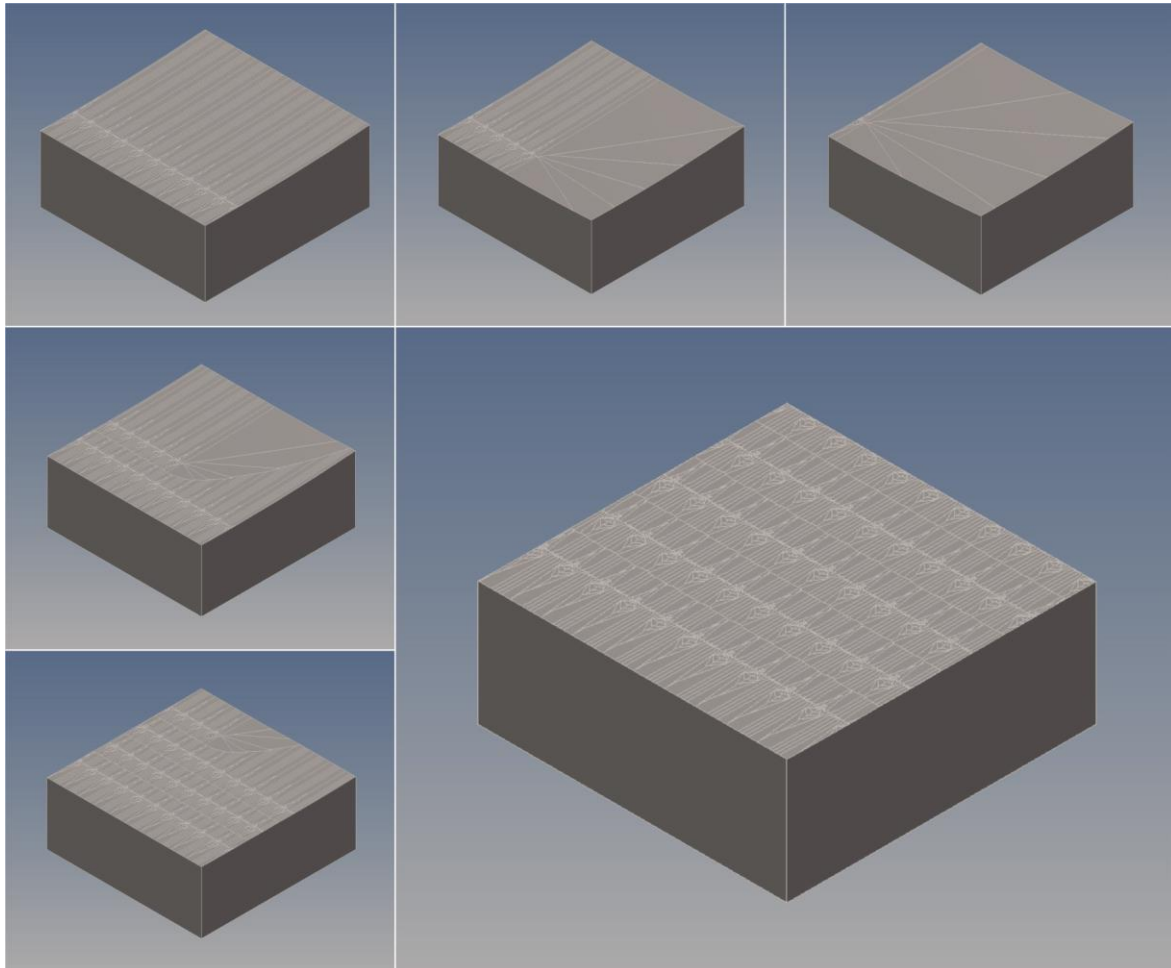
Σχήμα 3.14 Αρχική διαμόρφωση τεμαχίου κατεργασίας

Η προκύπτουσα τοπομορφία της επιφάνειας αποτελεί μια οπτική εκτίμηση της επιφάνειας. Η αξιολόγηση της τοπομορφίας μπορεί να γίνει μόνο σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, η τοπομορφία της επιφάνειας αποτελεί τη βάση από την οποία προκύπτουν οι πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο δημιουργίας της επιφάνειας αλλά και την πηγή των μετρούμενων χαρακτηριστικών της επιφάνειας που προκύπτουν μέσα από μετέπειτα επεξεργασία.



Παρατηρώντας την τοπομορφία της επιφάνειας είναι εύκολη η διάκριση δύο βασικών παραγόντων της κοπής που είναι το ακτινικό βάθος κοπής και η πρόωση ανά περιστροφή και δόντι. Το αξονικό βάθος κοπής μπορεί να παρατηρηθεί μόνο γνωρίζοντας την αρχική διάσταση του ύψους του τεμαχίου και αφότου μετρηθεί η απόσταση της μέγιστης κοιλάδας από τη βάση του τεμαχίου.

Στο ακόλουθο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε διαδοχικά βήματα προσομοίωσης όπου φαίνεται η σταδιακή δημιουργία της τελικής επιφάνειας αφότου έχει προηγηθεί η αξονική είσοδος του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο.



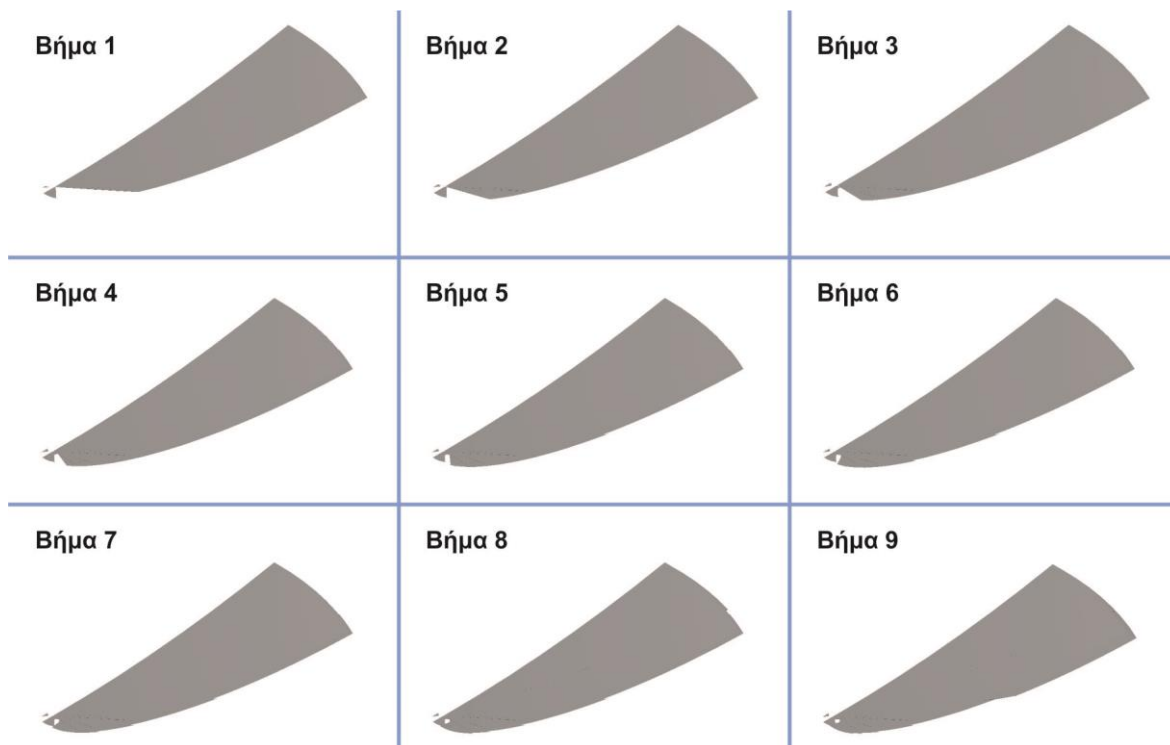
Σχήμα 3.15 Τοπομορφία τεμαχίου σε διαδοχικά περάσματα

### 3.6 Τρισδιάστατο απαραμόρφωτο απόβλιττο

Το απαραμόρφωτο απόβλιττο κατασκευάζεται σταδιακά. Για να δημιουργηθεί ένα απόβλιττο πρέπει να γίνει μια πλήρης περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονά του και παράλληλη μετατόπιση του κέντρου του κατά τιμή ίση με την πρόωση ανά περιστροφή. Στην περίπτωση όμως αυτή, καθ' ότι το εργαλείο μικρής διάστασης διαθέτει πάντοτε δύο αρχές, δημιουργούνται δύο πανομοιότυπα απόβλιττα. Άρα το αντιπροσωπευτικό απαραμόρφωτο απόβλιττο είναι αυτό που δημιουργείται σε περιστροφή του εργαλείου κατά  $180^\circ$  και απόσταση ίση με το μισό της πρόωσης ανά περιστροφή, δηλαδή ίση με την πρόωση ανά περιστροφή και δόντι.

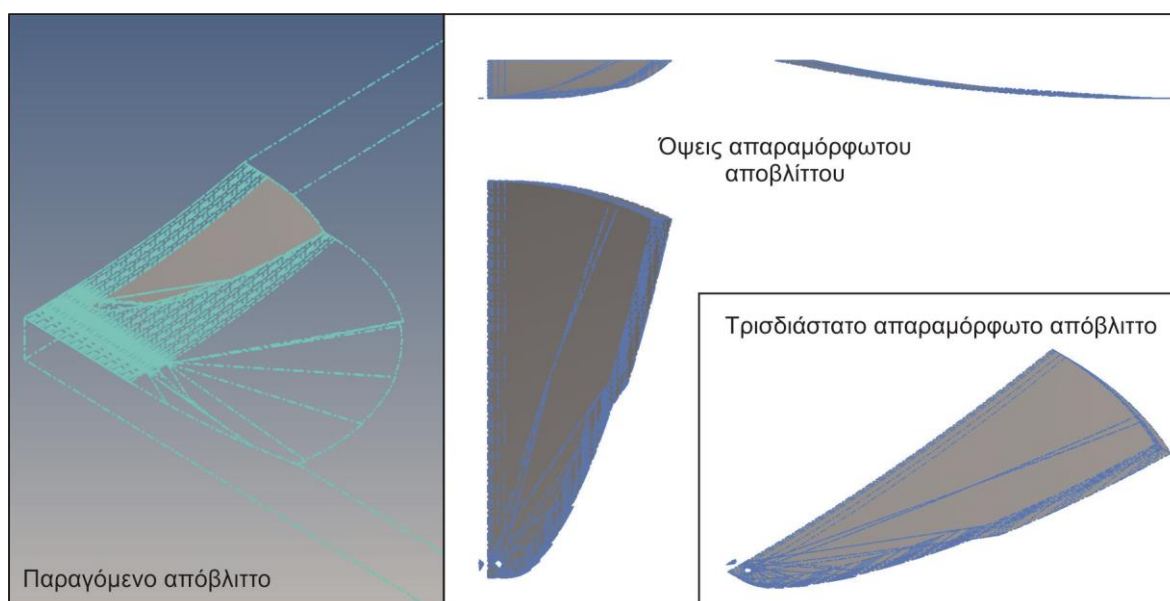
Η λογική τομή του εργαλείου με το τεμάχιο αποτελεί το στοιχειώδες απαραμόρφωτο απόβλιττο του κάθε βήματος. Η συνδεσμολογία όλων των στοιχειωδών αποβλίττων μισής περιστροφής του εργαλείου δημιουργεί το αντιπροσωπευτικό απαραμόρφωτο απόβλιττο

της κατεργασίας. Η διαδικασία ενοποίησης των στοιχειωδών αποβλίττων παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.16](#). Ο χρόνος και τα στάδια που απαιτούνται για τη δημιουργία του αποβλίττου εξαρτώνται από τις μοίρες διακριτοποίησης της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου που έχει ορίσει ο χρήστης πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.16 Διαδικασία δημιουργίας απαραμόρφωτου αποβλίττου

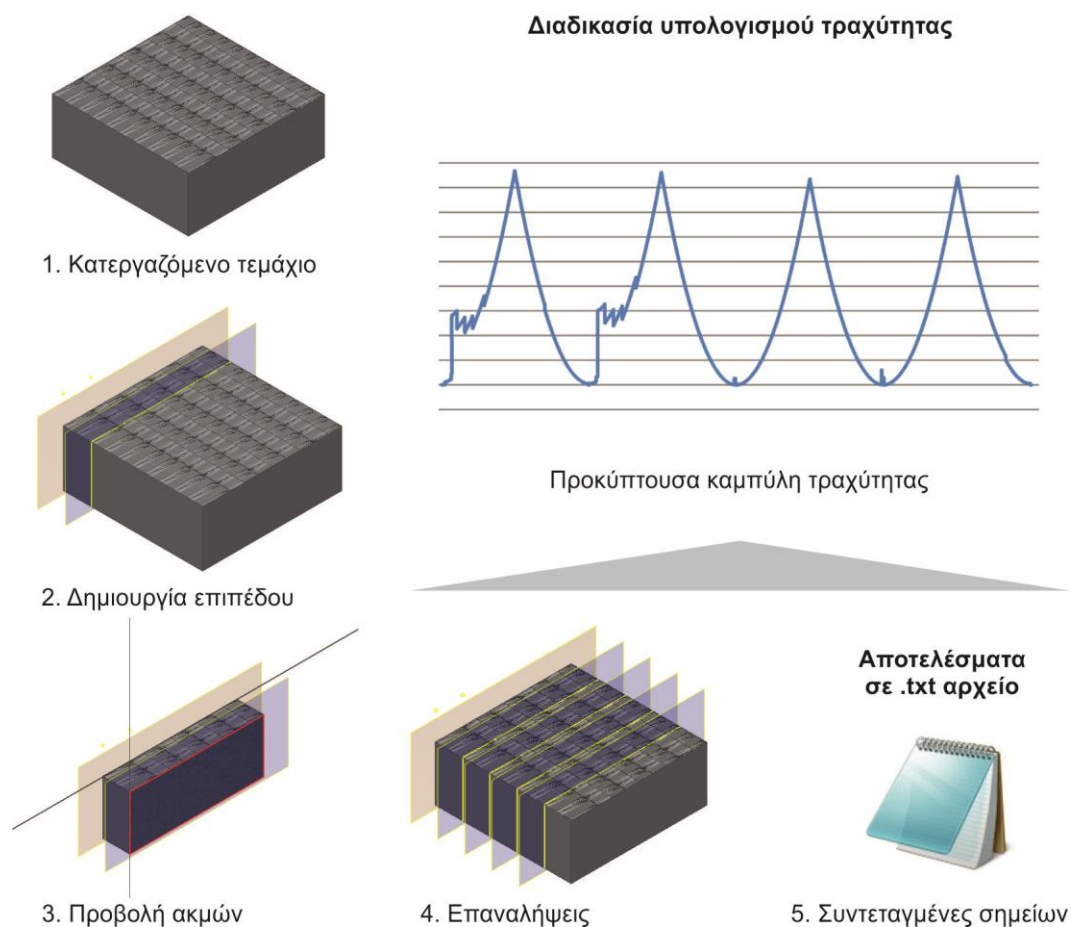
Καθ' ότι ο χρήστης έχει τρισδιάστατα αποθηκευμένο το απόβλιττο της κατεργασίας και την προκύπτουσα επιφάνεια συνεπάγεται ότι φέρει όλη τη γεωμετρική πληροφορία της κατεργασίας, πράγμα το οποίο μπορεί να τον οδηγήσει σε μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Μία τέτοιου είδους επεξεργασία αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της επιφανειακής τραχύτητας του τεμαχίου και για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στο [σχήμα 3.17](#) παρουσιάζονται οι όψεις 3D αποβλίττου.



Σχήμα 3.17 Όψεις συνολικού απαραμόρφωτου αποβλίττου

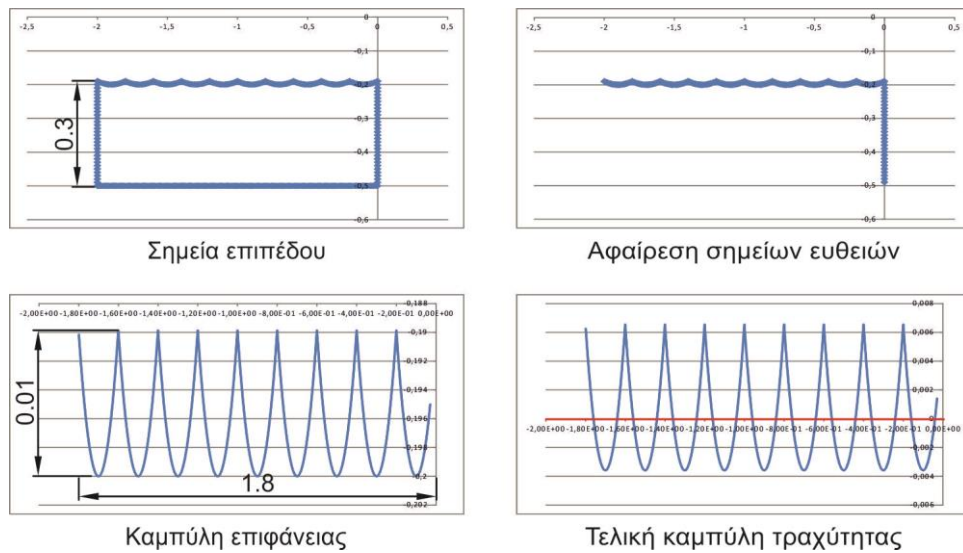
### 3.7 Υπολογισμός επιφανειακής τραχύτητας

Για να υπολογιστεί η επιφανειακή τραχύτητα αναπτύχθηκε κώδικας ο οποίος επιδρά πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια της προσομοίωσης. Αρχικά γίνεται φόρτωση του τελικού κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αφότου οριστεί το μήκος του τεμαχίου και ο αριθμός των μετρήσεων τραχύτητας υπολογίζονται οι ίσα κατανεμημένες αποστάσεις των μετρήσεων. Ξεκινώντας από την άκρη του τεμαχίου δημιουργείται ένα επίπεδο εργασίας πάνω στο οποίο με κατάλληλη εντολή γίνεται η αποτύπωση των σημείων της εγκάρσιας τομής, όπως στο σχήμα 3.18. Έπειτα, με τον καθορισμό ενός βήματος διακριτοποίησης λαμβάνονται οι συντεταγμένες όλων των σημείων στους δύο άξονες και αποθηκεύονται σε ένα αρχείο κειμένου της μορφής .txt. Η διαδικασία εξαγωγής σημείων συνεχίζεται και στα υπόλοιπα επίπεδα που έχουν δημιουργηθεί.



Σχήμα 3.18 Μεθοδολογία αποτύπωσης καμπύλης τραχύτητας

Αρχικά υπάρχει η πληροφορία όλων των σημείων του εκάστοτε επιπέδου. Αφότου αφαιρεθούν οι ευθείες, η καμπύλη που προκύπτει αποτελεί την κυμάτωση της επιφάνειας. Για τον υπολογισμό της καμπύλης της τραχύτητας χαράζεται η μέση γραμμή που βρίσκεται ως ο μέσος όρος όλων των σημείων. Η γραμμή αυτή χωρίζει την καμπύλη σε δύο χωρία, το επάνω και το κάτω, με ίδιο εμβαδό. Η απεικόνιση της μέσης γραμμής και της καμπύλης της τραχύτητας γίνεται και γραφικά. Όλη αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19 και επαναλαμβάνεται για το κάθε ξεχωριστό επίπεδο.

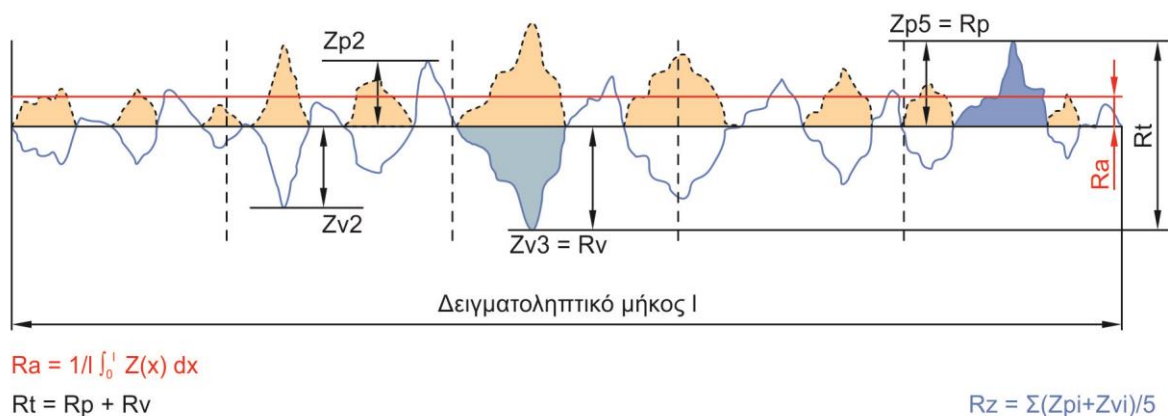


Σχήμα 3.19 Μετά-επεξεργασία δεδομένων για τον υπολογισμό παραμέτρων τραχύτητας

Έχοντας την καμπύλη της τραχύτητας είναι πλέον εφικτός ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων της τραχύτητας ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) εφαρμόζοντας τους τύπους υπολογισμού όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

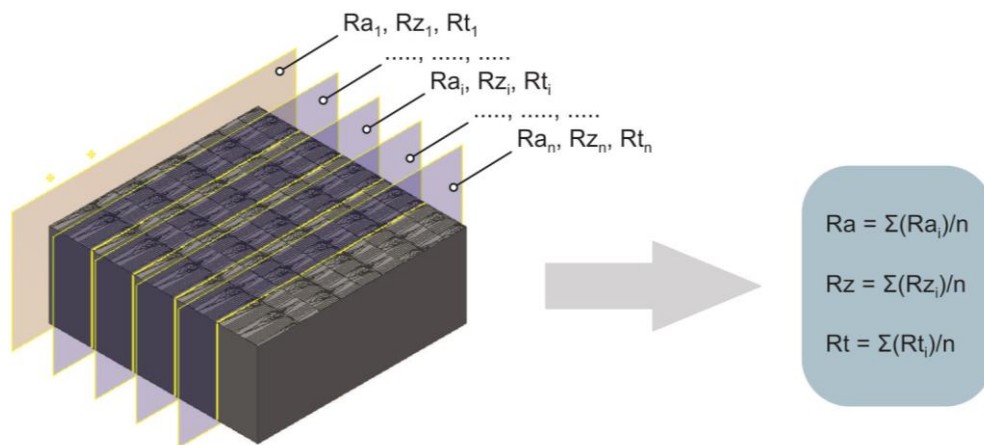
Παράμετρος	Ονομασία	Τύπος υπολογισμού
$R_a$	Μέσο αριθμητικό ύψος	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $
$R_z$	Μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα	$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i)$ $R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} (\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i)$
$R_t/R_{max}$	Μέγιστο ύψος του προφίλ	$R_t = R_p + R_v$

Ως μέσο αριθμητικό ύψος  $R_a$  υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών όλων των σημείων έχοντας ως σημείο αναφοράς την κεντρική γραμμή. Το μέγιστο ύψος του προφίλ υπολογίζεται ως το άθροισμα των τιμών της μέγιστης κορυφής και της μέγιστης κοιλάδας ενώ ως μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα καλείται η μέση τιμή των διαφορών κορυφής – κοιλάδας σε πέντε ισοκατανεμημένες περιοχές του μήκους της καμπύλης (σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20 Βασικές παράμετροι τραχύτητας

Με τον τρόπο που προαναφέρθηκε υπολογίστηκαν οι παράμετροι της τραχύτητας σε συγκεκριμένες αποστάσεις, πάνω στο επίπεδα που τέμνουν εγκάρσια το κατεργαζόμενο τεμάχιο (σχήμα 3.21). Για τον υπολογισμό όμως των παραμέτρων της τραχύτητας της επιφάνειας χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των τιμών των διαδοχικών τραχυμετρήσεων.

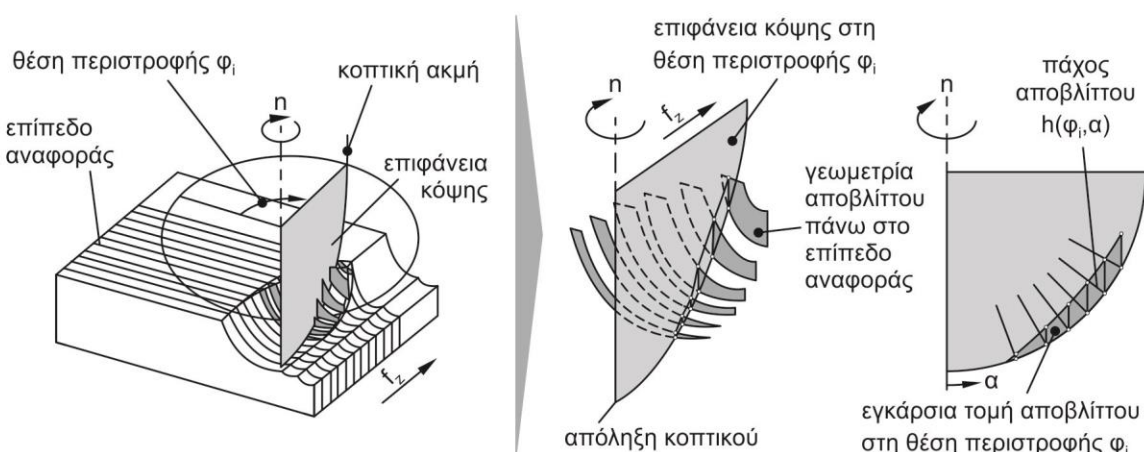


Σχήμα 3.21 Υπολογισμός παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας

### 3.8 Υπολογισμός δυνάμεων κοπής

Οι δυνάμεις κοπής υπολογίζονται από την επεξεργασία του αντιπροσωπευτικού απαραμόρφωτου αποβλίττου της κοπής σε ένα ενδιάμεσο βήμα της προσομοίωσης. Τα βήματα του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε επεξηγούνται με λεπτομέρεια ακολούθως.

Αρχικά ανοίγει μέσα από το σύστημα CAD το τρισδιάστατο απαραμόρφωτο απόβλιττο. Στη συνέχεια κατασκευάζονται κάθετα επίπεδα σε διάφορες γωνίες περιστροφής τα οποία χωρίζουν σε τμήματα το απόβλιττο. Στην τομή του κάθε επιπέδου με το απόβλιττο προβάλλεται η γεωμετρία του αποβλίττου. Η επιφάνεια αυτή φέρει τη μορφή τμήματος μηνίσκου και αποτελεί την εξεταζόμενη περιοχή από την οποία απορρέουν οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στις συγκεκριμένες μοίρες περιστροφής (σχήμα 3.22).

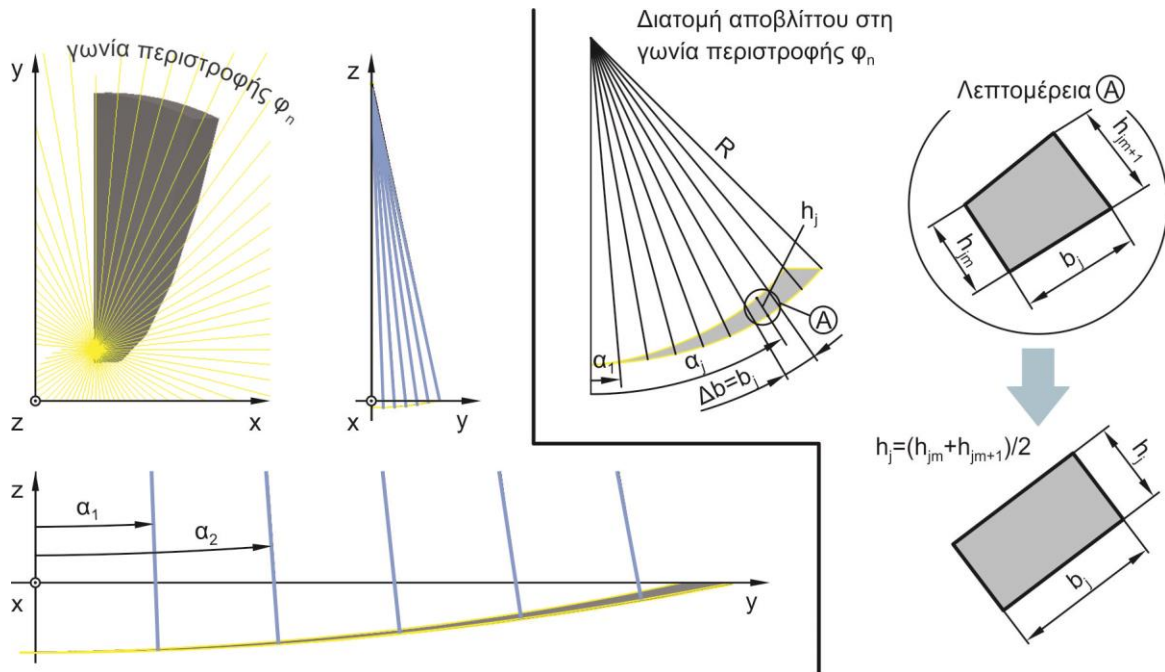


Σχήμα 3.22 Διαδικασία κατασκευής στοιχειώδους αποβλίττου ανά γωνία περιστροφής

Η περιοχή αυτή στη συνέχεια χωρίζεται σε ακόμη μικρότερα τμήματα που προκύπτουν από τη σχεδίαση ευθειών-ακτινών που έχουν ως αρχή το κέντρο του εργαλείου. Κάθε ευθεία τέμνει την πάνω και κάτω επιφάνεια του αποβλίττου σχηματίζοντας τετράπλευρα.



Το κάθε τετράεδρο μετασχηματίζεται σε ένα προσεγγιστικό παραλληλόγραμμο θέτοντας τη μία πλευρά ως το στοιχειώδες πλάτος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου  $b_i$  και την άλλη ως το μέσο όρο των ακραίων τιμών του πάχους του αποβλίπτου  $h_i$  (σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23 Υπολογισμοί στοιχειωδών δυνάμεων πάνω στην επιφάνεια της κόψης

Με τη χρήση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, πλάτους και πάχους του στοιχειώδους απαραμόρφωτου αποβλίπτου, υπολογίζονται οι τρεις κάθετες συνιστώσες δύναμης  $F_{ci}$ ,  $F_{ti}$  και  $F_{ni}$  για το εκάστοτε τετράπλευρο σύμφωνα με την εκθετική σχέση των Kienzle και Victor. Με βάση τη σχέση αυτή, οι δυνάμεις κοπής στο σύστημα της κόψης εξαρτώνται εκθετικά από το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και γραμμικά από το πλάτος του. Οι τρεις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής με βάση αυτό το μοντέλο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_c = b \cdot k_{c1.1} \cdot h^{1-z} \quad (3.1)$$

$$F_t = b \cdot k_{t1.1} \cdot h^{1-y} \quad (3.2)$$

$$F_n = b \cdot k_{n1.1} \cdot h^{1-x} \quad (3.3)$$

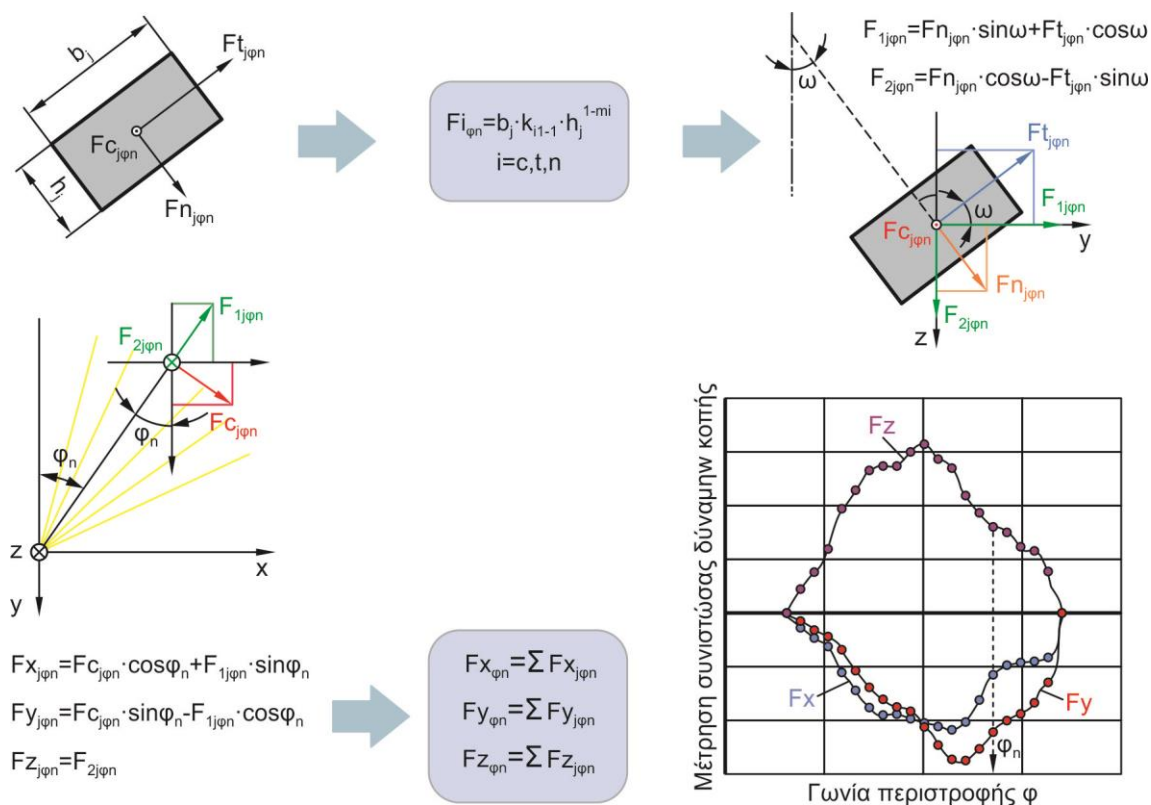
όπου:

$F_c$	συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην ταχύτητα κοπής [N]
$F_t$	συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην κοπτική ακμή [N]
$F_n$	συνιστώσα δύναμης κοπής κάθετα στις $F_c$ και $F_t$ [N]
$b$	πλάτος αποβλίπτου [mm]
$h$	πάχος αποβλίπτου [mm]
$k_{c1.1}, k_{t1.1}, k_{n1.1}$	ειδική αντίσταση κοπής [N/mm <sup>2</sup> ]
$z, x, y$	σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής ορίζονται ως η δύναμη η οποία απαιτείται για την κοπή απαραμόρφωτου αποβλίπτου με πάχος και πλάτος ίσο με 1mm. Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής προσδιορίζονται πειραματικά και μεταβάλλονται ανάλογα με το υλικό, τις γωνίες κοπής του κοπτικού εργαλείου και την ταχύτητα κοπής.

Οι συνολικές δυνάμεις  $F_c$ ,  $F_t$  και  $F_n$  για τη συγκεκριμένη θέση περιστροφής υπολογίζονται αθροίζοντας διανυσματικά τις επιμέρους συνιστώσες. Ο μετασχηματισμός των δυνάμεων

για τον υπολογισμό των συνιστωσών δύναμης στους τρεις κύριους άξονες γίνεται με την εφαρμογή τριγωνομετρικών σχέσεων που αναλύονται στο ακόλουθο σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24 Μετασχηματισμός δυνάμεων κοπής στους τρεις κύριους άξονες

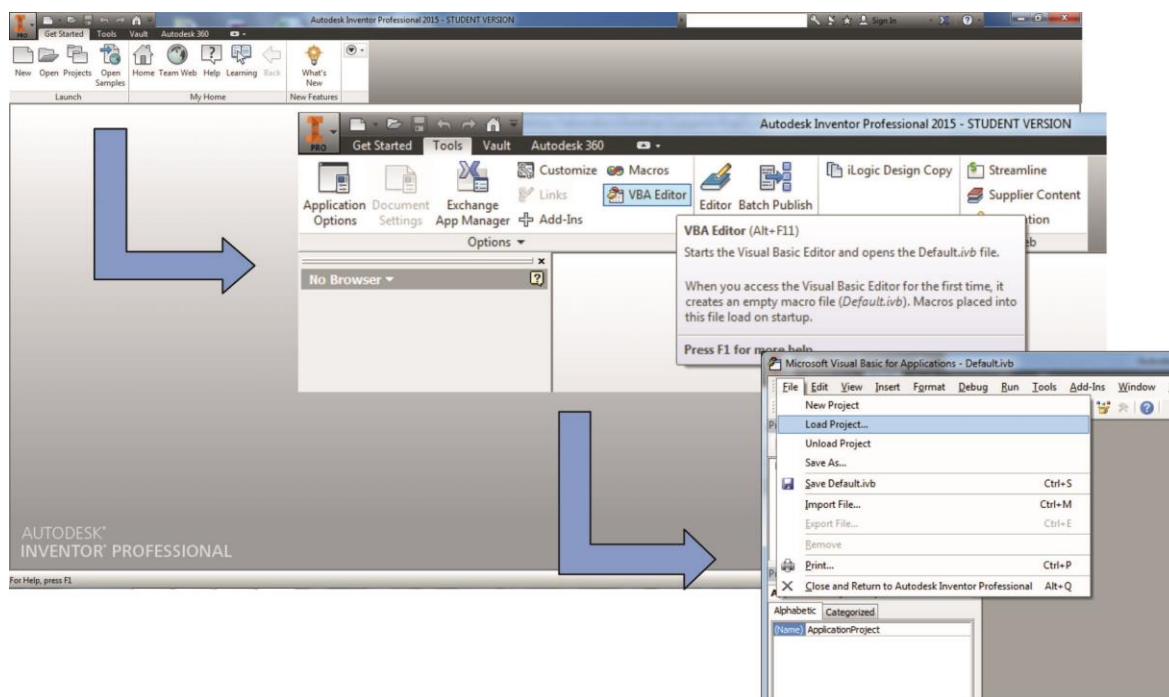
Από την ανάλυση των δυνάμεων στους τρεις άξονες για κάθε τμήμα της επιφάνειας του αποβλήτου προκύπτουν οι συνολικές δυνάμεις των τριών αξόνων ως άθροισή τους. Εφόσον ο υπολογισμός γίνεται για κάθε θέση περιστροφής, εύκολα μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα γωνίας περιστροφής με τις συνισταμένες δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$ .

Τα διαγράμματα των δυνάμεων κοπής δίνουν μια πιο άμεση εικόνα για την εξέλιξη τους κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και εύκολα διακρίνονται οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών της κάθε δύναμης κοπής. Παράλληλα παρουσιάζεται η εξέλιξη της δύναμης που είναι ανάλογη της γεωμετρίας του αποβλήτου σε μορφή όμοια με αυτή που προβάλλεται εντός μιας δυναμομέτρησης.

### 3.9 Δημιουργία και εκτέλεση φόρμας εισαγωγής δεδομένων

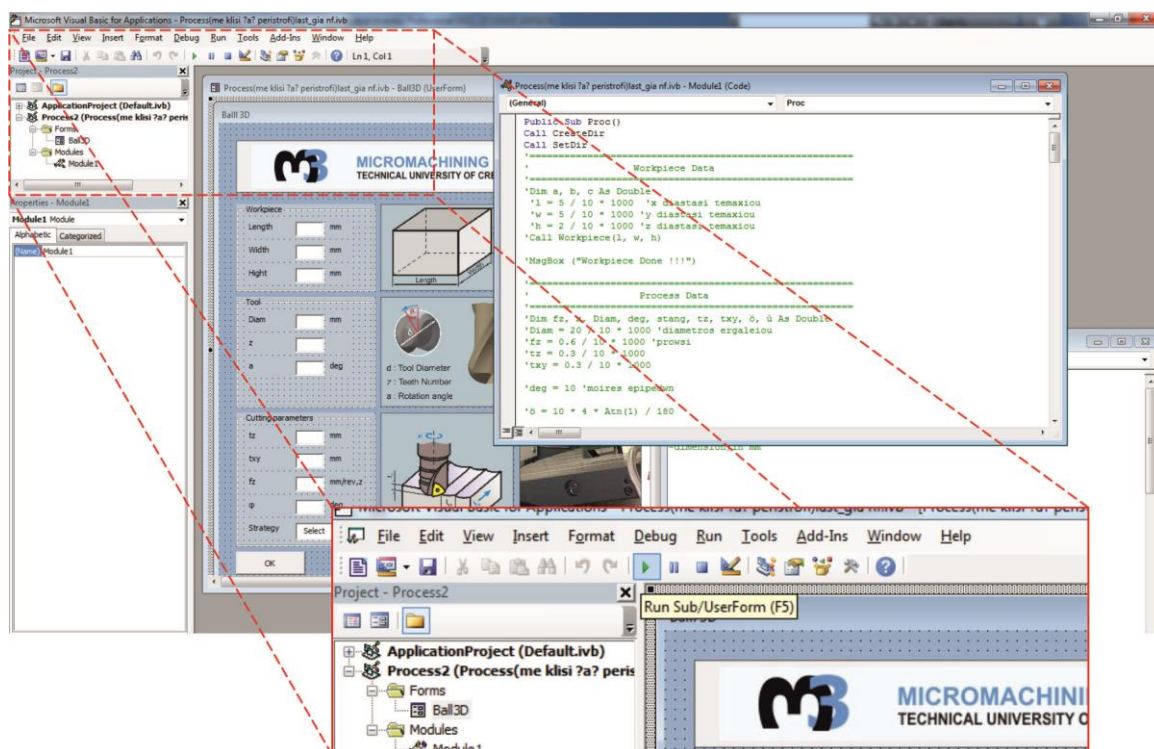
Για την εύκολη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης αναπτύχθηκε μια φόρμα εισαγωγής δεδομένων. Ο κώδικας προσομοίωσης της κατεργασίας έγινε στο περιβάλλον του Autodesk Inventor, μέσα από το οποίο τρέχει και η προσομοίωση της κατεργασίας. Για να εκτελεστεί ο κώδικας μέσω του προγράμματος ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια:

Αρχικά ανοίγει το πρόγραμμα Inventor και μέσα από το μενού πλοήγησης επιλέγεται η καρτέλα Tools. Από εκεί επιλέγοντας το εικονίδιο VBA Editor ανοίγει το παράθυρο προγραμματισμού όπου από το μενού File επιλέγεται η εντολή φόρτωσης αρχείου Load Project. Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στο σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.25 Περιβάλλον Autodesk Inventor

Από τα παράθυρα που ανοίγουν επιλέγεται αυτό της φόρμας που έχει δημιουργηθεί και πατώντας το πλήκτρο Run εκτελείται η φόρμα εισαγωγής δεδομένων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26 Εκτέλεση φόρμας και κώδικα

Έπειτα η φόρμα προσομοίωσης είναι έτοιμη να δεχθεί τα δεδομένα προσομοίωσης από το χρήστη. Ο χρήστης εισάγει τα επιθυμητά δεδομένα και με τη χρήση του κουμπιού επιβεβαίωσης δίνει την εντολή έναρξης της διαδικασίας προσομοίωσης. Στο σχήμα 3.27 προβάλλεται η τελική μορφή της φόρμας εισαγωγής δεδομένων.

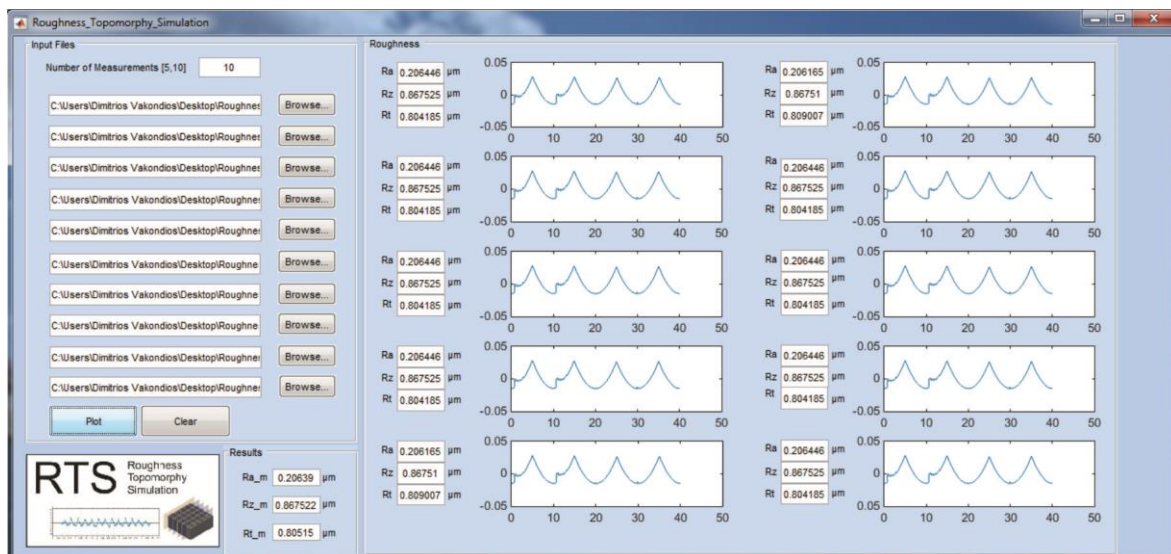




Σχήμα 3.27 Φόρμα μοντέλου προσομοίωσης Ball 3D

Η κύρια φόρμα του λογισμικού χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Στην πρώτη περιοχή ο χρήστης ορίζει τις διαστάσεις του τεμαχίου, ενώ στη δεύτερη ορίζει τη διάμετρο, τον αριθμό κοπτικών ακμών και τις μοίρες διακριτοποίησης της περιστροφής του εργαλείου. Στην τρίτη και τελευταία περιοχή καθορίζονται οι τιμές των συνθηκών κοπής καθώς και της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το πρόγραμμα αλληλεπιδρά με το χρήστη εμφανίζοντας αντίστοιχο μήνυμα κάθε φορά που έχει ολοκληρώσει μια συγκεκριμένη διαδικασία.

Αντίστοιχο περιβάλλον φόρμας αναπτύχθηκε και για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της τραχύτητας (σχήμα 3.28) και των δυνάμεων (σχήμα 3.29) με τη χρήση του MATLAB. Τα λογισμικά πακέτα που δημιουργήθηκαν αποτελούν αυτόνομα εκτελέσιμες εφαρμογές προσφέροντας τη δυνατότητα χρήσης τους για δεδομένα τα οποία δεν έχουν προέλθει από το μοντέλο προσομοίωσης.

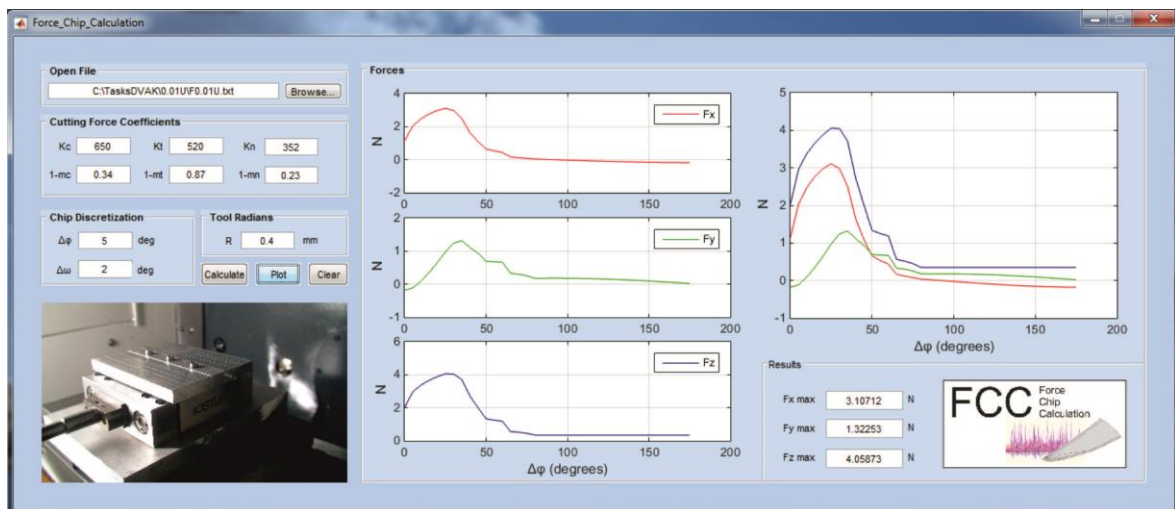


Σχήμα 3.28 Φόρμα παραμέτρων τραχύτητας

Στη φόρμα υπολογισμού των κύριων παραμέτρων της τραχύτητας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των διαδοχικών μετρήσεων του προφίλ επιφάνειας που

θα εισάγει. Ως ελάχιστος αριθμός ορίστηκαν οι πέντε τραχυμετρήσεις και μέγιστος οι δέκα. Με την εισαγωγή του αριθμού ενεργοποιούνται τα αντίστοιχα κελιά εύρεσης των αρχείων ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση προβάλλεται μήνυμα σφάλματος. Η εκτέλεση της εφαρμογής έχει ως αποτέλεσμα τη γραφική αναπαράσταση της τραχύτητας στις διαδοχικές θέσεις μέτρησης καθώς και τον υπολογισμό των κύριων παραμέτρων τραχύτητας του κάθε αρχείου. Παράλληλα υπολογίζονται και οι παράμετροι της συνολικής επιφάνειας.

Για τον υπολογισμό των μέγιστων δυνάμεων κοπής αναπτύχθηκε μια άλλη φόρμα όπου ομοίως εισάγεται ένα αρχείο κειμένου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή απαραίτητη είναι η εισαγωγή των ειδικών αντιστάσεων κοπής και των σταθερών κατεργαζόμενου υλικού από το χρήστη. Επίσης, εισάγεται η ακτίνα του κοπτικού εργαλείου και οι γωνίες διακριτοποίησης του αποβλίπτου  $\Delta\phi$  και  $\Delta\omega$ . Δίνοντας την εντολή υπολογισμού αποτυπώνονται οι καμπύλες των κύριων συνιστωσών των δυνάμεων κοπής ανά γωνία περιστροφής και προβάλλονται οι τιμές των μέγιστων τιμών τους.



Σχήμα 3.29 Φόρμα δυνάμεων κοπής







## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Για την επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων διεξήχθησαν πειράματα κοπής με υψηλόστροφο περιστροφικό τσοκ και εργαλεία διαμέτρου μικρότερης του 1mm σε διάφορες συνθήκες κοπής. 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.

### 4.2 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.

#### 4.2.1 Υλικό κατεργασίας

Το υλικό που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι το Al7075-T651. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή δομικών εξαρτημάτων κυρίως στην αεροναυπηγικές εφαρμογές. Η αεροναυπηγική βιομηχανία απαιτεί υλικά που έχουν υψηλή αντοχή και εύκολη, όσο είναι δυνατόν, κατεργασιμότητα. Το κράμα Αλουμινίου Al7075 θερμικής κατεργασίας T651 συνδυάζει υψηλή αντοχή, μέση σκληρότητα και αντίσταση στη διάβρωση και για αυτό το λόγο προτιμάται στη βιομηχανία κατασκευής δομικών εξαρτημάτων.

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

Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του Al7075-T651 παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 4.1.

Χημική σύσταση Al7075-T6 (wt.%)

Si.....	0.40	Mg.....	2.1-2.9
Fe.....	0.50	Cr.....	0.18-0.28
Cu.....	1.2-2.0	Zn.....	5.1-6.1
Mn.....	0.30	Ti.....	0.20

Μηχανικές ιδιότητες

	Πάχος in. (mm)	Αντοχή σε εφελκυσμό ksi (MPa)	Όριο διαρροής ksi (MPa)	Επιμήκυνση %
Al7075-T651 φύλλο	0.008-0.249 (0.203-6.32)	74-78 (510-538)	63-69 (434-476)	5-8

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες Al7075-T651

#### 4.2.2 Εργαλειομηχανή DMU 50 eco

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο κέντρο κατεργασίας της Deckel Maho DMU 50 eco, το οποίο καθοδηγείται με ψηφιακή καθοδήγηση Siemens 810D. Στην κοπή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν κοπτικά εργαλεία σφαιρικής απόληξης διαμέτρου D1, D0.8, D0.6 και D0.5 σε συγκεκριμένες ταχύτητες κοπής. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κονδύλια καρβιδίων.

Το κέντρο κατεργασίας γενικής χρήσης CNC DMU 50 eco (σχήμα 4.1) είναι εξοπλισμένο με ισχυρή άτρακτο για στροφές μέχρι 8.000rpm και χαρακτηριστικά: 83Nm (40% ED), ισχύς ατράκτου 13kW (40% ED) και 12m/min γρήγορη μετακίνηση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι του καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύ σύνθετων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°. Ο εργαλειοφορέας με 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διαφόρων εργασιών φραιζαρίσματος. Η κατασκευή είναι με χυτοσίδηρο σκελετό για μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών. Τέλος το εργονομικό DMG SLIMline® Panel με οθόνη TFT 15", SIEMENS 810D powerline και λογισμικό ShopMill καθιστούν δυνατό τον απλό προγραμματισμό αλλά και την τρισδιάστατη προσομοίωση.



Σχήμα 4.1 Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco

#### 4.2.3 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης

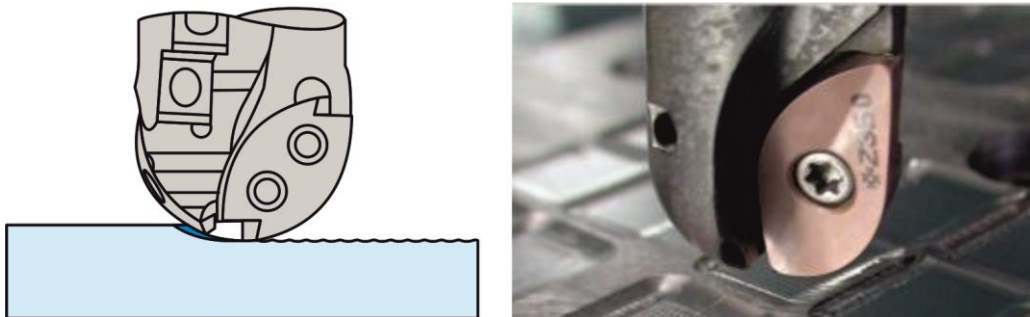
Τα εργαλεία σφαιρικής απόληξης (ball-end mills) είναι ιδανικά για μηχανουργικές κατεργασίες αποπεράτωσης σε τρεις κατευθύνσεις, όπως καλούπια και μήτρες. Χρησιμοποιούνται επίσης σε επιφάνειες που είναι κάθετες μεταξύ τους, για να δημιουργηθεί κοίλη επιφάνεια έτσι ώστε να μειωθούν συγκεντρωμένες τάσεις. Παράδειγμα εργαλείου σφαιρικής απόληξης παρουσιάζεται στο [σχήμα 4.2](#).

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

Ένα άλλο πλεονέκτημα του τρόπου σχεδίασης ενός κοπτικού με σφαιρική απόληξη, είναι ότι μπορεί να υποστεί πολύ ψηλές τιμές πρόωσης, που σημαίνει ότι μπορεί να

κατεργαστεί το υλικό πολύ γρήγορα. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη παραγωγικότητα και ευρεία χρήση στις σημερινές απαιτητικές εφαρμογές. Επίσης, η καλή γεωμετρία της κοπτικής ακμής μεταφράζεται σε χαμηλότερες δυνάμεις, γεγονός το οποίο δίνει στο κοπτικό εργαλείο πρόσθετη αντοχή κάτω από συνθήκες πίεσης. Καθώς είναι λιγότερο πιθανό να σπάσει υπό κανονικές δυνάμεις, το κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης είναι πολύ αποδοτικό από πλευράς κόστους για τις εφαρμογές τις οποίες είναι κατάλληλο.

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



Σχήμα 4.2 Εργαλείο σφαιρικής απόληξης

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

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

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4.1)$$

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

$$f = f_z \cdot z \cdot n \quad (4.2)$$

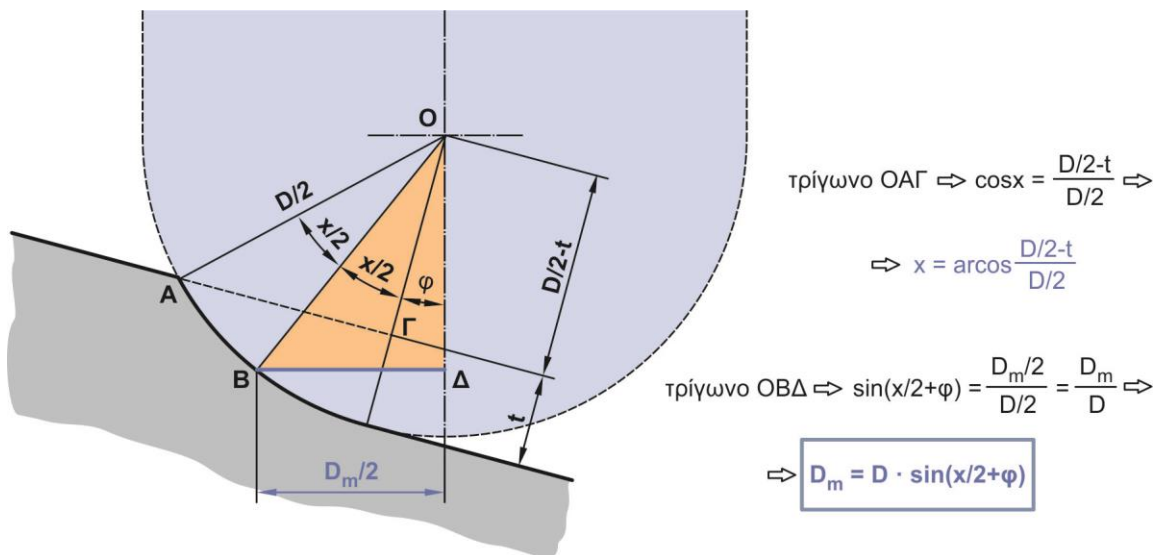
όπου  $f_z$  είναι η πρόωση ανά δόντι και  $z$  ο αριθμός των δοντιών του κοπτικού που λαμβάνουν μέρος κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού.

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

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{1000} \quad (4.3)$$

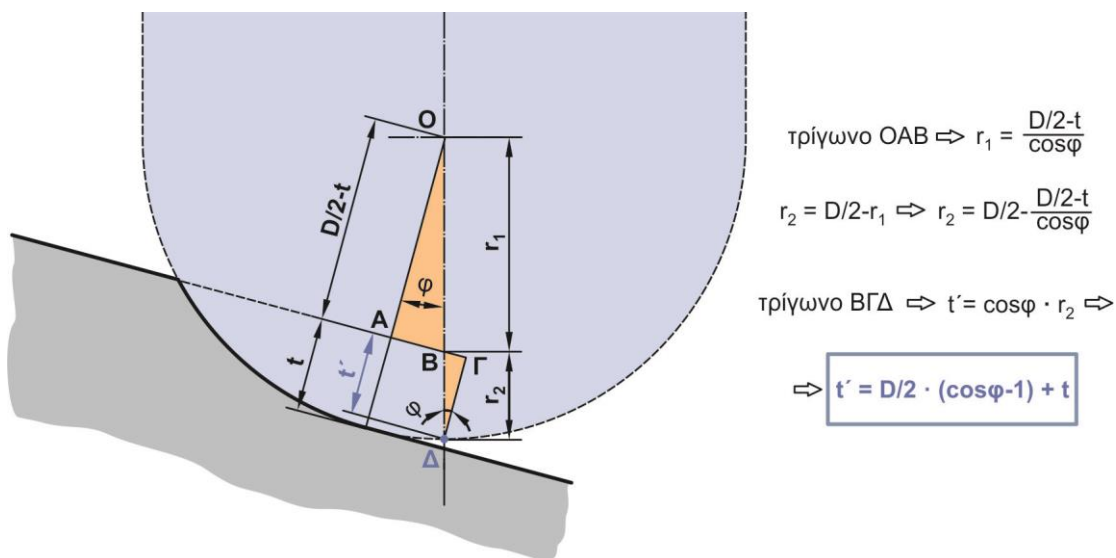
Η ενεργή διάμετρος υπολογίζεται με βάση το τόξο επαφής του εργαλείου στο τεμάχιο κατεργασίας και προφανώς διαφέρει στην περίπτωση που το εργαλείο βρίσκεται σε κάθετη θέση πάνω από το τεμάχιο ή σε κάποια άλλη κεκλιμένη θέση πλάγιας γωνίας.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ενεργής διαμέτρου στη γενική περίπτωση όπου υπάρχει κλίση  $\varphi$  σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το κάθετο φραιζάρισμα αποτελεί ειδική περίπτωση όπου η γωνία  $\varphi$  ισούται με μηδέν.



Σχήμα 4.3 Υπολογισμός ενεργής διαμέτρου σε φραιζάρισμα με κλίση  $\varphi$

Η θέση του κοπτικού εργαλείου που προγραμματίζεται στην εργαλειομηχανή εξαρτάται από την κλίση του κοπτικού ή του τεμαχίου, ανάλογα με το αν κινείται το κοπτικό ή η τράπεζα της εργαλειομηχανής. Ο υπολογισμός του άκρου του κοπτικού εργαλείου κατά τη z διεύθυνση παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Υπολογισμός προγραμματίσιμου σημείου στον άξονα z

Ένα φύλλο εργασίας του excel χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων παραμέτρων των πειραμάτων. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται οι παράγοντες της κοπής και η ακτίνα του εργαλείου. Μέσα από ενδιάμεσους υπολογισμούς προκύπτει η προγραμματιζόμενη ταχύτητα περιστροφής και η πρόωση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.



BALL MILL

Inputs

r0.5mm

x/20.1rad

Dm/20.05mm

Dmean0.1mm

r<sub>1</sub>0.49mm

r<sub>2</sub>0.01mm

φ0deg

φ0rad

v<sub>c</sub>7m/min

f<sub>z</sub>0.01πρόωση/δόντι

z2αριθμός δοντιών

Outputs

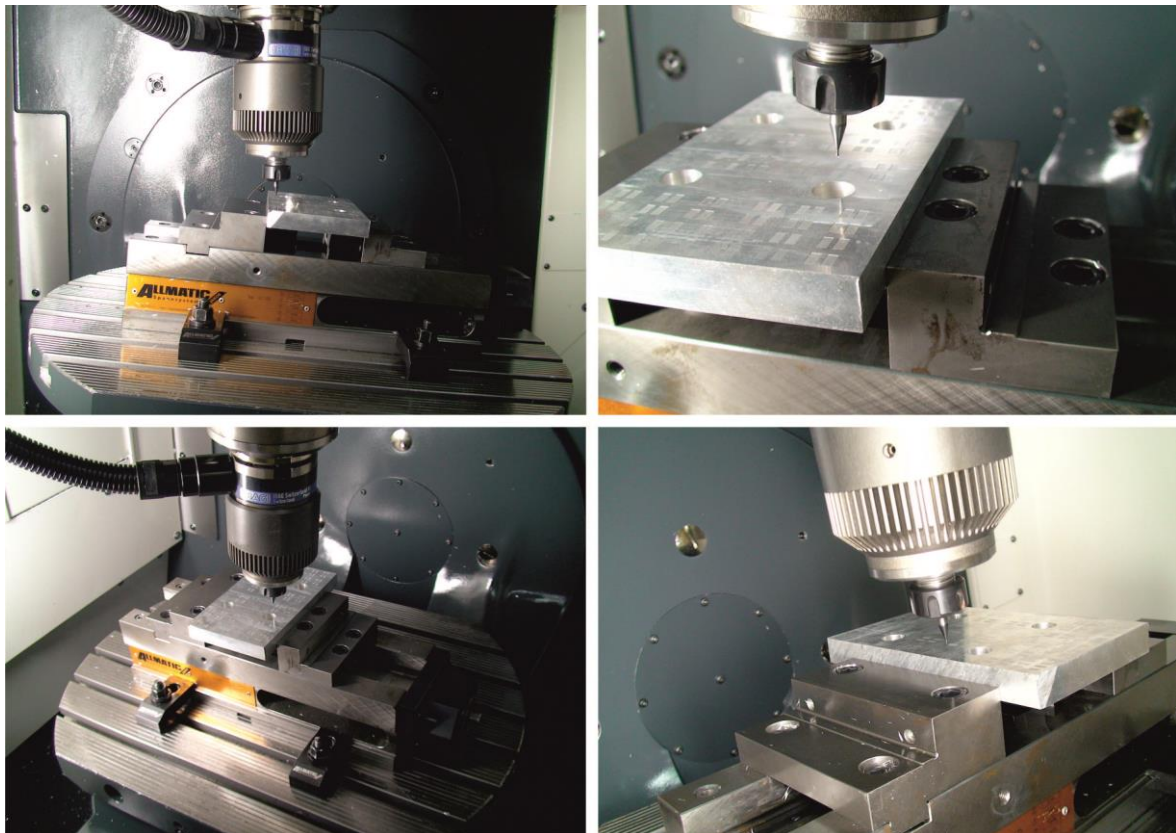
t<sub>z</sub>'0.01mm

S22281.7rpm

F445.6mm/min

Σχήμα 4.5 Πίνακας υπολογισμού παραμέτρων

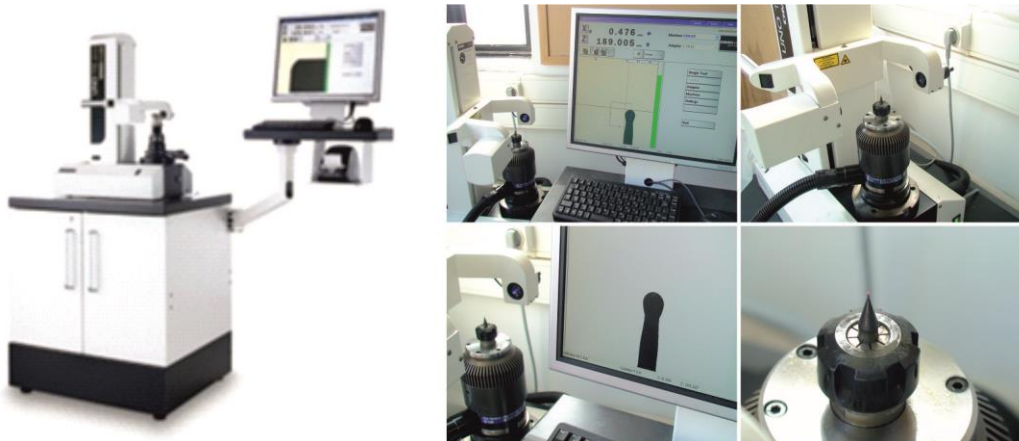
Η κατεργασία της κοπής έγινε, τόσο σε κάθετο, όσο και σε υπό κλίση φραιζάρισμα. Στο παρακάτω σχήμα 4.6 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από χαρακτηριστικές θέσεις κατεργασίας του δοκιμίου πειραμάτων. Ανάλογα με την τοποθέτηση του τεμαχίου και την γραμμική μετακίνηση του εργαλείου εφαρμόστηκαν οι στρατηγικές κοπής.



Σχήμα 4.6 Στιγμιότυπα κατεργασίας με διάφορες στρατηγικές

#### 4.2.4 Συσσκευή προρύθμισης εργαλείων

Στις κατεργασίες με εργαλειομηχανές ψηφιακής καθοδήγησης σημαντικό παράγοντα για τη σωστή τοποθέτηση των κοπτικών εργαλείων αποτελεί η ακριβής μέτρηση του μήκους και της ακτίνας του κοπτικού. Η συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG Microset (σχήμα 4.7) προσφέρει σημαντική οικονομία χρόνου και ακρίβεια στις μετρήσεις των εργαλείων και την έγκαιρη αναγνώριση φθαρμένων εργαλείων.



Σχήμα 4.7 Συσσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 eco

Η συσκευή εργάζεται με το λογισμικό Microvision II IT και διαθέτει: Edge finder για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, στιβαρή κατασκευή της βάσης από χυτό, πνευματική σύσφιξη και στους 2 άξονες, ελεύθερα κινούμενους γραμμικούς οδηγούς και CMOS ψηφιακή κάμερα με τηλεσκοπικούς φακούς.

Οι τιμές της ακτίνας και του μήκους του εργαλείου εισάγονται στη βάση δεδομένων της μηχανής έτσι ώστε το εργαλείο να είναι έτοιμο προς χρήση.

#### 4.2.5 Περιστροφικό υψηλόστροφο τσοκ μικροφραιζαρίσματος

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό υψηλόστροφο τσοκ μικροφραιζαρίσματος καθ' ότι η μικρή διάμετρος των εργαλείων οδηγεί σε υψηλές τιμές ταχύτητας περιστροφής.

Το IBAG HFK95 (σχήμα 4.8) έχει σχεδιαστεί ειδικά για μηχανές με αυτόματη αλλαγή εργαλείου. Περιλαμβάνει μόνιμα αυτολιπαινόμενα έδρανα κύλισης και η ψύξη του γίνεται με πεπιεσμένο αέρα. Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου γίνεται με τη χρήση ενός περιστροφικού διακόπτη στον εναλλάκτη στροφών με τον οποίο επικοινωνεί.



Σχήμα 4.8 Περιστροφικό υψηλόστροφο τσοκ μικροφραιζαρίσματος IBAG HFK 95

### 4.3 Σχεδιασμός - Εκπόνηση πειραμάτων

Η εκτέλεση των πειραμάτων έγινε σε δύο κύρια στάδια: Αρχικά εκπονήθηκαν πειράματα κατεργασίας επιφάνειας υπό διάφορες συνθήκες και στρατηγικές φραιζαρίσματος ενώ ύστερα ακολούθησαν πειράματα ελέγχου των δυνάμεων κοπής. Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού μηχανημάτων και λογισμικού. Στο [σχήμα 4.9](#) παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.9 Διαδικασία πειραμάτων

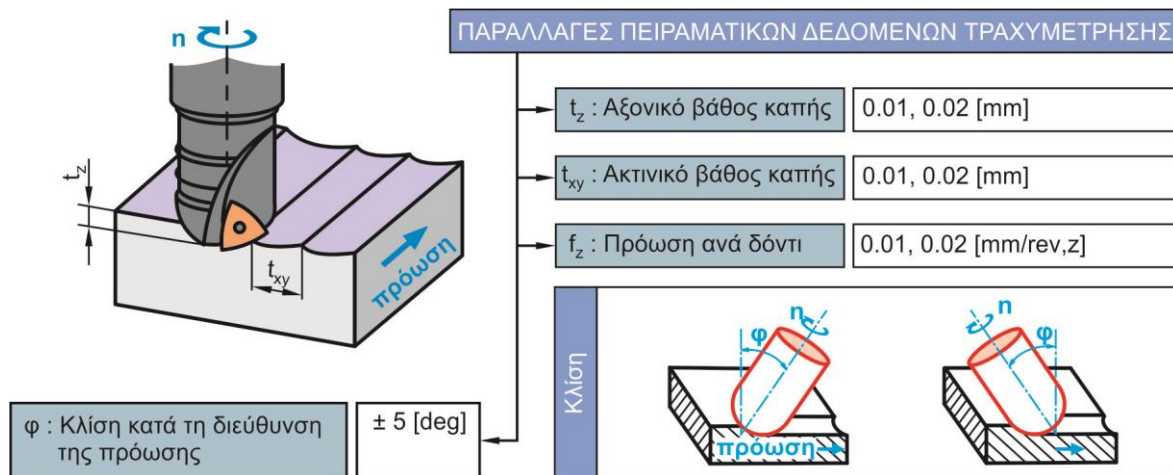
Στα πειράματα τραχυμέτρησης χρησιμοποιήθηκε πλάκα κράματος Αλουμινίου Al70175-T651, στην οποία έγινε κατεργασία ορθογωνίων παραλληλογράμμων μικρού και ίσου μεγέθους 3x6mm. Το μέγεθος του ορθογωνίου επιλέχτηκε έτσι ώστε να προκύπτει ένα αξιόλογο εμβαδόν επιφάνειας ώστε να μπορεί να γίνει τραχυμέτρηση, στερεοσκόπηση και να μην διαρκεί αρκετή ώρα η κατεργασία. Κάθε ορθογώνιο αναπαριστά ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων συνθηκών κοπής.

Για την επαλήθευση του μοντέλου έγινε χρήση τριών μικρο-εργαλείων φραιζαρίσματος σφαιρικής απόληξης διαμέτρων 1, 0.8 και 0,6mm. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις στατηγικές φραιζαρίσματος κάθετο, διατρητικό 5° και ελκτικό 5°, τόσο στο αντίρροπο, όσο και στο ομόρροπο φραιζάρισμα. Οι τιμές του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής ήταν 0.01 και 0.02mm ενώ τιμές της πρόωσης ήταν 0.01 και 0.02mm/rev,z. Στο σχεδιασμό των πειραμάτων επιλέχθηκε το πλήρες παραγοντικό έτσι ώστε να αξιολογηθούν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων κοπής. Ο συνδυασμός των τιμών αυτών έχει ως αποτέλεσμα 144 πειράματα.

$$3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 144 \text{ πειράματα}$$

Οι συνθήκες κατεργασίας που εφαρμόστηκαν εμφανίζονται συνοπτικά στο [σχήμα 4.10](#). Οι τιμές των συνθηκών προέκυψαν βασισμένες στα όρια λειτουργίας που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία των κοπτικών εργαλείων ενώ η ταχύτητα περιστροφής του υψηλού περιστροφικού τσοκ καθορίστηκε με βάση τη διάμετρο του κάθε κοπτικού εργαλείου.





Σχήμα 4.10 Συνθήκες κατεργασίας πειραμάτων τραχύτητας

Η χωροθέτηση των πειραμάτων στο τεμάχιο κατεργασίας ανάλογα με τις συνθήκες κοπής και το κοπτικό εργαλείο παρουσιάζονται στο [σχήμα 4.11](#).

	Κοπτικό εργαλείο $\varnothing 1$	Κοπτικό εργαλείο $\varnothing 0,8$	Κοπτικό εργαλείο $\varnothing 0,6$																								
	$t_{z1}$ $f_{z1}$ $f_{z2}$	$t_{z1}$ $f_{z1}$ $f_{z2}$	$t_{z1}$ $f_{z1}$ $f_{z2}$																								
$\Phi_1$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td><td>7</td><td>8</td></tr></table>	1	2	5	6	3	4	7	8	<table border="1"><tr><td>49</td><td>50</td><td>53</td><td>54</td></tr><tr><td>51</td><td>52</td><td>55</td><td>56</td></tr></table>	49	50	53	54	51	52	55	56	<table border="1"><tr><td>97</td><td>98</td><td>101</td><td>102</td></tr><tr><td>99</td><td>100</td><td>103</td><td>104</td></tr></table>	97	98	101	102	99	100	103	104
1	2	5	6																								
3	4	7	8																								
49	50	53	54																								
51	52	55	56																								
97	98	101	102																								
99	100	103	104																								
$\Phi_2$	<table border="1"><tr><td>9</td><td>10</td><td>13</td><td>14</td></tr><tr><td>11</td><td>12</td><td>15</td><td>16</td></tr></table>	9	10	13	14	11	12	15	16	<table border="1"><tr><td>57</td><td>58</td><td>61</td><td>62</td></tr><tr><td>59</td><td>60</td><td>63</td><td>64</td></tr></table>	57	58	61	62	59	60	63	64	<table border="1"><tr><td>105</td><td>106</td><td>109</td><td>110</td></tr><tr><td>107</td><td>108</td><td>111</td><td>112</td></tr></table>	105	106	109	110	107	108	111	112
9	10	13	14																								
11	12	15	16																								
57	58	61	62																								
59	60	63	64																								
105	106	109	110																								
107	108	111	112																								
$\Phi_3$	<table border="1"><tr><td>17</td><td>18</td><td>21</td><td>22</td></tr><tr><td>19</td><td>20</td><td>23</td><td>24</td></tr></table>	17	18	21	22	19	20	23	24	<table border="1"><tr><td>65</td><td>66</td><td>69</td><td>70</td></tr><tr><td>67</td><td>68</td><td>71</td><td>72</td></tr></table>	65	66	69	70	67	68	71	72	<table border="1"><tr><td>113</td><td>114</td><td>117</td><td>118</td></tr><tr><td>115</td><td>116</td><td>119</td><td>120</td></tr></table>	113	114	117	118	115	116	119	120
17	18	21	22																								
19	20	23	24																								
65	66	69	70																								
67	68	71	72																								
113	114	117	118																								
115	116	119	120																								
Αντίρροπο φραιζάρισμα																											
$\Phi_1$	<table border="1"><tr><td>25</td><td>26</td><td>29</td><td>30</td></tr><tr><td>27</td><td>28</td><td>31</td><td>32</td></tr></table>	25	26	29	30	27	28	31	32	<table border="1"><tr><td>73</td><td>74</td><td>77</td><td>78</td></tr><tr><td>75</td><td>76</td><td>79</td><td>80</td></tr></table>	73	74	77	78	75	76	79	80	<table border="1"><tr><td>121</td><td>122</td><td>125</td><td>127</td></tr><tr><td>123</td><td>124</td><td>126</td><td>128</td></tr></table>	121	122	125	127	123	124	126	128
25	26	29	30																								
27	28	31	32																								
73	74	77	78																								
75	76	79	80																								
121	122	125	127																								
123	124	126	128																								
$\Phi_2$	<table border="1"><tr><td>33</td><td>34</td><td>37</td><td>38</td></tr><tr><td>35</td><td>36</td><td>39</td><td>40</td></tr></table>	33	34	37	38	35	36	39	40	<table border="1"><tr><td>81</td><td>82</td><td>85</td><td>86</td></tr><tr><td>83</td><td>84</td><td>87</td><td>88</td></tr></table>	81	82	85	86	83	84	87	88	<table border="1"><tr><td>129</td><td>130</td><td>133</td><td>134</td></tr><tr><td>131</td><td>132</td><td>135</td><td>136</td></tr></table>	129	130	133	134	131	132	135	136
33	34	37	38																								
35	36	39	40																								
81	82	85	86																								
83	84	87	88																								
129	130	133	134																								
131	132	135	136																								
$\Phi_3$	<table border="1"><tr><td>41</td><td>42</td><td>45</td><td>46</td></tr><tr><td>43</td><td>44</td><td>47</td><td>48</td></tr></table>	41	42	45	46	43	44	47	48	<table border="1"><tr><td>89</td><td>90</td><td>93</td><td>94</td></tr><tr><td>91</td><td>92</td><td>95</td><td>96</td></tr></table>	89	90	93	94	91	92	95	96	<table border="1"><tr><td>137</td><td>138</td><td>141</td><td>142</td></tr><tr><td>139</td><td>140</td><td>143</td><td>144</td></tr></table>	137	138	141	142	139	140	143	144
41	42	45	46																								
43	44	47	48																								
89	90	93	94																								
91	92	95	96																								
137	138	141	142																								
139	140	143	144																								
Ομόρροπο φραιζάρισμα																											

Σχήμα 4.11 Τεμάχιο κατεργασίας πειραμάτων τραχύτητας

Αντίστοιχα έγιναν πειράματα για τη μελέτη των δυνάμεων κοπής. Στα πειράματα αυτά δεν ήταν απαραίτητη η δημιουργία επιφάνεια παρά μόνο η λήψη του σήματος των δυνάμεων στους τρεις άξονες. Προς οικονομία χρόνου και φθοράς κοπτικών εργαλείων, αλλά και για τη σίγουρη λήψη σωστής μέτρησης των δυνάμεων επιλέχθηκε η μετακίνηση του εργαλείου κατά τρία χιλιοστά ως προς τη διεύθυνση της πρόωσης και παραπλεύρως κατά τρεις φορές το ακτινικό βάθος κοπής.

Για να αποφευχθούν οι ταλαντώσεις εντός των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν μικρές πλάκες Al7075-T651 διαστάσεων 92x70x8 ώστε να βρίσκονται πλήρως επάνω στο μικρο-







Σχήμα 4.14 Στερεοσκόπιο Leica M125

Η δυσκολία διάκρισης των χαρακτηριστικών λόγω της μη επαρκούς μεγέθυνσης του στερεοσκοπίου οδήγησε και στη χρήση του οπτικού προφίλομέτρου για τη διεξαγωγή περισσότερης πληροφορίας, οπτικής και μετρούμενης.

#### 4.5 Τραχυμέτρηση πειραμάτων

Η τραχυμέτρηση των πειραμάτων έγινε με τη χρήση δύο μηχανημάτων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε τραχύμετρο στυλίσκου όπου γίνονται διαδοχικές μετρήσεις σε κάθε πείραμα. Από τις διαδοχικές μετρήσεις του στυλίσκου προκύπτουν οι παράμετροι της επιφανειακής τραχύτητας. Έπειτα έγινε μέτρηση των πειραμάτων με τη χρήση οπτικού προφίλομέτρου όπου λαμβάνεται η πληροφορία ολόκληρης της κατεργασμένης επιφάνειας.

##### 4.5.1 Τραχύμετρο Diavite Compact

Για τις μετρήσεις τραχύτητας των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε τραχύμετρο τύπου στυλίσκου. Το τραχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Diavite Compact που παρουσιάζεται στο ακόλουθο [σχήμα 4.15](#) και συνεργάζεται με το λειτουργικό σύστημα DiaSoft Basic.

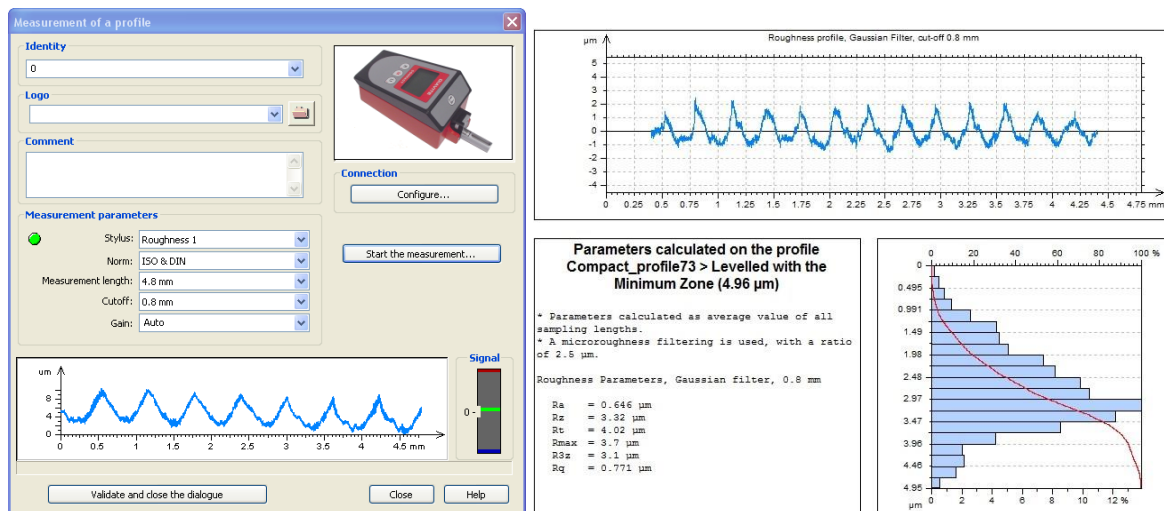


Σχήμα 4.15 Τραχύμετρο Diavite Compact

Ο στυλίσκος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στις τραχυμετρήσεις είναι για γενικές μετρήσεις τύπου SH. Οι μετρήσεις της τραχύτητας έγιναν με εγκάρσιο μήκος μετακίνησης 4.00mm, ενώ το μήκος κύματος αποκοπής ήταν 0.8mm.

Αφότου έγινε η κατεργασία των πειραμάτων, το καθένα με διαφορετικές συνθήκες κοπής σύμφωνα με τον παραγοντικό σχεδιασμό, μετρήθηκε η τραχύτητα Rz κάθετα στην πρόωση. Η τιμή της τραχύτητας Rz προέκυψε ως ο μέσος όρος πέντε μετρήσεων σε διαφορετικά σημεία εντός του δείγματος.

Οι παράμετροι τραχυμέτρησης που ορίζονται στο λειτουργικό σύστημα DiaSoft Basic. Κάθε τραχυμέτρηση δίνει γραφικά την τομογραφία, τις τιμές των παραμέτρων ταχύτητας και τη στατιστική των μετρήσεων. Ένα τυπικό αποτέλεσμα τραχυμέτρησης από το πρόγραμμα DiaSoft Basic παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16 Λογισμικό DiaSoft Basic και αποτελέσματα τραχυμέτρησης

#### 4.5.2 Προφیلόμετρο Bruker Contour GT-K

Το οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K (σχήμα 4.17) αποτελεί ένα εργαλείο υψηλής τεχνολογίας και ακρίβειας. Το 3D οπτικό μικροσκόπιο Contour GT-K θέτει νέα βιομηχανικά πρότυπα στο σχεδιασμό και το κόστος στις επιδόσεις της μετρολογίας επιφάνειας. Με εξαιρετική τραχύτητα και δυνατότητες μέτρησης 2D/3D, υψηλής ευκρίνειας απεικόνιση και φιλική προς το χρήστη πλοήγηση, το σύστημα προσφέρει απaráμιλλη μετρολογία σε ένα απλοποιημένο πακέτο συμπαγούς μεγέθους.



Σχήμα 4.17 Οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K

Το Contour GT-K παρέχει διαισθητική πρόσβαση σε μια εκτενή βιβλιοθήκη των προ-προγραμματισμένων φίλτρων και αναλύσεις για LED, φωτοβολταϊκά, παχιές μεμβράνες, ημιαγωγούς, ιατρική συσκευή, MEMS και εφαρμογές τριβολογίας. Το Contour GT-K είναι ένα μηχάνημα χαμηλού θορύβου, υψηλής ταχύτητας και υψηλής ακρίβειας αποτελεσμάτων που απαιτείται στην ποσοτική μετρολογία. Με τη χρήση πολλαπλών στόχων και την ολοκληρωμένη αναγνώριση χαρακτηριστικών, μπορούν να παρακολουθούνται χαρακτηριστικά πάνω από μια ποικιλία οπτικών πεδίων ακόμα και σε κάθετη ανάλυση μικρότερη μερικών νανομέτρων παρέχοντας ανεξάρτητα κλίμακας αποτελέσματα για ποιοτικό έλεγχο και παρακολούθηση διαδικασιών σε πολύ διαφορετικές βιομηχανίες.

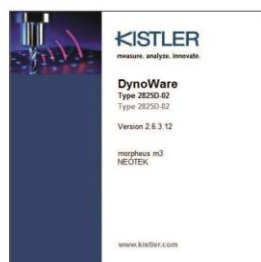
#### 4.6 Δυναμομέτρηση πειραμάτων

Για τη δυναμομέτρηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το δυναμόμετρο Kistler και έγινε καταγραφή των δυνάμεων με το λογισμικό DynoWare. Το DynoWare είναι ένα λογισμικό πίσω από το σύστημα μέτρησης. Μέσω αισθητήρων που βρίσκονται ενσωματωμένοι στα δυναμόμετρα λαμβάνει σήματα τα οποία μετασχηματίζει σε πραγματική πληροφορία και εξάγει τα αποτελέσματα σε ευπαρουσίαστη μορφή. Το DynoWare έχει τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου των ενισχυτών φορτίου ή των διαμορφωτών σήματος.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το Compact Multi-Component Dynamometer υψηλής ευαισθησίας έως 4kN σε συνδυασμό με το Modular Multi-Channel Laboratory Charge Amplifier και το Data Acquisition System που υποστηρίζει μέχρι 28 channels, σχήμα 4.18. Αυτό το δυναμόμετρο είναι μέχρι σήμερα το δυναμόμετρο με τις υψηλότερες φυσικές συχνότητες. Η εγκατάστασή του δίνει τη δυνατότητα μέτρησης ακριβείας πολύ μικρών δυνάμεων και εγγυάται ελάχιστη επίδραση των θερμικών επιδράσεων.



Compact Multi-Component  
Dynamometer



Λογισμικό DynoWare



Σύστημα λήψης δεδομένων  
(καταγραφικό)



Ενισχυτής σήματος 8 καναλιών

Σχήμα 4.18 Σύστημα δυναμομέτρησης Kistler

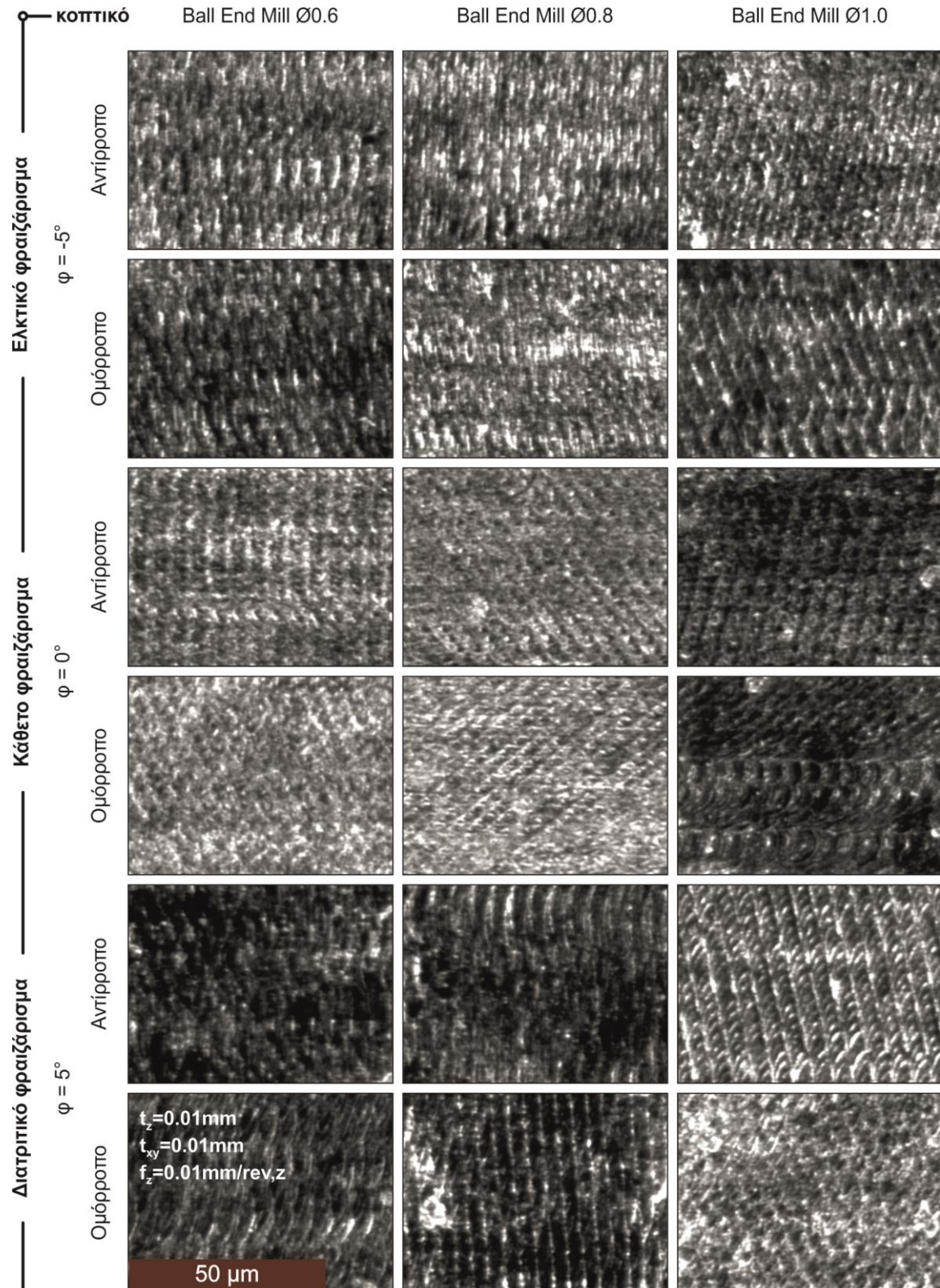
Ο ενιαίος δομοστοιχειωτός ενισχυτής σήματος 8 μονάδων ενίσχυσης διαθέτει έναν αναλογικό υπολογιστή άθροισης 6 συνιστωσών. Από αυτόν τον ενισχυτή ρυθμίζεται η ευαισθησία του δυναμομέτρου στις τρεις συνιστώσες του χώρου και δίνεται η εντολή της καταγραφής της μέτρησης. Το ενιαίο σύστημα λήψης δεδομένων σε συνδυασμό με το λογισμικό DynoWare προσφέρει τη σύνδεση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μπορεί να διαχειριστεί μέχρι 28 κανάλια ταυτοχρόνως.



## 4.7 Αποτελέσματα

### 4.7.1 Στερεοσκόπηση

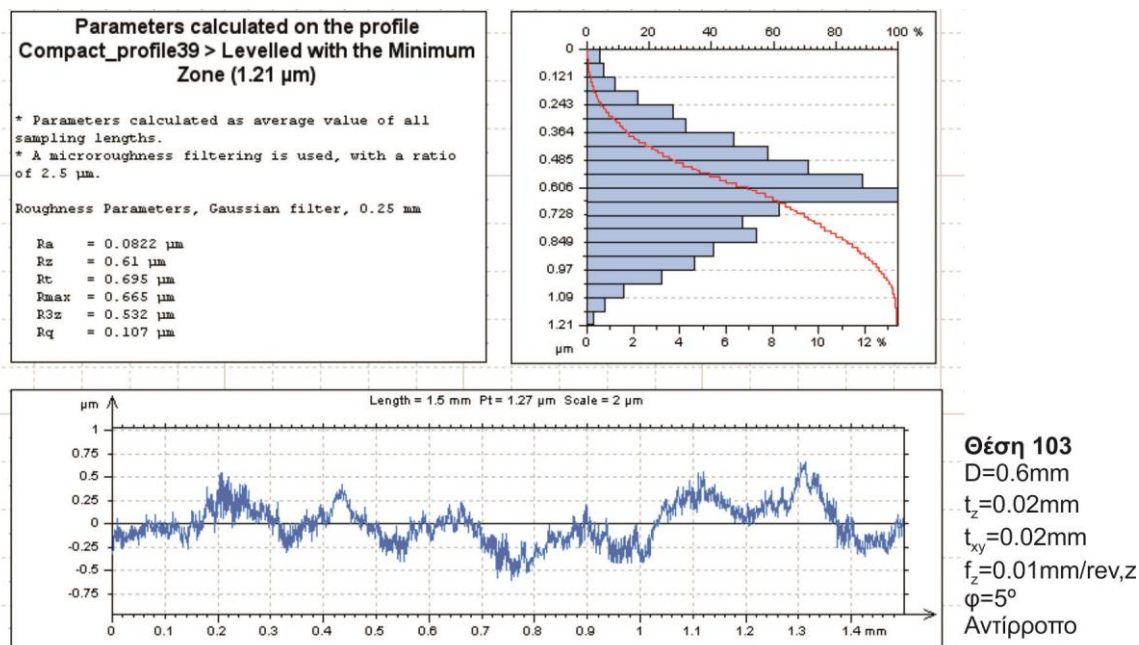
Από τη στερεοσκόπηση των πειραμάτων φάνηκε η τοπομορφία της επιφάνειας και ο τρόπος που επηρεάζεται από τις διάφορες συνθήκες κοπής. Στο ακόλουθο σχήμα 4.19 παρουσιάζονται οι τοπομορφίες ορισμένων πειραμάτων.



Σχήμα 4.19 Τοπομορφία πειραμάτων

## 4.7.2 Τραχυμέτρηση

Από την τραχυμέτρηση των πειραμάτων (σχήμα 4.20) προκύπτει η μέση επιφανειακή τραχύτητα  $R_z$  ως η τιμή του μέσου όρου διαδοχικών τραχυμετρήσεων. Οι τιμές τραχύτητας του κάθε πειράματος καταχωρήθηκαν σε μορφή πίνακα (σχήματα 4.21 και 4.22) και έπειτα κατασκευάστηκαν γραφήματα που δίνουν μια πρώτη εικόνα για την επίδραση των συνθηκών κοπής στο μικροφραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης.



Σχήμα 4.20 Τραχυμέτρηση πειράματος

Περιοχή	D	tz	txy	fz	φ	Στρατηγική	Rz
1	1	0.01	0.01	0.01	5	Αντίρροπο	0.9240
2	1	0.01	0.01	0.02	5	Αντίρροπο	1.4080
3	1	0.01	0.02	0.01	5	Αντίρροπο	1.0660
4	1	0.01	0.02	0.02	5	Αντίρροπο	1.2340
5	1	0.02	0.01	0.01	5	Αντίρροπο	2.1040
6	1	0.02	0.01	0.02	5	Αντίρροπο	1.6960
7	1	0.02	0.02	0.01	5	Αντίρροπο	2.5940
8	1	0.02	0.02	0.02	5	Αντίρροπο	1.5840
9	1	0.01	0.01	0.01	0	Αντίρροπο	1.1260
10	1	0.01	0.01	0.02	0	Αντίρροπο	0.9018
11	1	0.01	0.02	0.01	0	Αντίρροπο	0.8956
12	1	0.01	0.02	0.02	0	Αντίρροπο	1.0440
13	1	0.02	0.01	0.01	0	Αντίρροπο	1.4140
14	1	0.02	0.01	0.02	0	Αντίρροπο	1.3180
15	1	0.02	0.02	0.01	0	Αντίρροπο	1.1500
16	1	0.02	0.02	0.02	0	Αντίρροπο	1.4180
17	1	0.01	0.01	0.01	-5	Αντίρροπο	1.1020
18	1	0.01	0.01	0.02	-5	Αντίρροπο	1.7200
19	1	0.01	0.02	0.01	-5	Αντίρροπο	1.0022
20	1	0.01	0.02	0.02	-5	Αντίρροπο	1.4560
21	1	0.02	0.01	0.01	-5	Αντίρροπο	1.0098
22	1	0.02	0.01	0.02	-5	Αντίρροπο	0.8548
23	1	0.02	0.02	0.01	-5	Αντίρροπο	0.9020
24	1	0.02	0.02	0.02	-5	Αντίρροπο	0.7552

Σχήμα 4.21 Πίνακας τραχυμετρήσεων αντίρροπου φραιζαρίσματος με κοπτικό Ø1 mm



Περιοχή	D	tz	txy	fz	φ	Στρατηγική	Rz
25	1	0.01	0.01	0.01	-5	Ομόρροπο	0.8990
26	1	0.01	0.01	0.02	-5	Ομόρροπο	1.1940
27	1	0.01	0.02	0.01	-5	Ομόρροπο	1.0346
28	1	0.01	0.02	0.02	-5	Ομόρροπο	0.8798
29	1	0.02	0.01	0.01	-5	Ομόρροπο	1.8620
30	1	0.02	0.01	0.02	-5	Ομόρροπο	1.8460
31	1	0.02	0.02	0.01	-5	Ομόρροπο	1.4700
32	1	0.02	0.02	0.02	-5	Ομόρροπο	2.3980
33	1	0.01	0.01	0.01	0	Ομόρροπο	1.1340
34	1	0.01	0.01	0.02	0	Ομόρροπο	0.9154
35	1	0.01	0.02	0.01	0	Ομόρροπο	1.2080
36	1	0.01	0.02	0.02	0	Ομόρροπο	1.3660
37	1	0.02	0.01	0.01	0	Ομόρροπο	1.1040
38	1	0.02	0.01	0.02	0	Ομόρροπο	1.5380
39	1	0.02	0.02	0.01	0	Ομόρροπο	1.3160
40	1	0.02	0.02	0.02	0	Ομόρροπο	1.3520
41	1	0.01	0.01	0.01	5	Ομόρροπο	0.9288
42	1	0.01	0.01	0.02	5	Ομόρροπο	1.2780
43	1	0.01	0.02	0.01	5	Ομόρροπο	1.1640
44	1	0.01	0.02	0.02	5	Ομόρροπο	1.4180
45	1	0.02	0.01	0.01	5	Ομόρροπο	0.9022
46	1	0.02	0.01	0.02	5	Ομόρροπο	1.4400
47	1	0.02	0.02	0.01	5	Ομόρροπο	1.2740
48	1	0.02	0.02	0.02	5	Ομόρροπο	1.5020

Σχήμα 4.22 Πίνακας τραχυμετρήσεων ομόρροπου φραιζαρίσματος με κοπτικό Ø1 mm

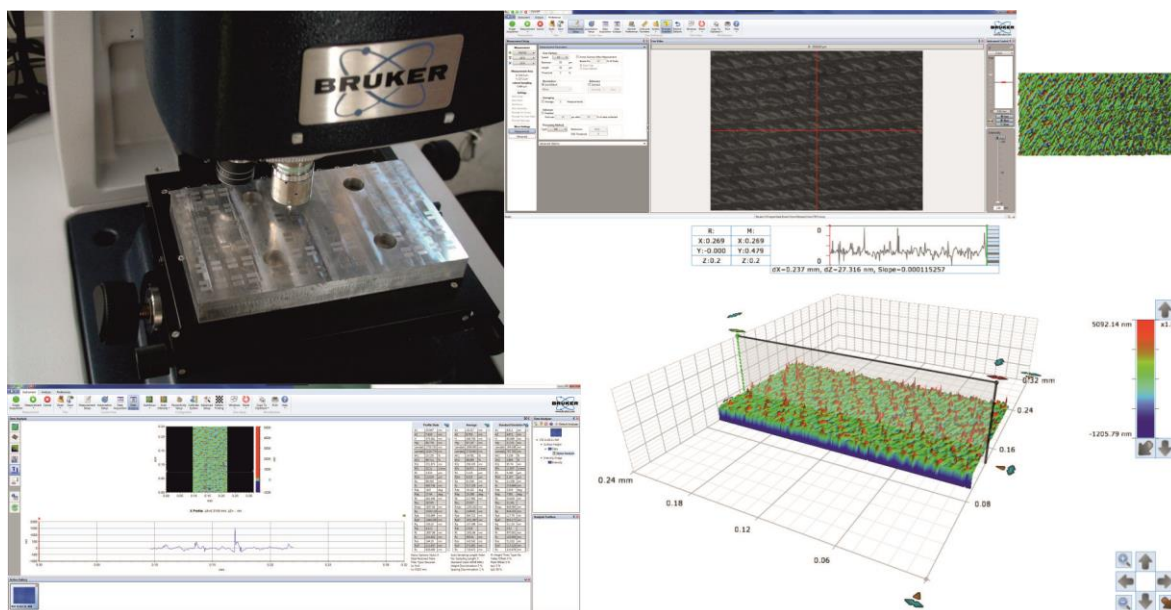
Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η μέση επιφανειακή τραχύτητα Rz σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της πρόωσης εκτός ορισμένων περιπτώσεων όπου βρίσκεται σε πολύ κοντινή τιμή. Περισσότερο οφθαλμοφανές είναι το γεγονός ότι η αύξηση του αξονικού βάθους κοπής αλλά και του ακτινικού οδηγούν σε αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας. Καθ' ότι όμως οι τιμές της τραχύτητας είναι πολύ μικρές δεν είναι απίθανη η εμφάνιση αντίθετων αποτελεσμάτων καθώς το εύρος των μετρήσεων είναι πολύ μικρό.

Ανάλογα τη στρατηγική που εφαρμόζεται είναι φανερό ότι στο φραιζάρισμα υπό κλίση, διατρητικό και ελκτικό, η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας είναι μικρότερη για τα εργαλεία διαμέτρου 0.6 και 0.8mm ενώ στο κοπτικό 1mm όλες οι τιμές τραχύτητας είναι πανομοιότυπες.

#### 4.7.3 Προφίλομέτρηση

Η προφίλομέτρηση των πειραμάτων (σχήμα 4.23) προσφέρει μια πιο πλήρη εικόνα των ποιοτικών αλλά και ποσοτικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας. Για τη μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας και καθώς οι επιφάνειες φαινομενικά είναι λείες, χρησιμοποιήθηκε ο φακός του 1x20. Η προφίλομέτρηση των πειραμάτων είναι ευκολότερη και συντομότερη χρονικά διαδικασία όμως ως μέτρηση μεγαλύτερης ακρίβειας είναι αρκετά ευαίσθητη και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το εξωτερικό περιβάλλον.

Για την ορθότητα των μετρήσεων έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα των τραχυμετρήσεων όπου παρατηρήθηκε ότι οι τιμές ως επί το πλείστον επαληθεύονται με διαφορές της τάξης ορισμένων νανόμετρων. Συγκεκριμένα οι τιμές φωτεινότητας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από 1 έως 2% και οι τιμές του κατωφλίου (threshold) σημείων αποτύπωσης από 1 έως 3%. Καθ' ότι το βάθος των πειραμάτων δεν υπερβαίνει τα 20μm χρησιμοποιήθηκε για την προς τα πίσω σάρωση (backscan) η τιμή των 20μm από το σημείο εστίασης του φακού και μήκος μέτρησης 30μm.



Σχήμα 4.23 Αποτελέσματα προφίλομέτρησης

Στα ακόλουθα σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζονται οι κύριες παράμετροι τραχύτητας των επιφανειών για το αντίρροπο και το ομόρροπο φραιζάρισμα.

	Rz	Ra	Rt		Rz	Ra	Rt		Rz	Ra	Rt
1	0.958	0.137	1.678	49	0.587	0.083	1.042	97	0.606	0.086	1.207
2	1.301	0.179	2.795	50	0.703	0.096	1.102	98	0.805	0.119	1.174
3	1.061	0.157	1.800	51	0.635	0.104	0.976	99	0.760	0.121	1.041
4	1.144	0.158	2.302	52	0.656	0.066	1.232	100	1.114	0.128	1.557
5	2.106	0.292	3.963	53	0.616	0.100	1.877	101	0.754	0.131	1.314
6	1.694	0.223	3.076	54	0.666	0.097	1.203	102	0.758	0.117	0.969
7	1.683	0.269	2.999	55	0.528	0.081	0.983	103	0.763	0.110	1.145
8	1.612	0.221	3.890	56	0.722	0.120	0.930	104	1.183	0.153	1.764
9	1.015	0.157	1.654	57	1.390	0.143	1.938	105	0.889	0.155	1.179
10	0.931	0.146	1.637	58	1.636	0.195	2.764	106	1.481	0.223	1.791
11	0.922	0.156	1.341	59	1.314	0.197	2.319	107	1.395	0.219	1.938
12	1.089	0.139	2.166	60	1.426	0.194	2.327	108	1.980	0.327	3.214
13	1.485	0.193	2.717	61	1.626	0.238	3.199	109	1.691	0.223	2.477
14	1.368	0.171	2.519	62	1.495	0.234	2.017	110	1.788	0.224	2.907
15	1.115	0.169	1.861	63	1.513	0.251	1.971	111	1.823	0.267	2.277
16	1.489	0.171	2.913	64	1.985	0.250	3.206	112	2.029	0.309	3.641
17	1.143	0.147	2.189	65	0.667	0.101	1.187	113	0.698	0.119	0.852
18	1.693	0.208	3.090	66	0.941	0.118	1.902	114	1.055	0.175	1.453
19	1.092	0.156	1.849	67	0.720	0.103	1.229	115	1.118	0.186	1.400
20	1.453	0.167	2.576	68	0.782	0.122	1.418	116	1.281	0.213	1.746
21	1.013	0.194	3.496	69	0.718	0.100	1.267	117	0.990	0.151	1.397
22	0.860	0.110	1.379	70	0.917	0.137	1.501	118	1.336	0.188	1.900
23	0.897	0.121	1.947	71	0.733	0.095	1.035	119	0.878	0.140	1.298
24	1.586	0.189	3.238	72	1.000	0.126	2.105	120	1.107	0.183	1.488

Σχήμα 4.24 Πίνακας προφίλομετρήσεων περιοχών αντίρροπου φραιζαρίσματος

	Rz	Ra	Rt		Rz	Ra	Rt		Rz	Ra	Rt
25	0.951	0.138	1.705	73	0.633	0.078	0.905	121	0.857	0.133	1.281
26	1.144	0.155	2.138	74	0.725	0.115	1.015	122	0.672	0.097	0.958
27	1.058	0.160	1.751	75	0.624	0.084	0.989	123	0.800	0.118	1.401
28	1.057	0.142	2.017	76	0.850	0.124	1.202	124	1.175	0.180	1.595
29	1.889	0.266	3.789	77	0.503	0.074	0.817	125	0.554	0.106	0.736
30	1.905	0.269	3.509	78	0.800	0.119	1.162	126	0.700	0.123	0.798
31	1.473	0.213	2.631	79	0.490	0.082	0.884	127	0.582	0.113	1.029
32	2.021	0.286	3.925	80	0.878	0.111	1.051	128	0.754	0.125	1.016
33	1.080	0.145	1.783	81	1.254	0.200	1.827	129	0.877	0.168	1.648
34	0.953	0.162	1.270	82	1.423	0.192	1.988	130	1.094	0.192	1.341
35	1.147	0.157	2.185	83	1.301	0.245	1.869	131	1.077	0.216	1.414
36	1.343	0.179	2.574	84	1.700	0.243	2.772	132	1.283	0.207	1.571
37	1.088	0.137	2.051	85	1.307	0.181	2.222	133	0.934	0.181	1.242
38	1.584	0.187	2.554	86	1.749	0.241	2.473	134	1.302	0.208	1.877
39	1.305	0.187	2.435	87	1.637	0.209	2.809	135	1.197	0.244	1.630
40	1.353	0.190	2.312	88	1.872	0.270	2.875	136	1.539	0.261	2.036
41	0.986	0.211	3.089	89	0.854	0.118	1.319	137	0.855	0.134	1.341
42	1.235	0.145	2.142	90	0.887	0.107	1.157	138	1.115	0.195	1.533
43	1.100	0.160	1.414	91	0.769	0.100	1.137	139	0.892	0.161	1.529
44	1.438	0.172	2.266	92	0.952	0.151	1.477	140	1.290	0.210	1.829
45	0.963	0.183	1.275	93	0.839	0.115	1.441	141	0.893	0.155	1.249
46	1.440	0.250	3.631	94	0.785	0.118	1.239	142	1.100	0.168	1.615
47	1.275	0.239	2.602	95	0.759	0.129	1.047	143	0.907	0.162	1.180
48	1.533	0.249	3.307	96	1.257	0.145	1.938	144	1.227	0.174	2.286

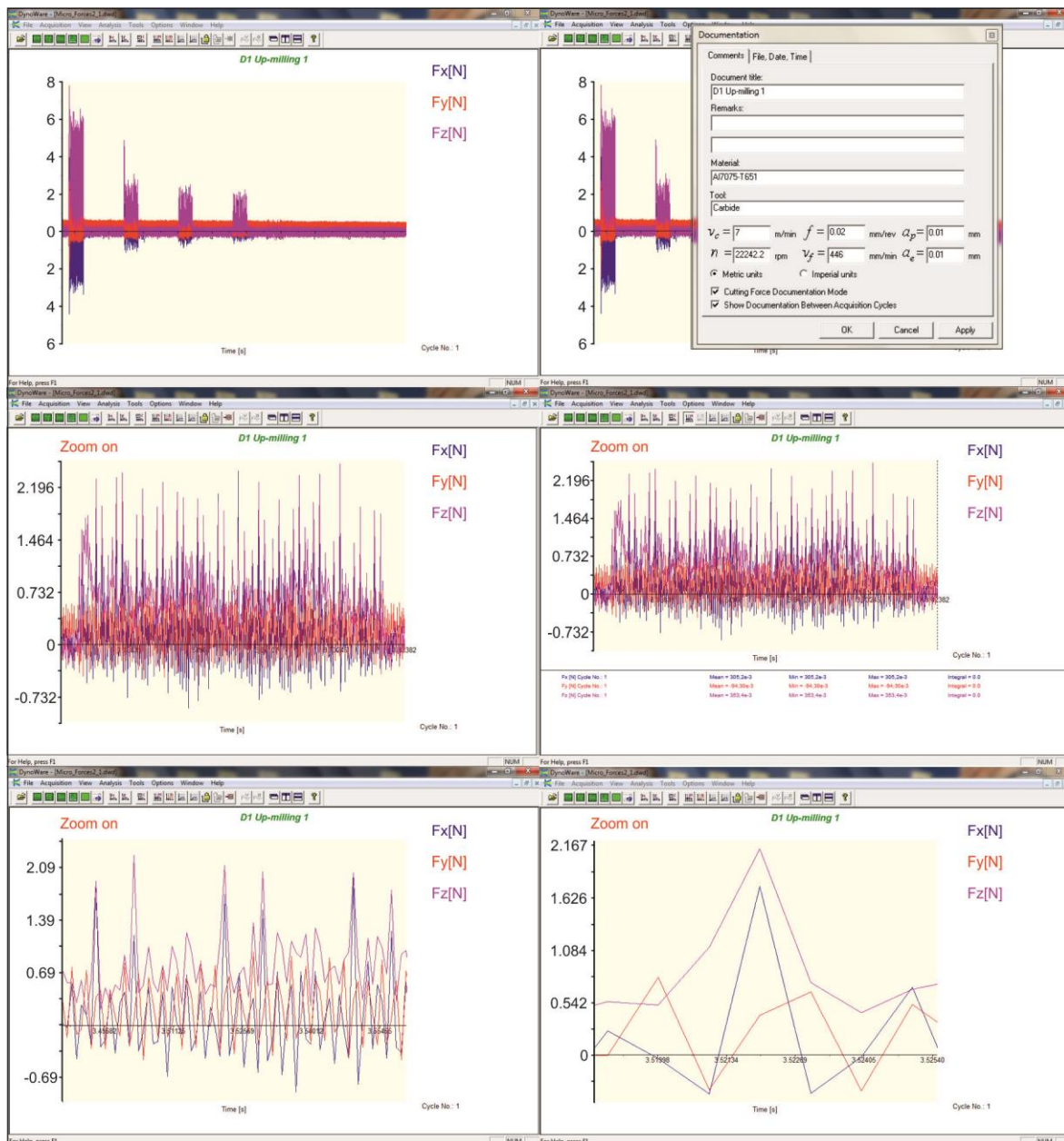
Σχήμα 4.25 Πίνακας προφίλομετρήσεων περιοχών ομόρροπου φραιζαρίσματος

Με λεπτομερέστερη παρατήρηση των τιμών, παρατηρείται ότι στο κάθετο αντίρροπο φραιζάρισμα τη μικρότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας έχει το μεγαλύτερο κοπτικό εργαλείο (1mm) ενώ στο ομόρροπο έχει το μικρότερο (0.6mm). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το εργαλείο διαμέτρου 0.8mm παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τραχύτητας.

#### 4.7.4 Δυναμομέτρηση

Από τις δυναμομετρήσεις που έγιναν προέκυψε βάση δεδομένων σε μορφή πίνακα όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των κύριων συνιστωσών των δυνάμεων κοπής ανάλογα με τις συνθήκες κοπής που εφαρμόστηκαν. Οι δυναμομετρήσεις έγιναν σε χρόνο παράλληλο με την κατεργασία καθ' ότι η πλάκα μέτρησης τοποθετείται εντός της εργαλειομηχανής.

Στην παρούσα φάση επιλέχθηκε η μερική κατεργασία επιφάνειας και όχι η πλήρης εφόσον οι μετρήσεις μπορούν να ληφθούν άμεσα. Για τη σίγουρη λήψη σωστής μέτρησης επιλέχθηκε η καταγραφή 10 δευτερολέπτων που ισοδυναμεί με τρία περάσματα του κοπτικού εργαλείου. Εφόσον εξετάζονται ξεχωριστά οι περιπτώσεις του αντίρροπου και του ομόρροπου κάθετου φραιζαρίσματος σε κάθε πείραμα γινόταν αρχικά ένα αυλάκι για την ομαλή είσοδο του κοπτικού. Μετά από επεξεργασία των δυνάμεων μέσω του προγράμματος DynoWare (σχήμα 4.26) λαμβάνονται οι ωφέλιμες τιμές της εκάστοτε μέτρησης καθώς και οι τιμές των ελάχιστων, μέγιστων και μέσων δυνάμεων.



Σχήμα 4.26 Δυναμομέτρηση και επεξεργασία δυνάμεων μέσω του λογισμικού DynoWare

Αρχικά επιλέχθηκε η καταγραφή τεσσάρων περασμάτων του κοπτικού εργαλείου για να εξασφαλιστεί η σωστή καταγραφή της μέτρησης. Στο πρώτο πέρασμα του κοπτικού εργαλείου διεξάγεται κοπή όπου συμμετέχει ολόκληρη η διάμετρος του, γι αυτό και οι συγκεκριμένες δυνάμεις είναι μεγαλύτερες. Το πέρασμα αυτό γίνεται για να εφαρμοσθεί έπειτα η αντίστοιχη στρατηγική με ομόρροπο ή αντίρροπο φραιζάρισμα. Από τα τρία άλλα περάσματα επιλέγεται συνήθως το δεύτερο ως αντιπροσωπευτικό της διαδικασίας κοπής.

Για το κάθε πείραμα έγινε αρχειοθέτηση και καταγραφή των συνθηκών κοπής που εφαρμόστηκαν, μέσα από το λογισμικό του δυναμομέτρου, όπως επίσης καταγράφηκαν οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές των αντιπροσωπευτικών δυναμομετρήσεων. Για την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης έγινε εστίαση σε συγκεκριμένες περιοχές της κυματομορφής της δυναμομέτρησης ώστε να είναι ορατή η εξέλιξη των δυνάμεων κοπής σε μία πλήρη περιστροφή του κοπτικού εργαλείου.

Στο ακόλουθο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας πίνακας αποτύπωσης των μέγιστων δυνάμεων σε διάφορες συνθήκες κοπή.

	D	Στρατηγική	Vc	fz	tz	txy	F	S	Fx max	Fy max	Fz max
1	1	Αντίρροπο	7	0,01	0,01	0,01	446	22242,2	2,422	0,9793	2,523
2	1	Αντίρροπο	7	0,01	0,01	0,015	446	22242,2	2,717	0,0565	1,957
3	1	Αντίρροπο	7	0,01	0,01	0,02	446	22242,2	2,977	0,434	1,968
4	1	Αντίρροπο	7	0,01	0,01	0,025	446	22242,2	2,564	1,036	2,466
69	1	Αντίρροπο	8	0,02	0,02	0,01	720	18017,4	4,996	0,7782	5,978
70	1	Αντίρροπο	8	0,02	0,02	0,015	720	18017,4	5,653	0,6	6,996
71	1	Αντίρροπο	8	0,02	0,02	0,02	720	18017,4	6,468	0,9564	8,059
72	1	Αντίρροπο	8	0,02	0,02	0,025	720	18017,4	6,693	0,8594	7,755
128	1	Ομόρροπο	8	0,015	0,015	0,025	624	20762,5	0,8414	1,434	4,519
129	1	Ομόρροπο	8	0,015	0,02	0,01	540	18017,4	1,26	1,161	3,951
130	1	Ομόρροπο	8	0,015	0,02	0,015	540	18017,4	1,319	1,006	5,462
131	1	Ομόρροπο	8	0,015	0,02	0,02	540	18017,4	0,769	1,587	5,347
192	0,8	Αντίρροπο	8	0,01	0,02	0,025	403	20129,8	4,454	0,881	5,887
193	0,8	Αντίρροπο	8	0,015	0,01	0,01	854	28496,5	4,282	1,628	4,876
194	0,8	Αντίρροπο	8	0,015	0,01	0,015	854	28496,5	5,167	1,292	5,2
195	0,8	Αντίρροπο	8	0,015	0,01	0,02	854	28496,5	5,414	1,359	5,549
257	0,8	Ομόρροπο	8	0,01	0,015	0,01	465	23236,2	2,321	1,462	4,909
258	0,8	Ομόρροπο	8	0,01	0,015	0,015	465	23236,2	1,897	1,748	4,625
259	0,8	Ομόρροπο	8	0,01	0,015	0,02	465	23236,2	1,48	2,033	5,065
260	0,8	Ομόρροπο	8	0,01	0,015	0,025	465	23236,2	1,661	2,093	5,219
318	0,6	Αντίρροπο	7	0,02	0,015	0,015	939	23484,7	4,037	0,8759	8,654
319	0,6	Αντίρροπο	7	0,02	0,015	0,02	939	23484,7	4,738	0,7785	8,975
320	0,6	Αντίρροπο	7	0,02	0,015	0,025	939	23484,7	5,222	0,8066	9,354
321	0,6	Αντίρροπο	7	0,02	0,02	0,01	814	20378,3	1,264	0,3633	5,976
373	0,6	Ομόρροπο	7	0,015	0,01	0,01	863	28786,4	1,943	0,8853	2,06
374	0,6	Ομόρροπο	7	0,015	0,01	0,015	863	28786,4	1,894	0,9869	2,344
375	0,6	Ομόρροπο	7	0,015	0,01	0,02	863	28786,4	1,401	1,531	2,661
376	0,6	Ομόρροπο	7	0,015	0,01	0,025	863	28786,4	1,516	1,53	3,069
438	0,5	Αντίρροπο	7	0,01	0,015	0,015	515	25720,4	1,603	0,3305	1,381
439	0,5	Αντίρροπο	7	0,01	0,015	0,02	515	25720,4	1,839	0,3632	1,617
440	0,5	Αντίρροπο	7	0,01	0,015	0,025	515	25720,4	2,346	0,3625	1,754
441	0,5	Αντίρροπο	7	0,01	0,02	0,01	446	22242,2	1,734	0,5286	1,699
573	0,5	Ομόρροπο	8	0,02	0,02	0,01	1019	25472	1,06	0,6427	1,049
574	0,5	Ομόρροπο	8	0,02	0,02	0,015	1019	25472	1,302	0,6348	1,099
575	0,5	Ομόρροπο	8	0,02	0,02	0,02	1019	25472	1,002	0,7971	1,25
576	0,5	Ομόρροπο	8	0,02	0,02	0,025	1019	25472	0,762	1,155	1,982

Σχήμα 4.27 Πίνακας δυναμομετρήσεων διάφορων συνθηκών κατεργασίας







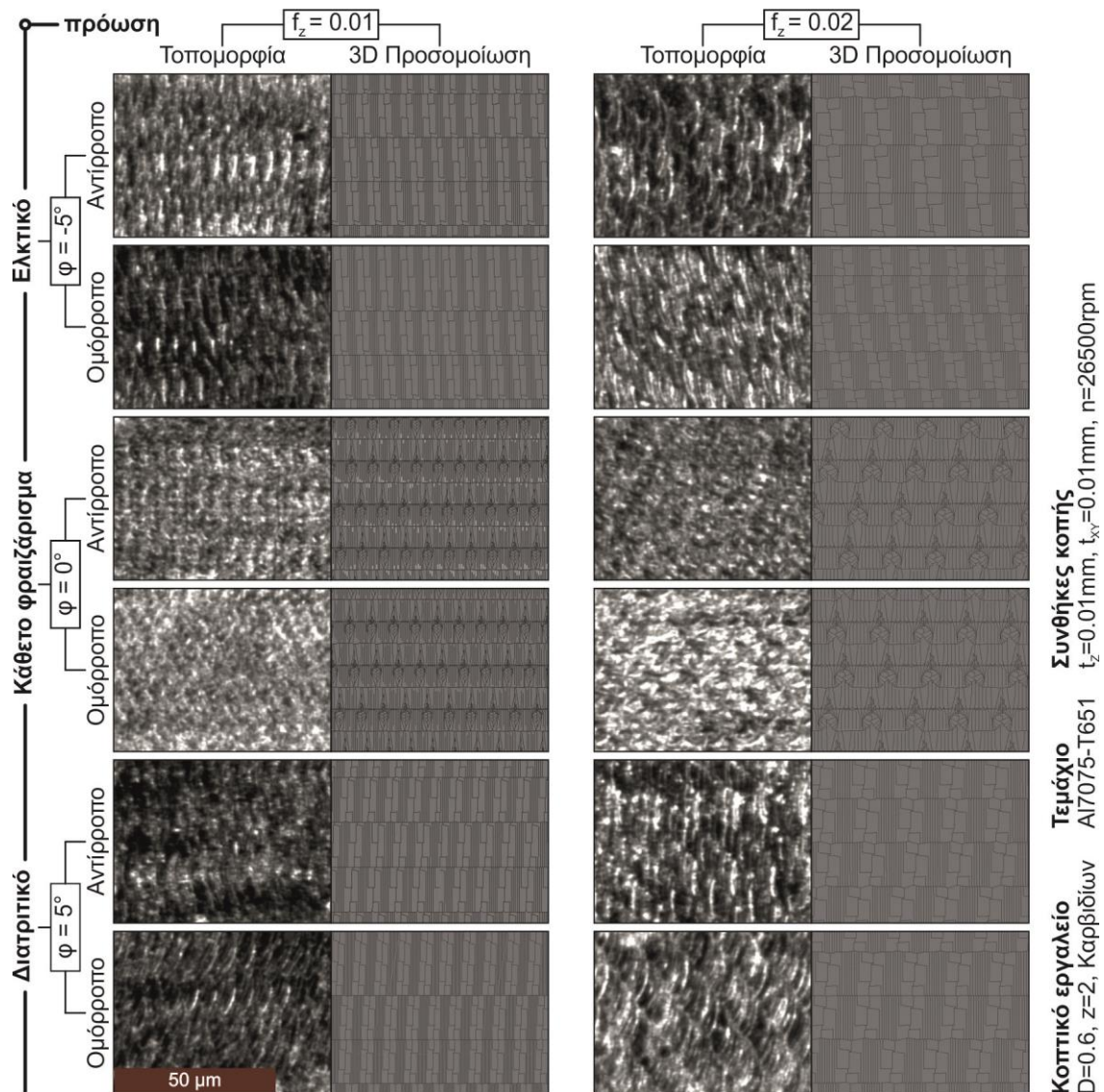
## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

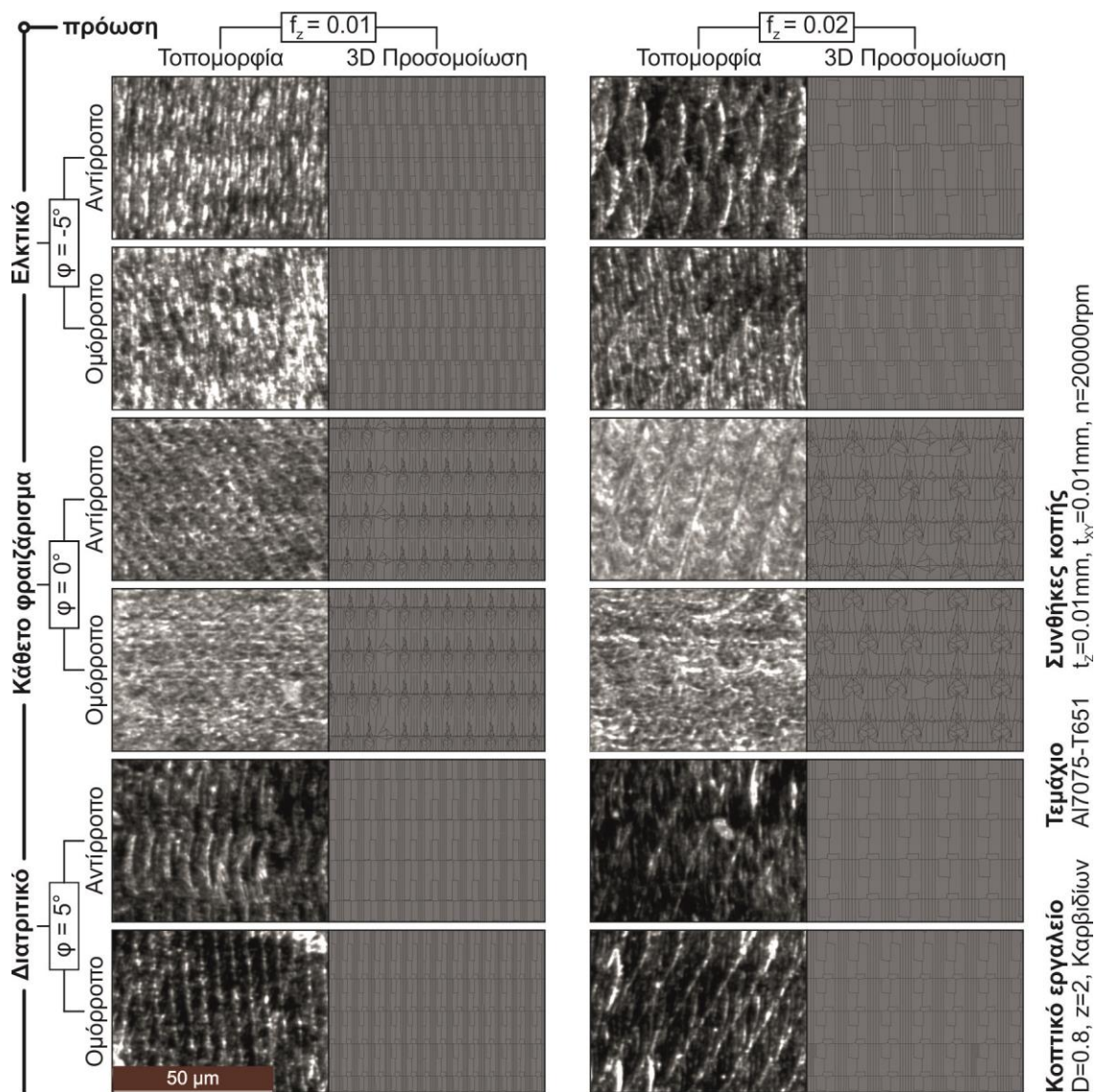
Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε αντιπαράθεση με τα πραγματικά μετρούμενα δεδομένα και αξιολογείται η προσέγγιση που παρέχει το μοντέλο.

### 5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων τοπομορφίας

Από τη στερεοσκοπηση των πειραμάτων προέκυψε μια πρώτη οπτική επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης. Στα ακόλουθα [σχήμα 5.1](#) έως και [σχήμα 5.3](#) παρουσιάζεται η πραγματική τοπομορφία σε αντιπαράθεση με αυτή της τρισδιάστατης προσομοίωσης για συγκεκριμένες συνθήκες κοπής.



Σχήμα 5.1 Σύγκριση προκύπτουσας 3D τοπομορφίας με την πραγματική, Ø0.6mm



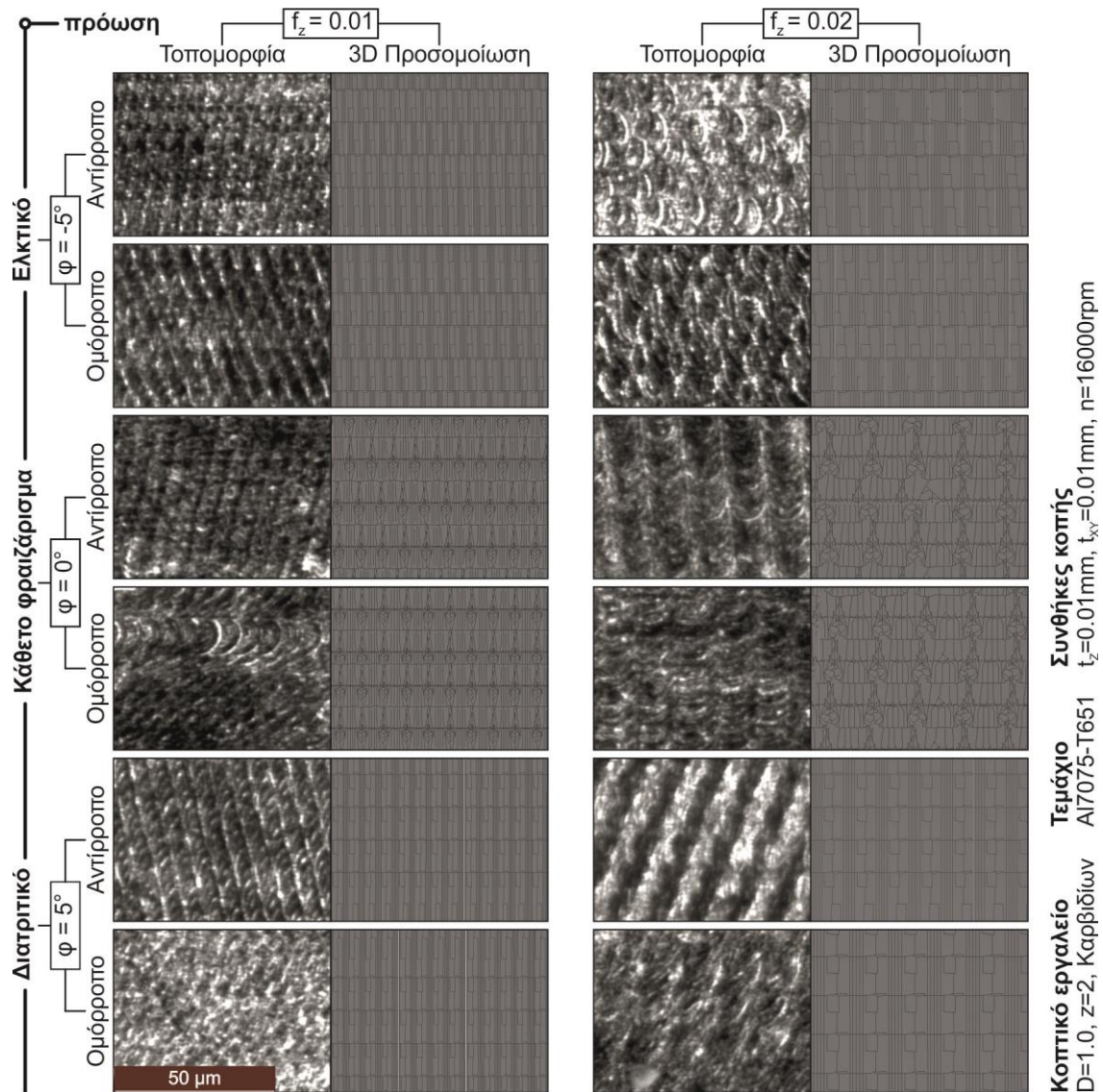
Σχήμα 5.2 Σύγκριση προκύπτουσας 3D τοπομορφίας με την πραγματική, Ø0.8mm

Η σύγκριση των δύο τοπομορφιών, πραγματικής και προσομοιωμένης σε πολλές περιπτώσεις γίνεται εύκολα αντιληπτή και σε άλλες όχι. Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας δύο βασικές παρατηρήσεις: Με την αρίθμηση των περασμάτων που διαγράφονται τόσο στον οριζόντιο, όσο και στον κάθετο άξονα σε συγκεκριμένης κλίμακας αποτύπωση και με τη ενδελεχή εστίαση στην προκύπτουσα επιφάνεια.

Με την οπτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων είναι φανερό πως τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης επαληθεύονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό καθώς παρατηρούνται ομοιότητες στο μοτίβο των επιφανειών. Ως προσομοίωση, ήταν αναμενόμενο να μη μπορεί να αποτυπωθεί επακριβώς η μορφολογία της κατεργαζόμενης επιφάνειας καθώς στο μοντέλο δεν ενσωματώνονται εξωτερικοί παράγοντες όπως οι ταλαντώσεις του κοπτικού εργαλείου, αλλά κι επειδή η εκάστοτε κατεργασία κοπής διαφέρει από μηχανή σε μηχανή και από τόπο σε τόπο ακόμα και υπό κατεργασία ίδιων συνθηκών κοπής.

Καθότι η τοποθέτηση του εργαλείου σε συγκεκριμένη γωνία περιστροφής στην αρχή ενός περάσματος δεν μπορεί να είναι προβλέψιμη, στο μοντέλο προσομοίωσης έγινε χρήση ενός τυχαίου αριθμού. Ως εκ τούτου εξ' αρχής ήταν αναμενόμενο ότι η προσομοιωμένη επιφάνεια δεν μπορούσε να ταυτιστεί με την οποιαδήποτε κατεργασμένη.





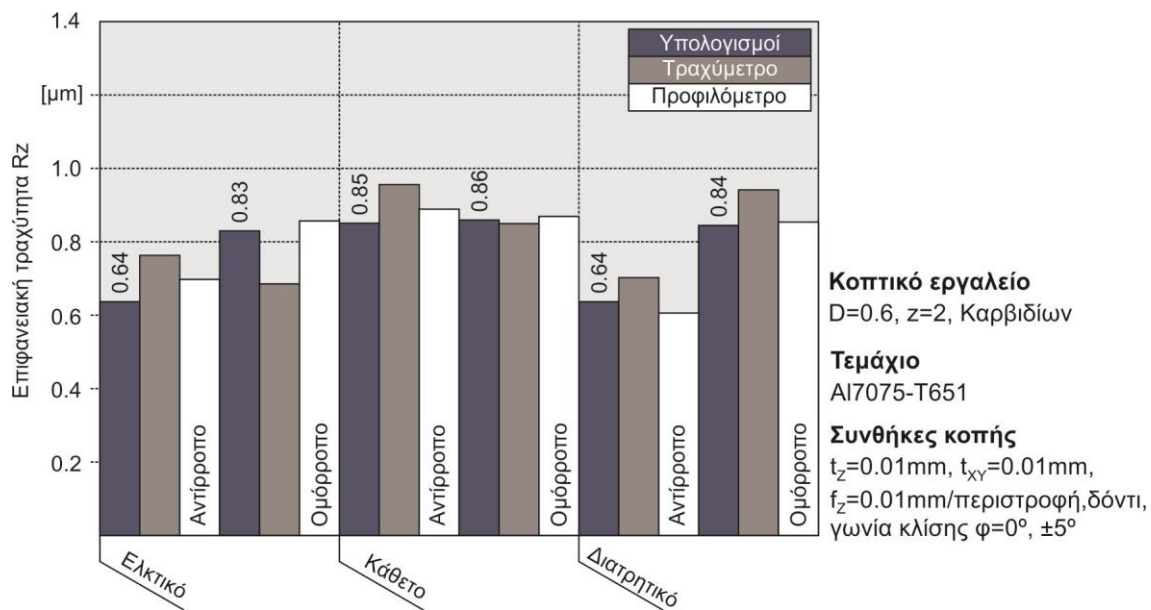
Σχήμα 5.3 Σύγκριση προκύπτουσας 3D τοπομορφίας με την πραγματική, Ø1.0mm

### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων επιφανειακής τραχύτητας

Με τη χρήση του τραχυμέτρου τύπου στυλίσκου και του οπτικού προφίλομέτρου παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα που εμφανίζουν μικρή απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Καθώς η ανάλυση των τιμών γίνεται σε επίπεδο μικρομέτρων είναι αναμενόμενες ορισμένες αποκλίσεις μεταξύ των δύο οργάνων. Η αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης αξιολογείται με βάση τις αποκλίσεις των τιμών των παραμέτρων τραχύτητας που αυτό εξάγει ως αποτελέσματα με τις τιμές που προέκυψαν από τα δύο όργανα μέτρησης.

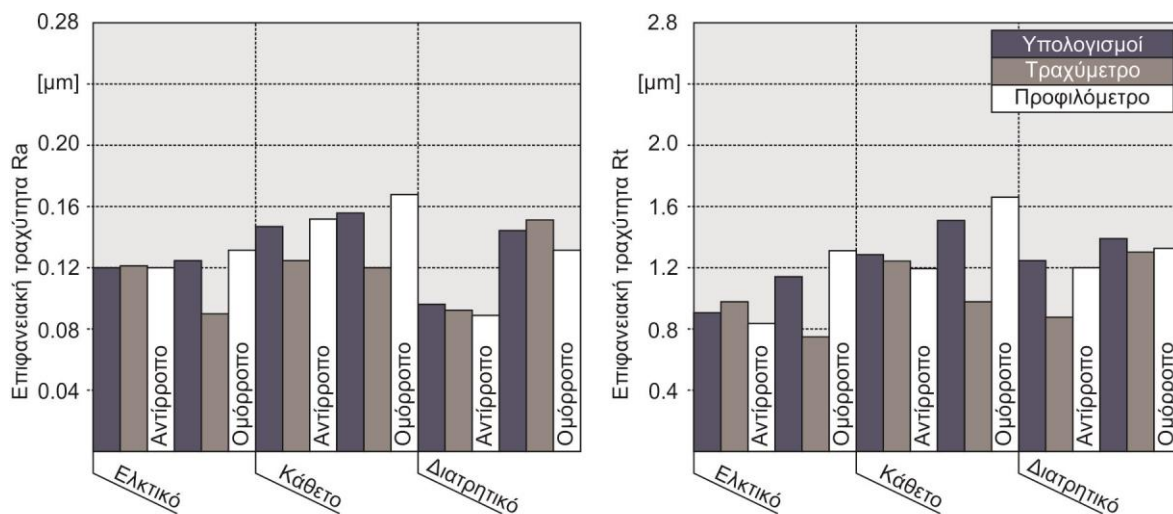
Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι τιμές τραχύτητας του μοντέλου είτε βρίσκονται ανάμεσα στις αντίστοιχες τιμές των δύο οργάνων μέτρησης είτε αρκετά κοντά σε αυτές. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποδεικνύεται η επαλήθευση του μοντέλου στην πρόβλεψη επιφανειακής τραχύτητας κράματος Al7075-T651.

Στο ακόλουθο [σχήμα 5.4](#) παρουσιάζονται συγκριτικά οι υπολογιστικές τιμές του μοντέλου με τις μετρούμενες πειραματικές της παραμέτρου τραχύτητας Rz για συγκεκριμένες συνθήκες κοπής, για κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 0.6mm.



Σχήμα 5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Rz, Ø0.6mm

Αντίστοιχα κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των παραμέτρων Ra και Rt όπως παρουσιάζονται στο [σχήμα 5.5](#). Προφανώς, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές της παραμέτρου Ra είναι μικρότερες από αυτές της παραμέτρου Rz και οι μεγαλύτερες τιμές είναι αυτές της παραμέτρου Rt.



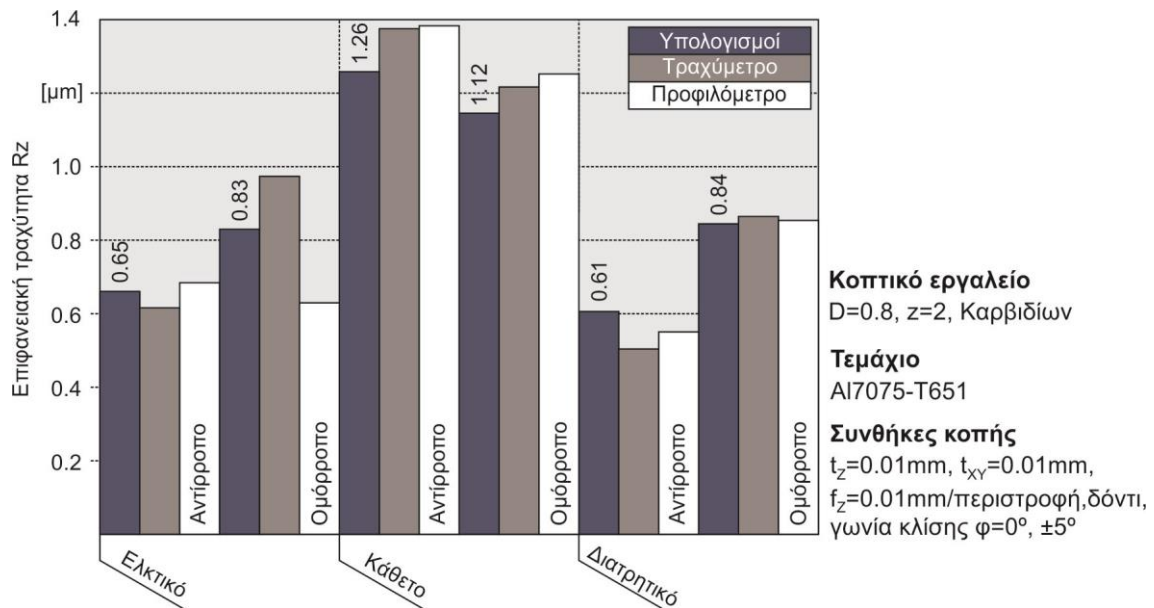
**Κοπτικό εργαλείο** D=0.6, z=2, Καρβιδίων  
**Τεμάχιο** Al7075-T651  
**Συνθήκες κοπής**  $t_z=0.01\text{mm}$ ,  $t_{xy}=0.01\text{mm}$ ,  $f_z=0.01\text{mm/περιστροφή, δόντι}$

Σχήμα 5.5 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Ra και Rt, Ø0.6mm

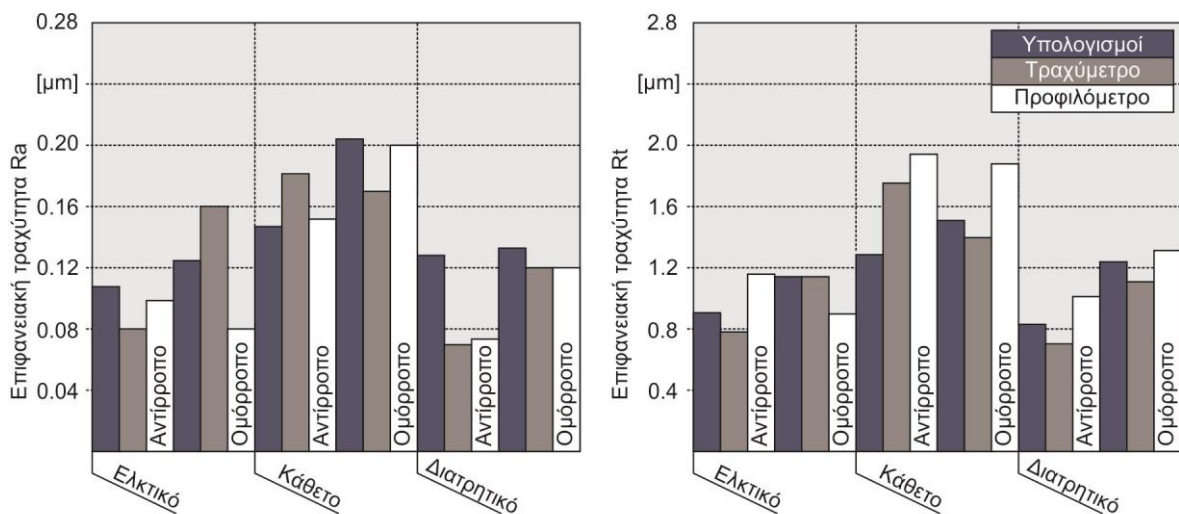
Από τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων είναι φανερό πως το μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα (Rz) αποτελεί ένα καλύτερο μέτρο σύγκρισης μεταξύ των τραχυτήτων διαφόρων επιφανειών όμοια με το μέσο αριθμητικό ύψος (Ra), ενώ αντίθετα το μέγιστο ύψος (Rt) εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις, πιθανώς ανάλογα την περιοχή της μέτρησης. Σε συνδυασμό με το γεγονός αυτό και καθότι το μοντέλο προσομοίωσης παράγει μια ιδεατή-ιδανική τοπομορφία, παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών Rt προφανώς λόγω και της κλίμακας που χρησιμοποιείται στην περιγραφή αυτής της παραμέτρου τραχύτητας.



Ομοίως με τα προηγούμενα κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα για την επαλήθευση των τιμών τραχύτητας του μοντέλου στα άλλα δύο κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν. Στο σχήμα 5.6 και στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων τραχύτητας για κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 0.8mm.



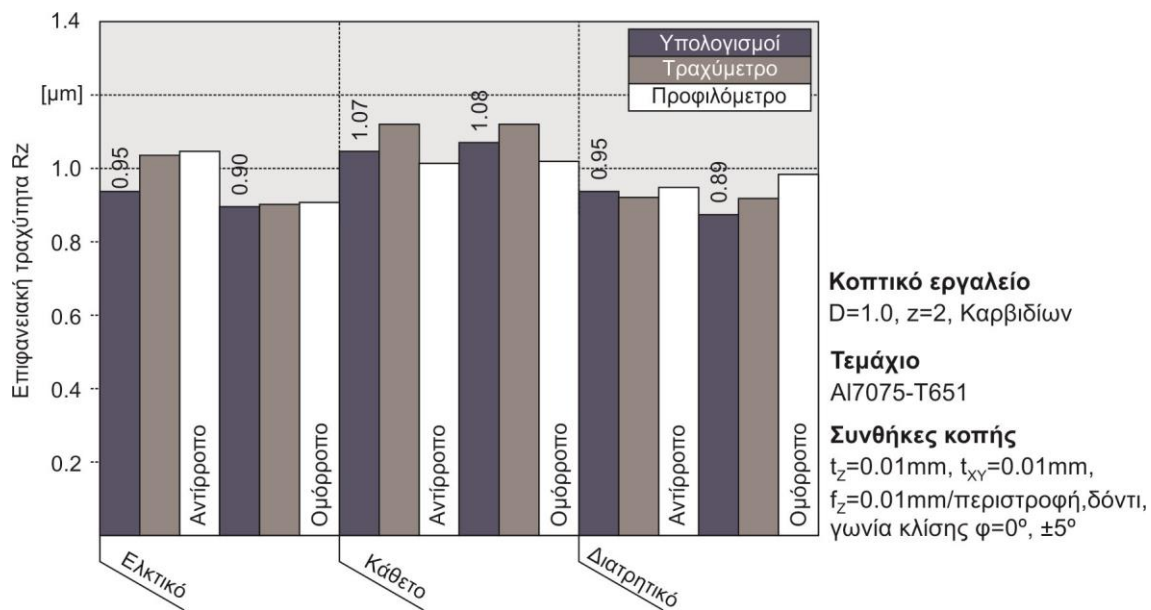
Σχήμα 5.6 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Rz, Ø0.8mm



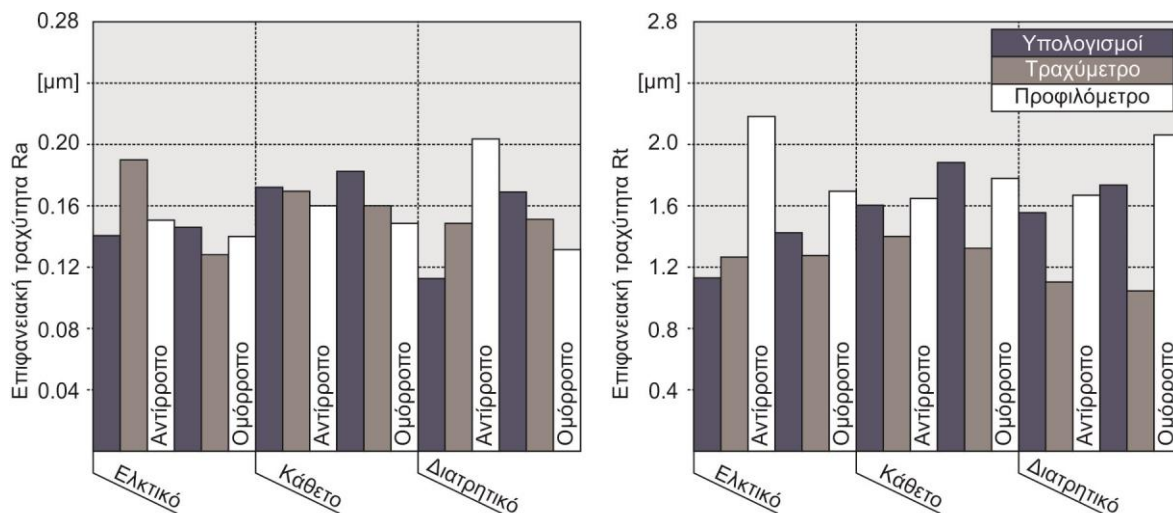
**Κοπτικό εργαλείο** D=0.8, z=2, Καρβιδίων  
**Τεμάχιο** Al7075-T651  
**Συνθήκες κοπής**  $t_z=0.01\text{mm}$ ,  $t_{xy}=0.01\text{mm}$ ,  $f_z=0.01\text{mm/περιστροφή}$ , δόντι

Σχήμα 5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Ra και Rt, Ø0.8mm

Οι τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων τραχύτητας για κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 1mm παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα 5.8 και 5.9.



Σχήμα 5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Rz, Ø1.0mm



**Κοπτικό εργαλείο** D=1.0, z=2, Καρβιδίων  
**Τεμάχιο** Al7075-T651  
**Συνθήκες κοπής**  $t_z=0.01\text{mm}$ ,  $t_{xy}=0.01\text{mm}$ ,  $f_z=0.01\text{mm/περιστροφή, δόντι}$

Σχήμα 5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα τραχύτητας Ra και Rt, Ø1.0mm

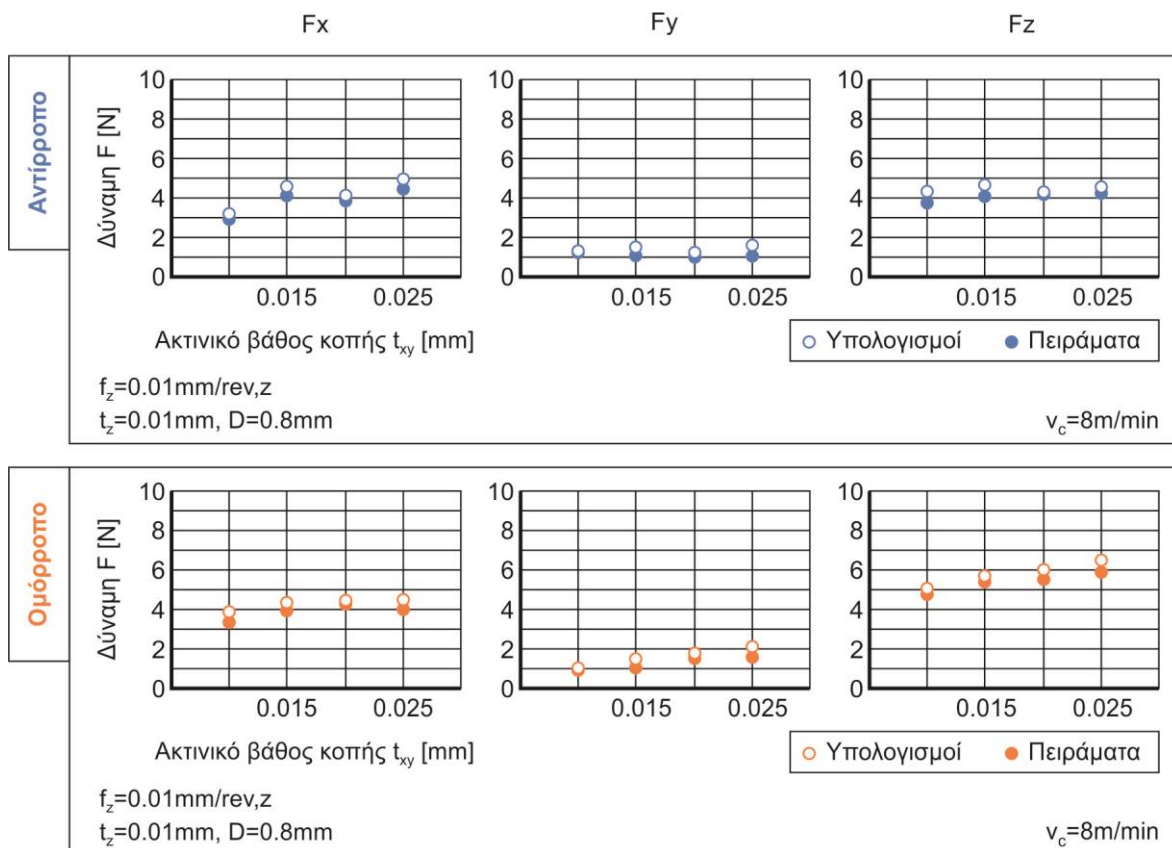
#### 5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων δυνάμεων κοπής

Όμοια με την τραχύτητα, ακολούθησε η σύγκριση των δυνάμεων κοπής. Η επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης ως προς τις δυνάμεις κοπής γίνεται μέσω των πειραμάτων που έγιναν σε πλάκες κράματος Al7075-T651.

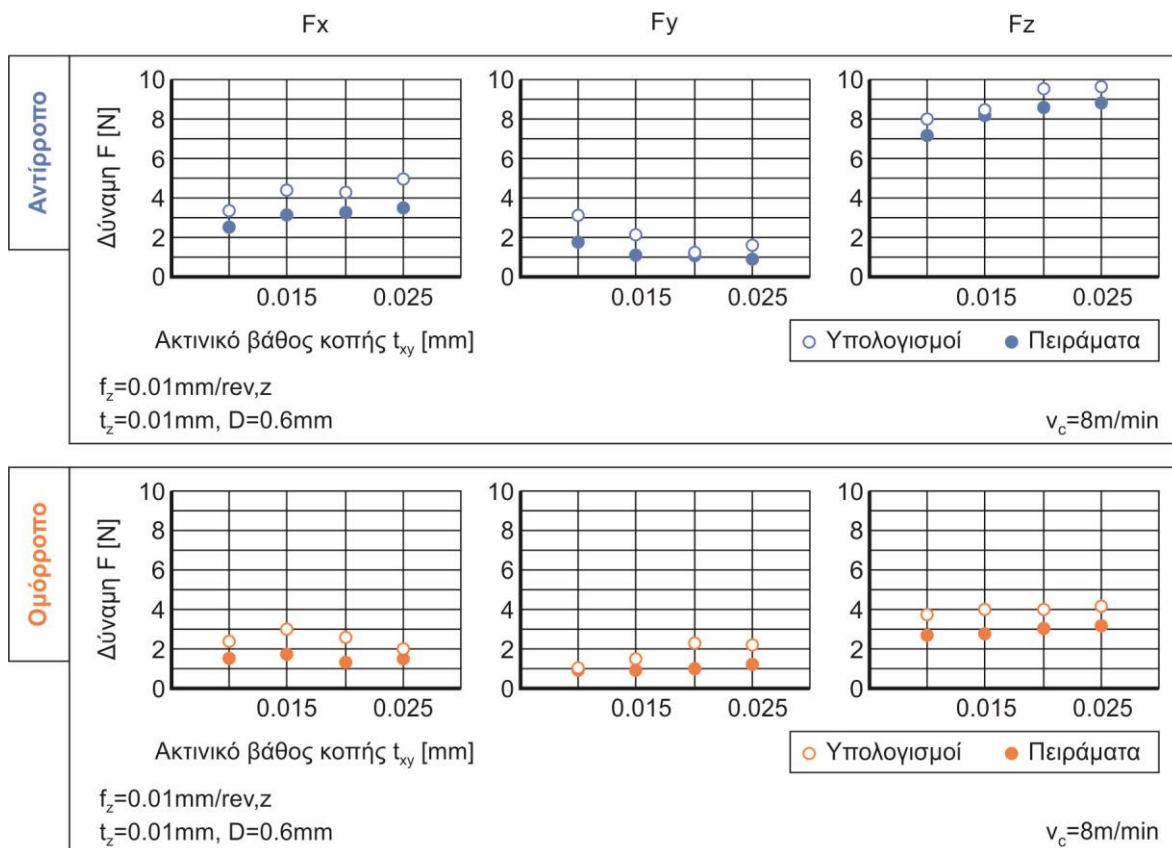
Στο παρακάτω [σχήμα 5.10](#) παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές των μέγιστων δυνάμεων κοπής συγκρινόμενες με τις θεωρητικές που υπολογίζονται μέσα από το μοντέλο προσομοίωσης για κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 0.8mm με ταχύτητα κοπής 8m/min, αξονικό βάθος κοπής 0.01mm και πρόωση ανά περιστροφή και δόντι 0.01mm/rev,z. Σύμφωνα με τα διαγράμματα οι τιμές των δυνάμεων κοπής προσεγγίζονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών, ειδικών αντιστάσεων κοπής και σταθερών κατεργαζόμενου υλικού.

Αντίστοιχη σύγκριση παρουσιάζεται στο [σχήμα 5.11](#) και το [σχήμα 5.12](#) για τα άλλα δύο

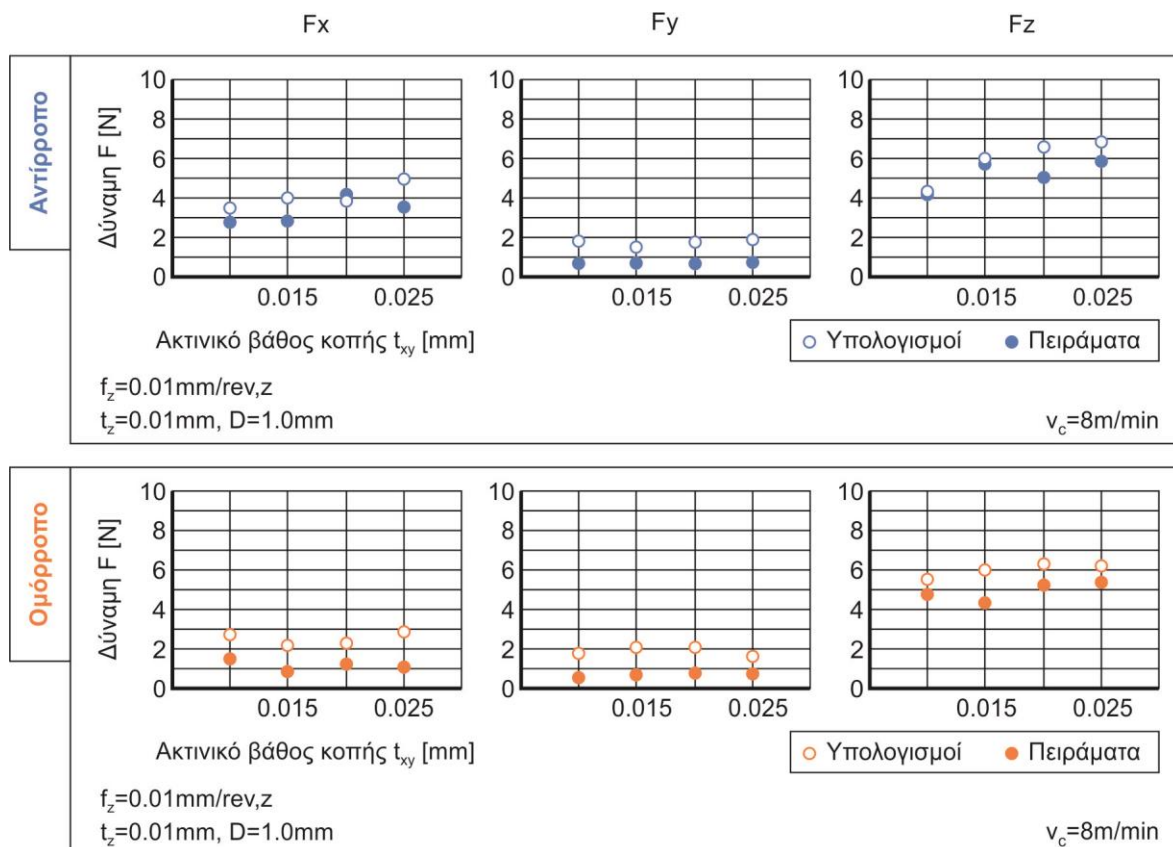
κοπτικά εργαλεία διαμέτρων 0.6mm και 1mm σε αντίστοιχες συνθήκες κοπής.



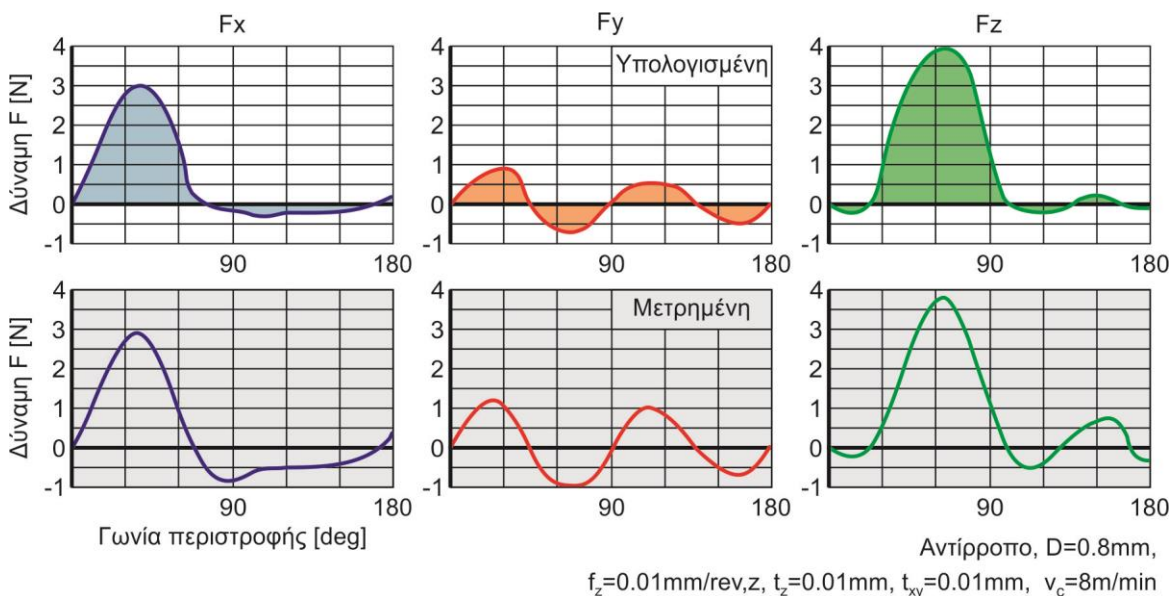
Σχήμα 5.10 Συγκριτικά αποτελέσματα μέγιστων δυνάμεων κοπής,  $\varnothing 0.8\text{mm}$



Σχήμα 5.11 Συγκριτικά αποτελέσματα μέγιστων δυνάμεων κοπής,  $\varnothing 0.6\text{mm}$

Σχήμα 5.12 Συγκριτικά αποτελέσματα μέγιστων δυνάμεων κοπής,  $\varnothing 1\text{mm}$ 

Παράλληλα επαληθεύτηκε το μοντέλο που αναπτύχθηκε και παρέχει την εξέλιξη της δύναμης ανά γωνία περιστροφής στον κάθε άξονα. Στο σχήμα 5.13 συγκρίνονται γραφικά τα αποτελέσματα δυνάμεων που απορρέουν από το μοντέλο προσομοίωσης με τα μετρούμενα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.13 Συγκριτικά αποτελέσματα δυνάμεων κοπής

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι ανάλογα με τις παραμέτρους του υλικού οι δυνάμεις κοπής μπορούν να υπολογιστούν με αρκετή ακρίβεια. Το γεωμετρικό μοντέλο μπορεί να παράγει ίδιας γεωμετρίας απόβλιττα για διαφορετικές τιμές ταχύτητας κοπής εφόσον είναι παράμετρος που δεν επηρεάζει τη διαδικασία προσομοίωσης. Για αυτόν το

λόγο οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων κοπής μεταβάλλονται ανάλογα με την ταχύτητα κοπής και εξαρτώνται από τη βιβλιογραφία ή και την εμπειρία του χρήστη για την προσαρμογή των δυνάμεων στις πραγματικές πειραματικές τιμές.







## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ AL7075-T651

### 6.1 Εισαγωγή

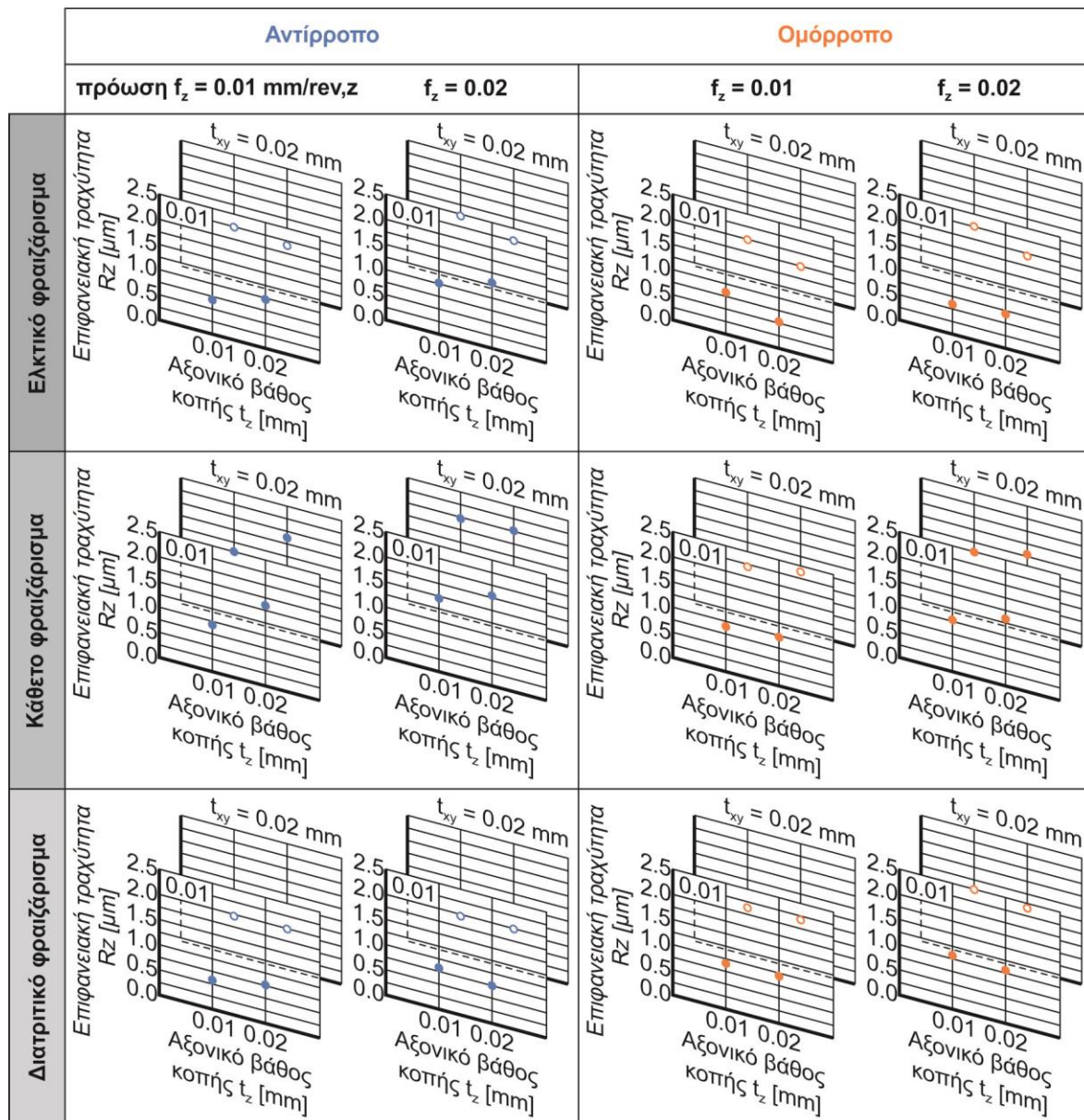
Από τα πειράματα που εκπονήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες κοπής σε κράμα αλουμινίου Al 7075-T651 κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχέτισης των συνθηκών κοπής με την επιφανειακή τραχύτητα και τις δυνάμεις κοπής. Η κύρια χρήση των διαγραμμάτων είναι η παρατήρηση της επίδρασης του εκάστοτε παράγοντα κοπής στα μετρούμενα αποτελέσματα με σκοπό τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η πειραματική μελέτη σε διάφορες συνθήκες κοπής παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά των παραγόντων στην επιφανειακή τραχύτητα και στις δυνάμεις κοπής με αποτέλεσμα να λαμβάνεται γνώση για χρήση συνθηκών που βελτιώνουν την ποιότητα της επιφάνειας ή/και παράλληλα μειώνουν τον κίνδυνο θραύσης του κοπτικού εργαλείου.

### 6.2 Επιδράσεις συνθηκών στην τραχύτητα επιφάνειας

Με τη χρήση των τιμών τραχύτητας κατασκευάστηκαν χρήσιμα διαγράμματα από τα οποία προκύπτει η συμπεριφορά των συνθηκών κοπής στην επιφανειακή τραχύτητα υπό διάφορες στρατηγικές φραιζαρίσματος. Παρατηρώντας την τάση των τιμών τραχύτητας γίνεται εκτίμηση των ιδανικών συνθηκών που μπορούν να εφαρμοσθούν στην κατεργασία κράματος αλουμινίου Al7075-T651 κατά το μικροφραιζάρισμα με κοπτικό εργαλείο σφαιρικής απόληξης.

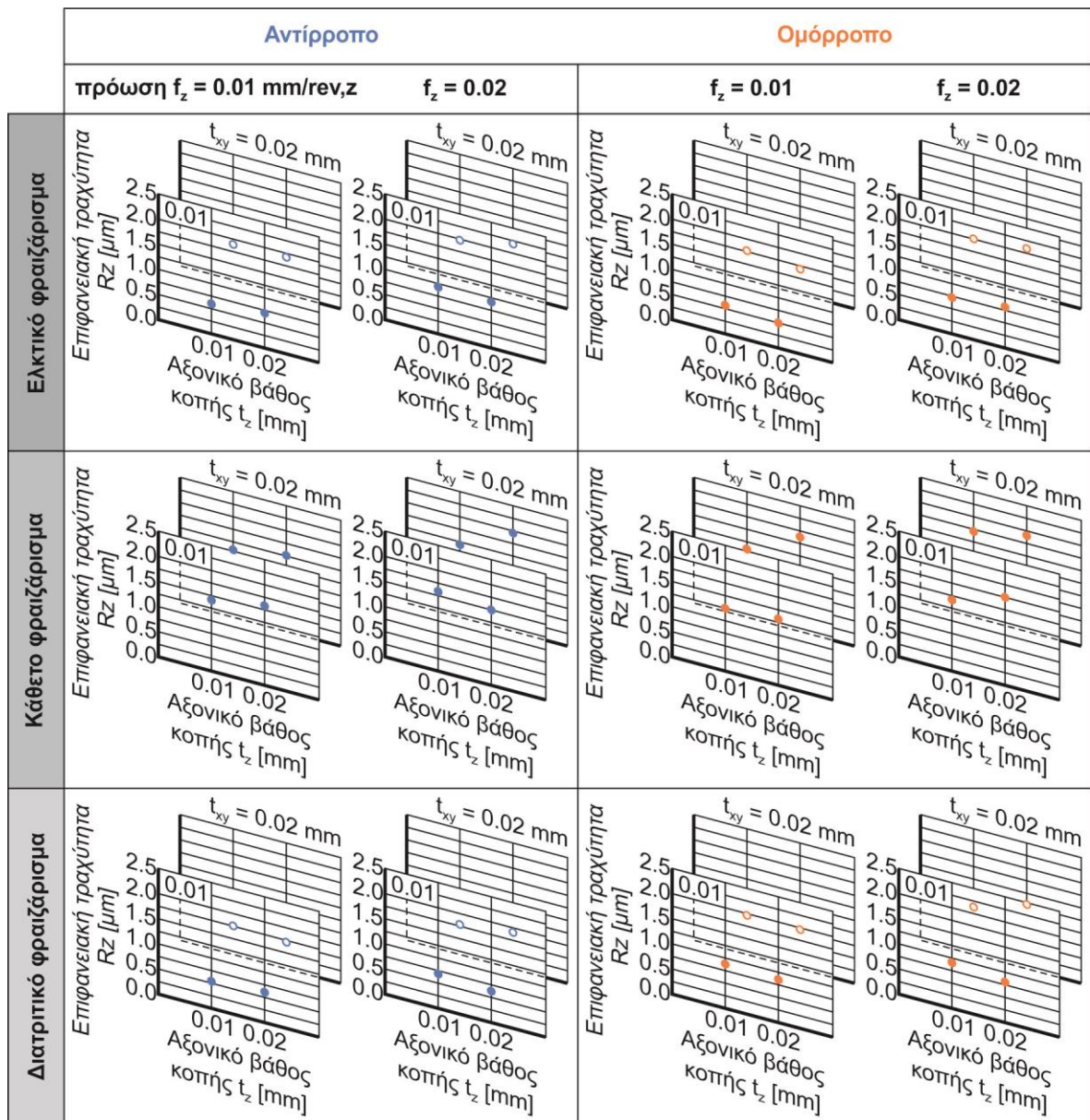
Μια γενική παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι στο μικροφραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, όμοια με το συνηθισμένο φραιζάρισμα της μάκρο-κλίμακας, η στρατηγική του κάθετου φραιζαρίσματος παράγει επιφάνειες με υψηλότερες τιμές τραχύτητας από ότι οι στρατηγικές του διατρητικού και ελκτικού φραιζαρίσματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται προφανώς στη μεγαλύτερη μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια που το κοπτικό εργαλείο δεν αφαιρεί υλικό στο κάθετο φραιζάρισμα. Σε αντίθεση με το κάθετο φραιζάρισμα, στις άλλες δύο στρατηγικές το άκρο της απόληξης δεν επιδρά στην κατεργασία της επιφάνειας και μόνο η κοπτική ακμή επιδρά στο αποτέλεσμα της κατεργαζόμενης επιφάνειας.

Στα ακόλουθα σχήματα 6.1, 6.2 και 6.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης των συνθηκών κοπής με την προκύπτουσα επιφανειακή τραχύτητα  $R_z$  κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε. Παράλληλα έγινε διαχωρισμός των διαγραμμάτων ανάλογα με τη στρατηγική φραιζαρίσματος, την πρόωση ανά περιστροφή και δόντι και το ακτινικό βάθος κοπής. Το κάθε διάγραμμα παρουσιάζει την τιμή επιφανειακής τραχύτητας για κάθε τιμή του αξονικού βάθους κοπής που έχει επιλεγεί.



Σχήμα 6.1 Επίδραση συνθηκών στην επιφανειακή τραχύτητα  $R_z$ , εργαλείο  $\varnothing 0.6 \text{ mm}$

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της πρόωσης στις περισσότερες περιπτώσεις αυξάνει η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας. Το ίδιο συμβαίνει και στις περιπτώσεις αύξησης της τιμής του αξονικού και του ακτινικού βάθους κοπής. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της γωνίας κλίσης κατά απόλυτη τιμή, δηλαδή στο ελκτικό και το διατρητικό φραιζάρισμα, οδηγεί σε μικρότερες τιμές τραχύτητας. Αυτό αποδεικνύει ότι κατά το μικροφραιζάρισμα η επίδραση της απόληξης του σφαιρικού κοπτικού εργαλείου σε σύνδεση με το φαινόμενο όπου το κοπτικό δεν αφαιρεί υλικό αλλά ολισθαίνει πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, φέρει ως αποτέλεσμα σχετικά κακής ποιότητας επιφάνεια.

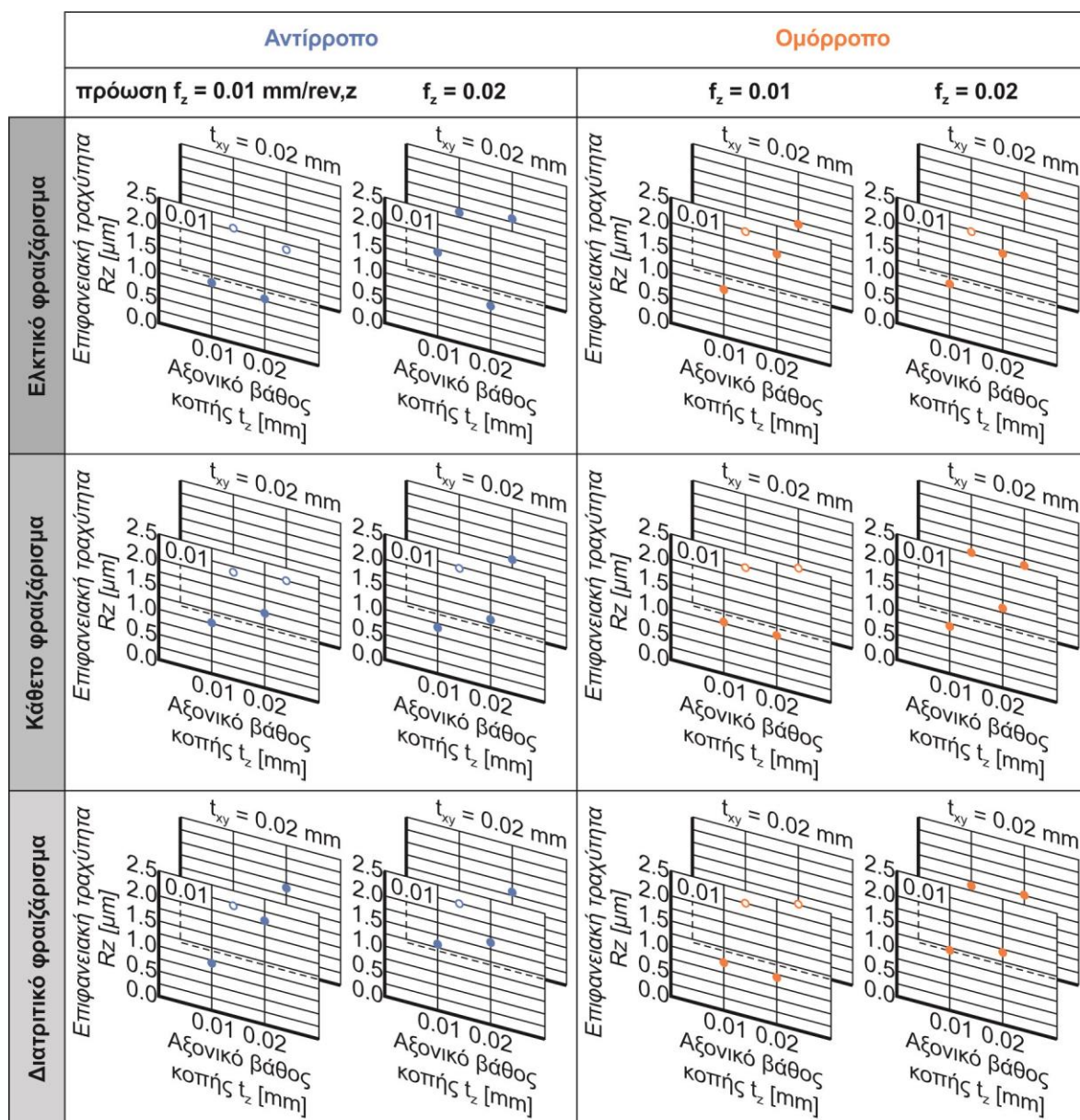


Σχήμα 6.2 Επίδραση συνθηκών στην επιφανειακή τραχύτητα Rz, εργαλείο Ø0.8mm

Σε κάθε στρατηγική φραιζαρίσματος που εφαρμόστηκε, μεταξύ των τριών εργαλείων, δεν παρατηρείται απόλυτη συσχέτιση της διαμέτρου του εργαλείου με το αποτέλεσμα της επιφάνειας. Με βάση τις συνθήκες κοπής που εφαρμόστηκαν το κοπτικό εργαλείο διαμέτρου Ø0.8 mm είναι αυτό που κατά την κατεργασία του προσφέρει τις μικρότερες τιμές των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας.

Αν και οι τιμές των παραμέτρων τραχύτητας απευθύνονται σε διαφορετικής τάξης κλίμακα, ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις για όλες τις παραμέτρους με τη διαφορά της μεταβολής των μεταξύ τους αποκλίσεων. Σε γενικές γραμμές η αύξηση των μεγεθών της πρώωσης, του ακτινικού βάθους κοπής και του αξονικού βάθους κοπής ακολουθείται από αύξηση της προκύπτουσας επιφανειακής τραχύτητας.



Σχήμα 6.3 Επίδραση συνθηκών στην επιφανειακή τραχύτητα Rz, εργαλείο  $\varnothing 1 \text{ mm}$ 

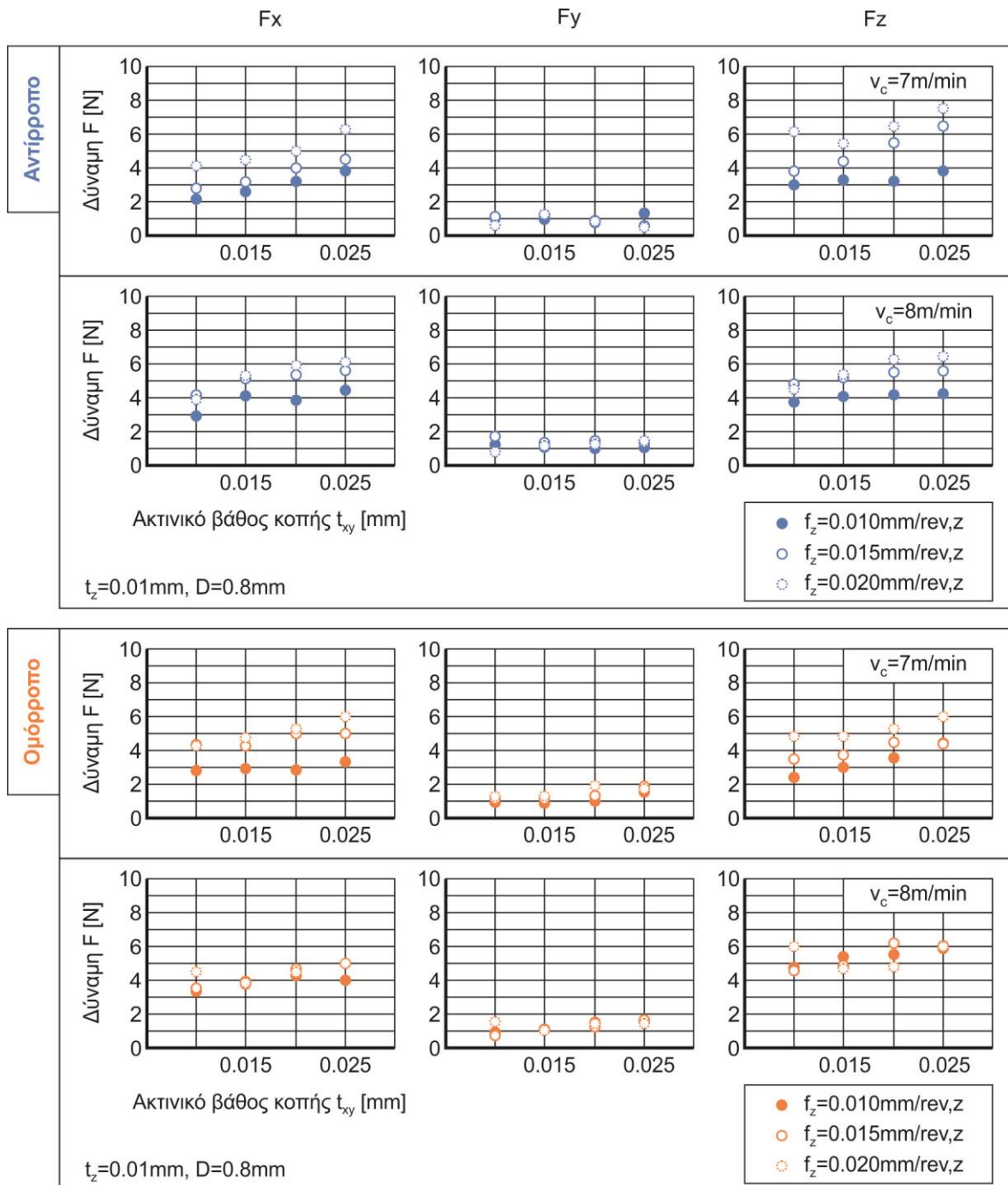
### 6.3 Επιδράσεις συνθηκών στις δυνάμεις κοπής

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των δυνάμεων κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχέτισής τους με τους παράγοντες κοπής. Σύμφωνα με τις συνθήκες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας κοπής αυξάνονται οι τιμές των μέγιστων τιμών των δυνάμεων και στις τρεις συνιστώσες της κύριας δύναμης κοπής. Αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές αυξάνονται με την αύξηση της τιμής της πρόωσης και του ακτινικού βάθους κοπής. Η επίδραση του αξονικού βάθους κοπής πάνω στις συνιστώσες δύναμης δε φαίνεται να τις επηρεάζει καθ' ότι οι τιμές των δυνάμεων παραμένουν πρακτικά σταθερές, με παρατήρηση ελάχιστης αύξησης της δύναμης  $F_y$  σε ορισμένες περιπτώσεις.

Από τα τέσσερα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν αυτό που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές δύναμης και στις τρεις συνιστώσες είναι το  $\varnothing 0.8 \text{ mm}$ , το οποίο όμως αποδείχθηκε ότι επιφέρει την καλύτερη επιφανειακή τραχύτητα και ως εκ τούτου την καλύτερης ποιότητας επιφάνεια.

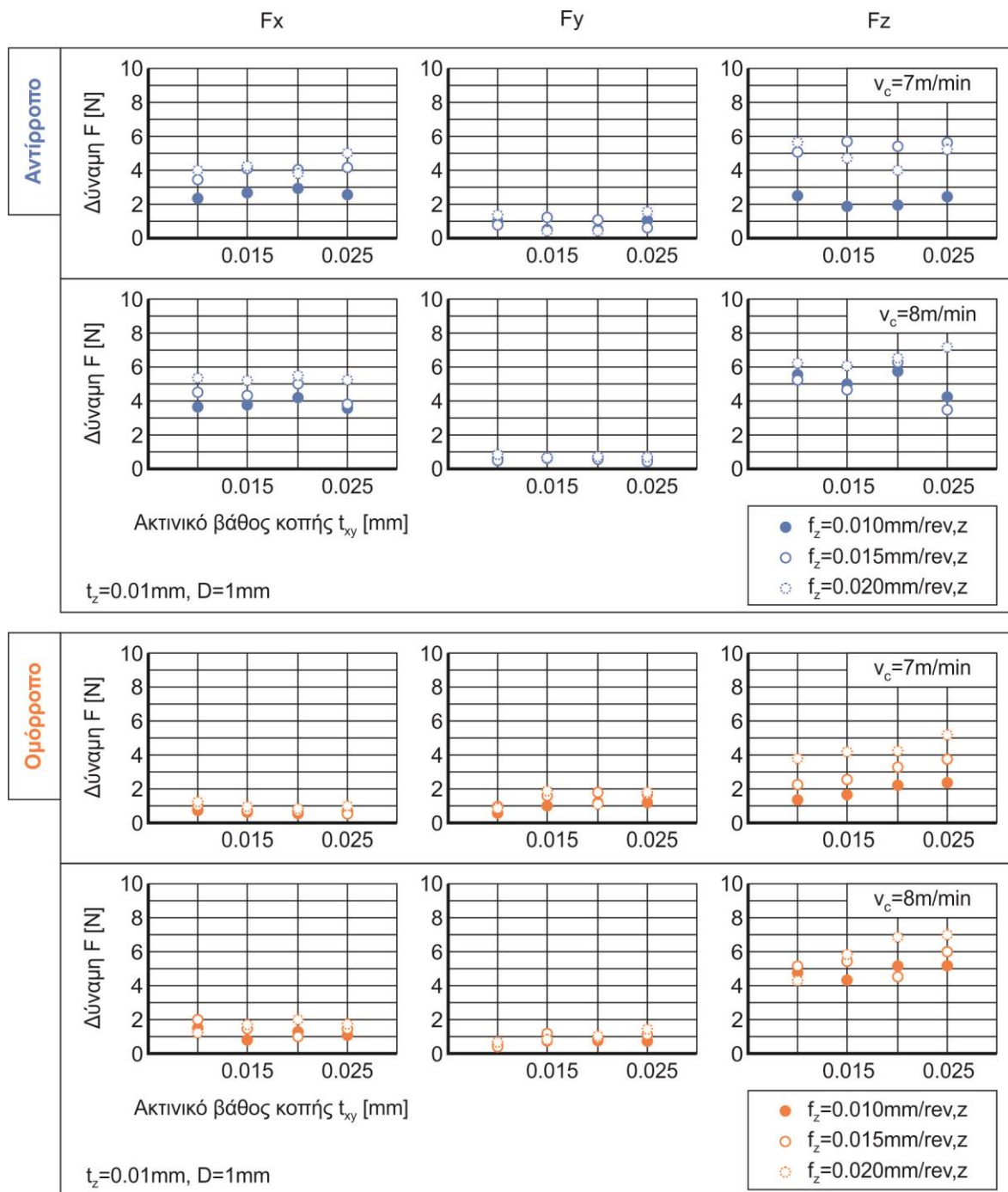


Στο ακόλουθο σχήμα 6.4 προβάλλονται μερικά από τα διαγράμματα από τα οποία εξαγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα. Τα διαγράμματα είναι κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με τη στρατηγική φραιζαρίσματος και τις δύο διαφορετικές ταχύτητες κοπής ( $v_c$ ) που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 6.4 Επίδραση συνθηκών στις δυνάμεις κοπής, εργαλείο  $\varnothing 0.8\text{mm}$

Ομοίως, στο σχήμα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής για κοπτικό εργαλείο διαμέτρου  $1\text{mm}$ . Γενικώς παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής αυξάνει και την τιμή των δυνάμεων κοπής.

Σχήμα 6.5 Επίδραση συνθηκών στις δυνάμεις κοπής, εργαλείο  $\varnothing 1\text{mm}$ 

#### 6.4 Ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis)

Μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος πρόβλεψης της τραχύτητας επιφάνειας είναι η μεθοδολογία απόκρισης επιφάνειας (Roughness Surface Methodology). Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί την ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis) και την ανάλυση διασποράς (Analysis of Variance, ANOVA) για τη δημιουργία μιας εξίσωσης βάσει των παραγόντων που χρησιμοποιούνται.

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, πολλά στατιστικά λογισμικά πακέτα έχουν δημιουργηθεί κάνοντας τις παραπάνω μεθόδους εύκολες στη χρήση τους και με άμεσα αποτελέσματα. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται το λογισμικό Minitab 17 Statistical Software. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα στατιστικής επεξεργασίας μετρήσεων και εφαρμογή μαθηματικών και στατιστικών μεθόδων που σκοπό έχουν την αξιολόγηση ή

και την πρόβλεψη τιμών. Οι πράξεις μεταξύ στηλών γίνονται εύκολα και γρήγορα μέσα από υπολογιστικές σχέσεις που μπορεί να συντάξει ο χρήστης ανάλογα τις απαιτήσεις του.

#### 6.4.1 Ανάλυση παλινδρόμησης

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

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

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (6.1)$$

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6.2)$$

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{ij} X_i X_j + \beta_{11} X_1^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2 + \varepsilon \quad (6.3)$$

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

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

#### 6.4.2 Ανάλυση διασποράς

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

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

$$SST = SSR + SSE$$

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

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (6.4)$$

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

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.5)$$

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

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6.6)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $y_i$  είναι οι τιμές των παρατηρήσεων (απόκρισης),  $\hat{y}_i$  είναι η προσαρμοσμένη τιμή και  $\bar{y}$  είναι η μέση τιμή του δείγματος. Επιπλέον ορίζεται ο συντελεστής προσδιορισμού ( $r^2$ ), ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέτρο της ακρίβειας της προσαρμογής:

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (6.7)$$

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

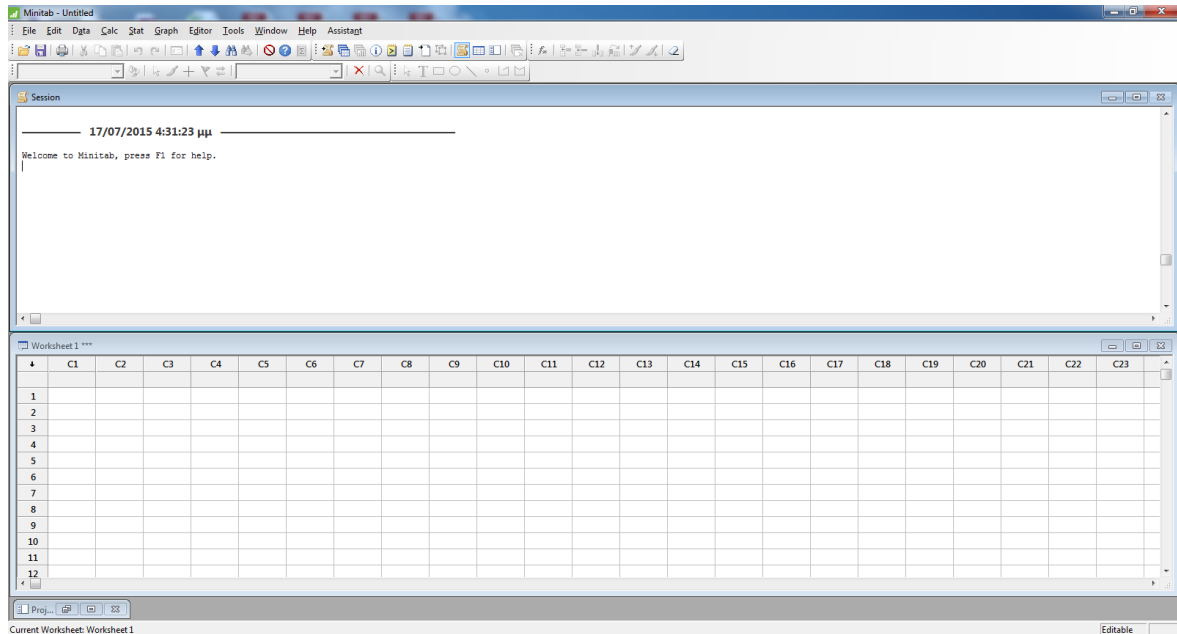
Προέλευση μεταβλητότητας	Βαθμοί ελευθερίας DF (degrees of freedom)	Άθροισμα τετραγώνων SS (Sum of Squares)	Μέσο τετράγωνο MS (Mean Square)	Τιμή της F
Παλινδρόμηση	v	SSR	SSR/v	SSR/s <sup>2</sup>
Υπόλοιπα	n-2	SSE	s <sup>2</sup> = SSE/(n-2)	
Ολική	n-2+v	SST		

Σχήμα 6.6 Ενδεικτικός πίνακας ανάλυσης διασποράς

#### 6.4.3 Στατιστικό πακέτο Minitab

Το λογισμικό Minitab είναι ένα στατιστικό πακέτο εύκολο στη χρήση. Τα δεδομένα εισάγονται σε ένα πεδίο (Worksheet) όμοιο με λογιστικό φύλλο του excel όπου στην πρώτη γραμμή ο χρήστης μπορεί να δώσει το όνομα του εκάστοτε παράγοντα και στις ακόλουθες αριθμημένες γραμμές εισάγει τις αντίστοιχες τιμές των παραγόντων. Τα αποτελέσματα του προγράμματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη, προβάλλονται στο πεδίο που φέρει την ονομασία Session. Όλες οι αριθμητικές και συγκριτικές μέθοδοι καθώς και πράξεις μεταξύ των δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κλήση από την κύρια γραμμή μενού. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη, μπορούν να παρουσιαστούν διαγράμματα συσχετίσεως παραγόντων, γραφικές παραστάσεις, καμπύλες κατανομών, κ.λπ.. Το περιβάλλον του λογισμικού παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 6.7.





Σχήμα 6.7 Περιβάλλον Minitab 17

Αρχικά εισάγονται οι τιμές των συνθηκών κοπής και των τιμών τραχύτητας. Ως παράγοντες πρόβλεψης της τραχύτητας χρησιμοποιήθηκαν το αξονικό βάθος κοπής ( $t_z$ ), το ακτινικό βάθος κοπής ( $t_{xy}$ ) και η πρόωση ανά δόντι ( $f_z$ ). Η γωνία κλίσης  $\phi$  του κοπτικού εργαλείου δε λαμβάνονται υπόψη καθ' ότι τα επιθυμητά αποτελέσματα διαχωρίζονται σύμφωνα με τη στρατηγική του φραιζαρίσματος που ακολουθήθηκε. Επίσης, έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιώντας τη σύμβαση ότι αρνητικές τιμές πρόωσης ανά δόντι απευθύνονται σε αντίρροπο φραιζάρισμα ενώ αντίθετα οι θετικές τιμές στο ομόρροπο.

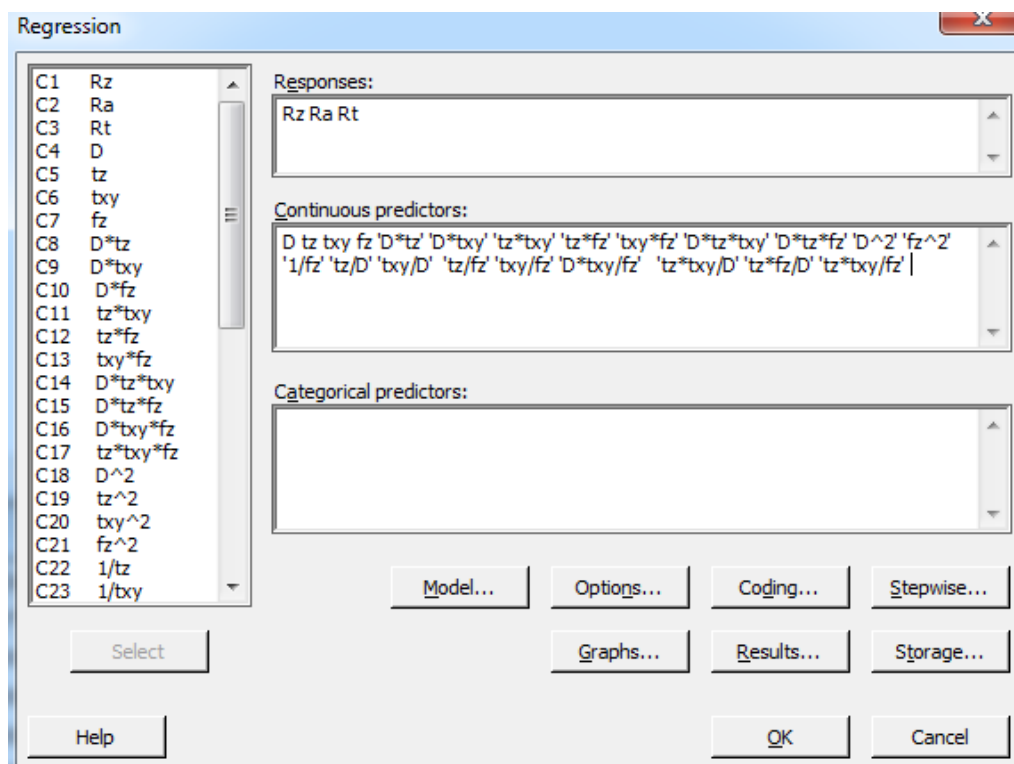
Εάν χρησιμοποιούνταν μόνο οι ανωτέρω τρεις συνθήκες κοπής ως παράγοντες πρόβλεψης, το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης θα παρήγαγε μια εξίσωση η οποία δε θα ταίριαζε αρκετά καλά στα δεδομένα ή θα είχε μικρό διάστημα εμπιστοσύνης για τον κάθε παράγοντα. Σε ακόμα χειρότερη περίπτωση, είναι δυνατόν οι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

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

Worksheet 1 ***																															
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	
	Rz	Ca	Rt	Dz	tx	ty	tz	D'tz	D'txy	D'tz	tx'ty	tz'tz	tx'yz	D't'xyz	D't'xyz	tx'yz'tz	D't'xyz'tz	D't'xyz'tz	D't'xyz'tz	tx'yz'tz	tz'^2	tx'^2	1/tz	1/tx	1/D	1/tz	tz/D	txy/D	tz/D	D'tz	txy/tz
1	1.015	0.157	1.654	1.0	0.01	0.01	-0.01	0.010	0.010	-0.010	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.00010	-0.00010	-0.00010	-0.000001	1.00	0.0001	0.0001	0.0001	100	100	1.00000	-100	0.0100000	0.0100000	-0.0100000	100	1	
2	0.931	0.146	1.637	1.0	0.01	0.01	-0.02	0.010	0.010	-0.020	0.0001	-0.0002	-0.0002	0.00010	-0.00020	-0.00020	-0.000002	1.00	0.0001	0.0004	0.0004	100	100	1.00000	-50	0.0100000	0.0100000	-0.0200000	100	1	
3	0.922	0.156	1.341	1.0	0.01	0.02	-0.01	0.010	0.020	-0.010	0.0002	-0.0001	-0.0002	0.00020	-0.00010	-0.00020	-0.000002	1.00	0.0001	0.0004	0.0004	100	50	1.00000	-100	0.0100000	0.0200000	-0.0100000	100	2	
4	1.089	0.139	2.166	1.0	0.01	0.02	-0.02	0.010	0.020	-0.020	0.0002	-0.0002	-0.0004	0.00020	-0.00020	-0.00040	-0.000004	1.00	0.0001	0.0004	0.0004	100	50	1.00000	-50	0.0100000	0.0200000	-0.0200000	100	2	
5	1.485	0.193	2.717	1.0	0.02	0.01	-0.01	0.020	0.010	-0.010	0.0002	-0.0002	-0.0001	0.00020	-0.00020	-0.00010	-0.000002	1.00	0.0004	0.0001	0.0001	50	100	1.00000	-100	0.0200000	0.0100000	-0.0100000	50	0	
6	1.368	0.171	2.519	1.0	0.02	0.01	-0.02	0.020	0.010	-0.020	0.0002	-0.0004	-0.0002	0.00020	-0.00040	-0.00020	-0.000004	1.00	0.0004	0.0001	0.0004	50	100	1.00000	-50	0.0200000	0.0100000	-0.0200000	50	0	
7	1.115	0.169	1.861	1.0	0.02	0.02	-0.01	0.020	0.020	-0.010	0.0004	-0.0002	-0.0002	0.00040	-0.00020	-0.00020	-0.000004	1.00	0.0004	0.0001	0.0001	50	50	1.00000	-100	0.0200000	0.0200000	-0.0100000	50	1	
8	1.489	0.171	2.913	1.0	0.02	0.02	-0.02	0.020	0.020	-0.020	0.0004	-0.0004	-0.0004	0.00040	-0.00040	-0.00040	-0.000008	1.00	0.0004	0.0004	0.0004	50	50	1.00000	-50	0.0200000	0.0200000	-0.0200000	50	1	
9	1.080	0.145	1.783	1.0	0.01	0.01	0.01	0.010	0.010	0.010	0.0001	0.0001	0.0001	0.00010	0.00010	0.00010	0.000001	1.00	0.0001	0.0001	0.0001	100	100	1.00000	100	0.0100000	0.0100000	0.0100000	100	1	
10	0.953	0.162	1.270	1.0	0.01	0.01	0.02	0.010	0.010	0.020	0.0001	0.0002	0.0002	0.00010	0.00020	0.00020	0.000002	1.00	0.0001	0.0001	0.0004	100	100	1.00000	50	0.0100000	0.0100000	0.0200000	100	1	
11	1.147	0.157	2.185	1.0	0.01	0.02	0.01	0.010	0.020	0.010	0.0002	0.0001	0.0002	0.00020	0.00010	0.00020	0.000002	1.00	0.0001	0.0004	0.0001	100	50	1.00000	100	0.0100000	0.0200000	0.0100000	100	2	
12	1.343	0.179	2.574	1.0	0.01	0.02	0.02	0.010	0.020	0.020	0.0002	0.0002	0.0004	0.00020	0.00020	0.00040	0.000004	1.00	0.0001	0.0004	0.0004	100	50	1.00000	50	0.0100000	0.0200000	0.0200000	100	2	
13	1.088	0.137	2.051	1.0	0.02	0.01	0.01	0.020	0.010	0.010	0.0002	0.0002	0.0001	0.00020	0.00020	0.00010	0.000002	1.00	0.0004	0.0001	0.0001	50	100	1.00000	100	0.0200000	0.0100000	0.0100000	50	0	
14	1.584	0.187	2.554	1.0	0.02	0.01	0.02	0.020	0.010	0.020	0.0002	0.0004	0.0002	0.00020	0.00040	0.00020	0.000004	1.00	0.0004	0.0001	0.0004	50	100	1.00000	50	0.0200000	0.0100000	0.0200000	50	0	
15	1.305	0.187	2.435	1.0	0.02	0.02	0.01	0.020	0.020	0.010	0.0004	0.0002	0.0002	0.00040	0.00020	0.00020	0.000004	1.00	0.0004	0.0001	0.0001	50	50	1.00000	100	0.0200000	0.0200000	0.0100000	50	1	
16	1.353	0.190	2.312	1.0	0.02	0.02	0.02	0.020	0.020	0.020	0.0004	0.0004	0.0004	0.00040	0.00040	0.00040	0.000008	1.00	0.0004	0.0004	0.0004	50	50	1.00000	50	0.0200000	0.0200000	0.0200000	50	1	
17	1.390	0.143	1.938	0.8	0.01	0.01	-0.01	0.008	0.008	-0.008	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.00008	-0.00008	-0.00008	-0.000001	0.64	0.0001	0.0001	0.0001	100	100	1.25000	-100	0.0125000	0.0125000	-0.0125000	80	1	
18	1.636	0.195	2.764	0.8	0.01	0.01	-0.02	0.008	0.008	-0.016	0.0001	-0.0002	-0.0002	0.00008	-0.00016	-0.00016	-0.000002	0.64	0.0001	0.0001	0.0004	100	100	1.25000	-50	0.0125000	0.0125000	-0.0250000	80	1	
19	1.314	0.197	2.319	0.8	0.01	0.02	-0.01	0.008	0.016	-0.008	0.0002	-0.0001	-0.0002	0.00016	-0.00008	-0.00016	-0.000002	0.64	0.0001	0.0004	0.0001	100	50	1.25000	-100	0.0125000	0.0250000	-0.0125000	80	2	
20	1.426	0.194	2.327	0.8	0.01	0.02	-0.02	0.008	0.016	-0.016	0.0002	-0.0002	-0.0004	0.00016	-0.00016	-0.00032	-0.000004	0.64	0.0001	0.0004	0.0004	100	50	1.25000	-50	0.0125000	0.0250000	-0.0250000	80	2	

Σχήμα 6.8 Κατασκευασμένοι παράγοντες

Αφού κατασκευαστούν οι νέοι παράγοντες (σχήμα 6.8) τους οποίους εκτιμά ο χρήστης ότι απαιτούνται, εφαρμόζεται ανάλυση παλινδρόμησης (σχήμα 6.9). Το αποτέλεσμα της ανάλυσης παλινδρόμησης δείχνει το μέσον της τιμής P (P-value) το πόσο σημαντικός είναι ο κάθε ένας παράγοντας, δηλαδή τη συνεισφορά του για τη δημιουργία της καμπύλης των δεδομένων που προσεγγίζει. Μικρές τιμές P σηματοδοτούν ότι οι παράγοντες είναι σημαντικοί και ισχύουν για υψηλό διάστημα εμπιστοσύνης. Αν κάποιος παράγοντας έχει μεγάλη τιμή P, τότε αυτός είτε αφαιρείται από την ανάλυση παλινδρόμησης, είτε δοκιμάζεται υψωμένος σε μεγαλύτερη τάξη. Το αποτέλεσμα καθορίζεται από τη στιγμή που ο χρήστης θεωρεί ότι είναι εντός των επιθυμητών ορίων.

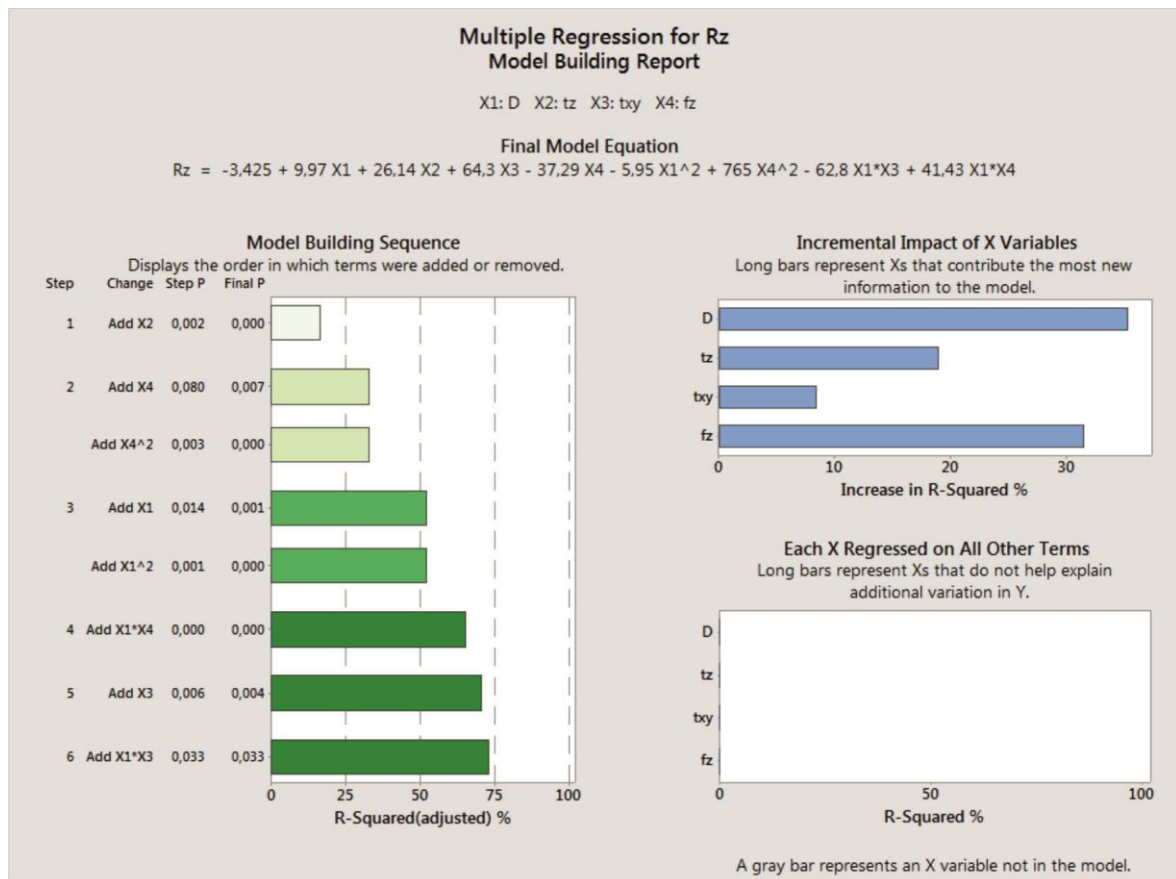


Σχήμα 6.9 Επιλογή απόκρισης και παραγόντων στην ανάλυση παλινδρόμησης

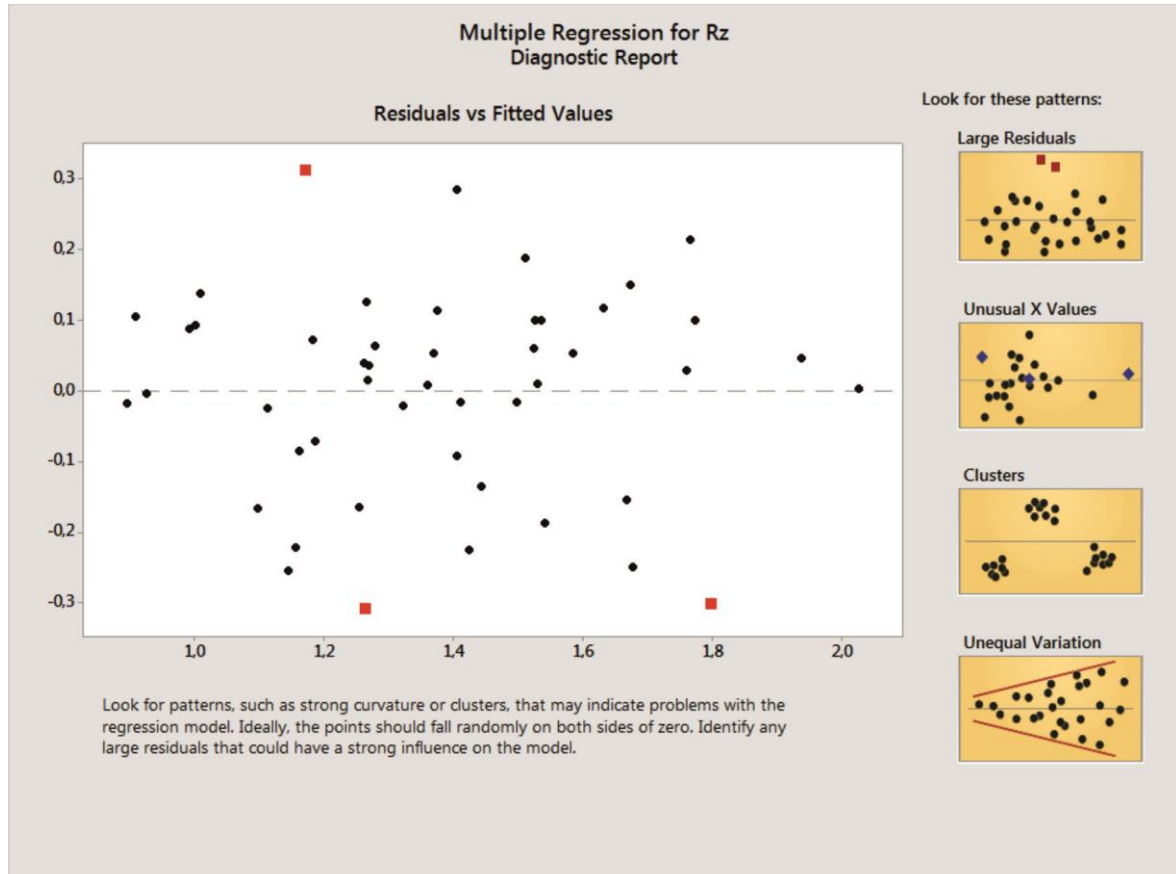
#### 6.4.4 Πρόβλεψη τραχύτητας επιφάνειας

Στην ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά διαφορετικού παράγοντες για την εκτίμηση των εξισώσεων πρόβλεψης των παραμέτρων τραχύτητας Rz, Ra και Rt. Ο λόγος διαφοροποίησης των παραμέτρων είναι αντίστοιχος με το γεγονός ότι κατεργασμένες επιφάνειες υπό διαφορετικές συνθήκες μπορούν να δώσουν ίδιες τιμές σε μία παράμετρο τραχύτητας αλλά να διαφέρουν στις άλλες παραμέτρους. Αποτέλεσμα αυτού είναι κάθε εξίσωση εκτίμησης μιας παραμέτρου τραχύτητας να διαφέρει ως προς το πλήθος και τη σύνθεση των όρων.

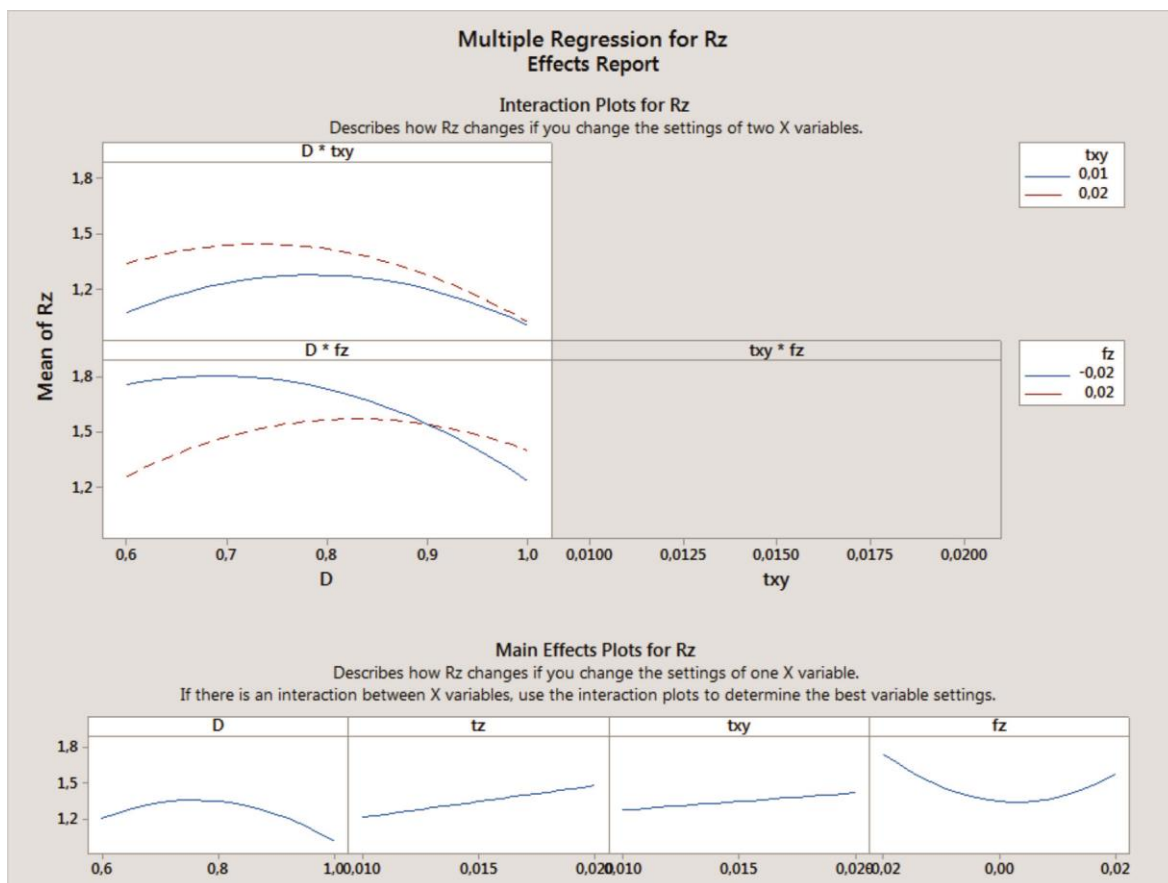
Για την πρόβλεψη της παραμέτρου τραχύτητας Rz, χρησιμοποιώντας τους τέσσερις κύριους παράγοντες, διάμετρος εργαλείου, αξονικό βάθος κοπής, ακτινικό βάθος κοπής και πρόωση ανά περιστροφή και δόντι, προέκυψε μια γραμμική σχέση μεταξύ των παραγόντων με αρκετά χαμηλό διάστημα εμπιστοσύνης (~35%). Με τις ίδιες παραμέτρους και όλα τα μεταξύ των παραμέτρων γινόμενα, χρησιμοποιώντας ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης (multiple regression), παράχθηκε μια νέα εξίσωση περισσότερων όρων που προσεγγίζει σε μεγαλύτερο βαθμό (77.66%) το εξεταζόμενο φαινόμενο της τραχύτητας όπως παρουσιάζεται και στα ακόλουθα διαγράμματα του [σχήματος 6.10](#) έως και του [σχήματος 6.13](#).



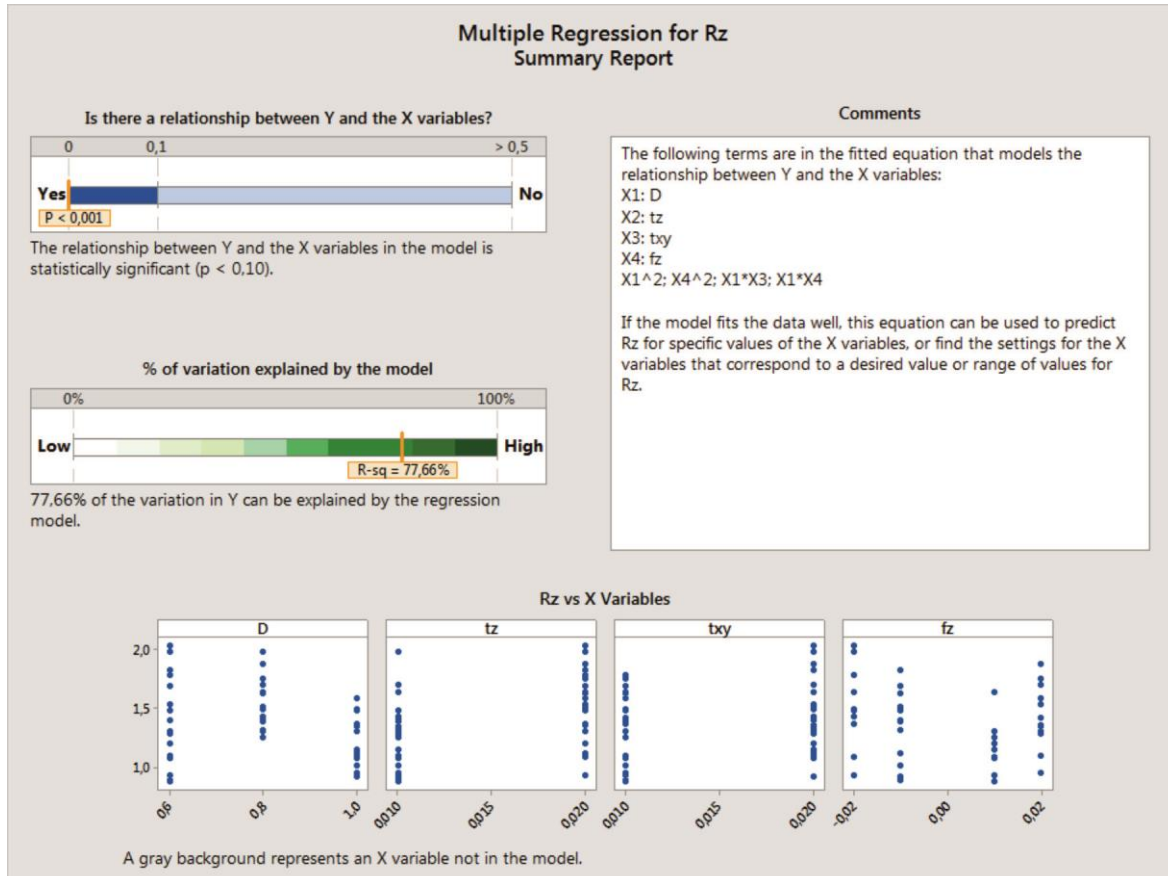
Σχήμα 6.10 Μοντέλο εξίσωσης και διαγράμματα σημαντικότητας παραγόντων



Σχήμα 6.11 Διάγραμμα διασποράς τιμών στο χώρο



Σχήμα 6.12 Διαγράμματα επίδρασης τιμών των παραγόντων



Σχήμα 6.13 Διαγράμματα ένδειξης συσχέτισης και ποσοστό ικανοποίησης δεδομένων

Στα προηγούμενα διαγράμματα παρουσιάζεται κατά σειρά η τελική εξίσωση του μοντέλου εκτίμησης της τραχύτητας  $R_z$  όπου  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  και  $X_4$  ονομάζονται οι παράμετροι  $D$ ,  $t_z$ ,  $t_{xy}$  και  $f_z$  αντίστοιχα. Στα διαγράμματα ράβδων που ακολουθούν φαίνεται η σημαντικότητα του κάθε παράγοντα καθώς και των παραγόντων γινομένου που κατασκευάζονται. Σύμφωνα με τα διαγράμματα πολύ σημαντικοί παράγοντες για την εξήγηση του φαινομένου αποτελούν η διάμετρος του εργαλείου και η πρόωση. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές προβαλλόμενες στο επίπεδο όπου είναι ορατό ότι είναι διασπαρμένες στο χώρο γενικά και ως εκ τούτου επαληθεύουν κατά μεγάλο βαθμό την τυχαιότητα της κανονικής κατανομής. Έπειτα απεικονίζονται οι συσχετίσεις των παραγόντων στο ζητούμενο αποτέλεσμα της τραχύτητας και στο τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζεται ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση των παραγόντων με το αποτέλεσμα και ότι ένα σχετικά υψηλό ποσοστό επαληθεύει την προκύπτουσα εξίσωση.

Παρ' όλα αυτά έγινε προσπάθεια αύξησης του διαστήματος εμπιστοσύνης της εξίσωσης πρόβλεψης δημιουργώντας περισσότερους παράγοντες με γινόμενα και πηλίκα. Παρατηρήθηκε ότι ο συσχετισμός των παραγόντων μπορεί να αυξήσει αρκετά το ποσοστό πρόβλεψης ενώ παράλληλα αυξάνει την πολυπλοκότητα της εξίσωσης.

Ύστερα από διαδοχικές εκτελέσεις, τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το κάθετο φραιζάρισμα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 6.14. Κριτήριο για το ποια παράμετρος είναι ουσιώδης εντός της εξίσωσης ή πρέπει να παραληφθεί δίνει το κριτήριο της P-Value. Η διαδικασία ακολουθήθηκε μέχρι όλες οι παράμετροι να έχουν τιμή μικρότερη του 0.05 όπως αναφέρεται και στη μεθοδολογία της ανάλυσης παλινδρόμησης.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-18.31	6.18	-2.96	0.007	
D	49	16	3.07	0.005	19300
$t_z$	-1914	800	-2.39	0.025	45375
$t_{xy}$	-1821	800	-2.28	0.032	45375
$f_z$	-43.8	19.8	-2.21	0.037	277.78
$D*t_z$	1243	509	2.44	0.022	16660
$D*t_{xy}$	1144	509	2.25	0.034	16660
$t_z*t_{xy}$	115287	50611	2.28	0.032	86212.5
$t_z*f_z$	15991	5227	3.06	0.005	4840.11
$t_{xy}*f_z$	2383	1252	1.9	0.069	277.78
$D*t_z*t_{xy}$	-73900	32207	-2.29	0.031	27244
$D*t_z*f_z$	-7316	3256	-2.25	0.034	1251.91
$t_z*t_{xy}*f_z$	-191556	79198	-2.42	0.024	277.78
$D^2$	-30.59	9.96	-3.07	0.005	19300
$f_z^2$	765	125	6.11	0	1
$1/f_z$	0.00857	0.00396	2.16	0.041	277.78
$t_z/D$	729	302	2.41	0.024	15945
$t_{xy}/D$	709	302	2.35	0.028	15945
$t_z/f_z$	-0.76	0.25	-3.04	0.006	277.78
$t_{xy}/f_z$	-0.68	0.272	-2.5	0.02	327.61
$D*t_{xy}/f_z$	0.3	0.133	2.26	0.033	51.91
$t_z*t_{xy}/D$	-43350	19126	-2.27	0.033	25885.5
$t_z*f_z/D$	-5228	1913	-2.73	0.012	1153.5
$t_z*t_{xy}/f_z$	38.9	15.8	2.46	0.022	277.78

Σχήμα 6.14 Πίνακας ανάλυσης παλινδρόμησης στο κάθετο φραιζάρισμα για  $R_z$

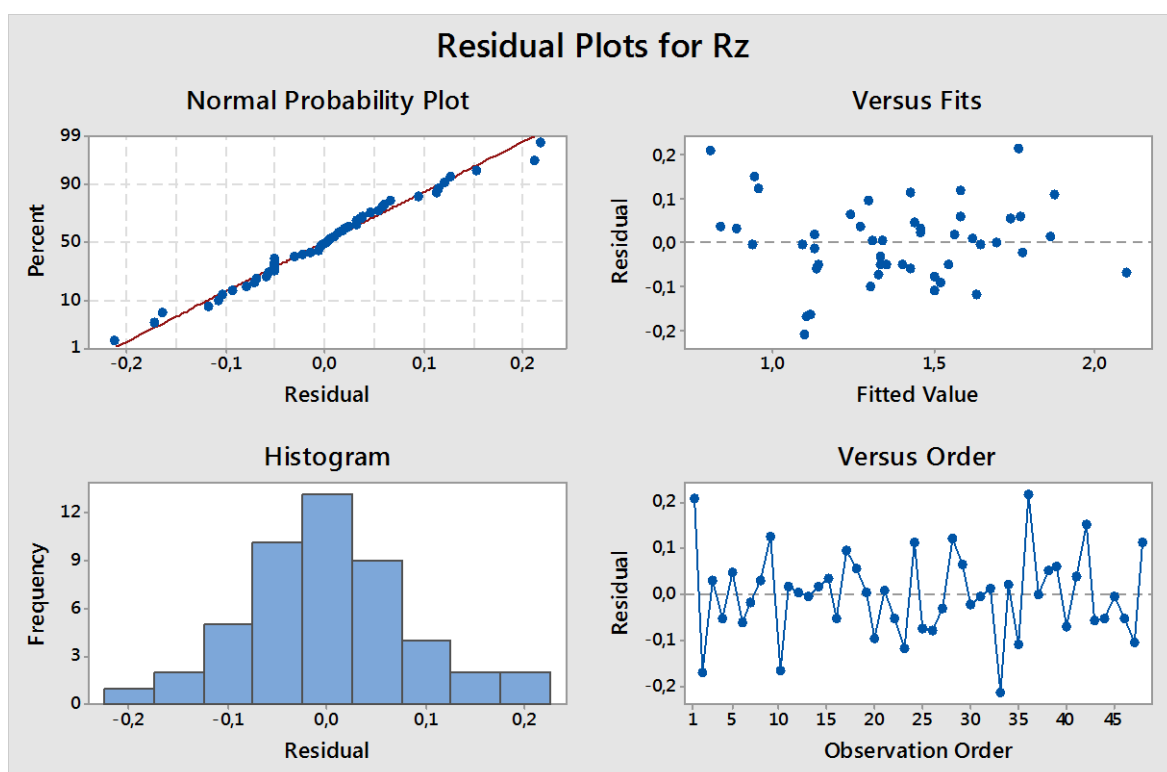


Από την ανάλυση διασποράς (σχήμα 6.15) προκύπτει ότι η ανάλυση παλινδρόμησης που έγινε για τα συγκεκριμένα δεδομένα σε μεγάλο βαθμό πετυχημένη. Το τελικό ποσοστό εκτίμησης των δεδομένων που επιτεύχθηκε είναι 90.93% με τυπική απόκλιση 0.130136.

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	23	4.077476	0.17716	10.46	0.000
Residual Error	24	0.40645	0.01694		
Total	47	4.48121			

Σχήμα 6.15 Πίνακας ανάλυσης διασποράς

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

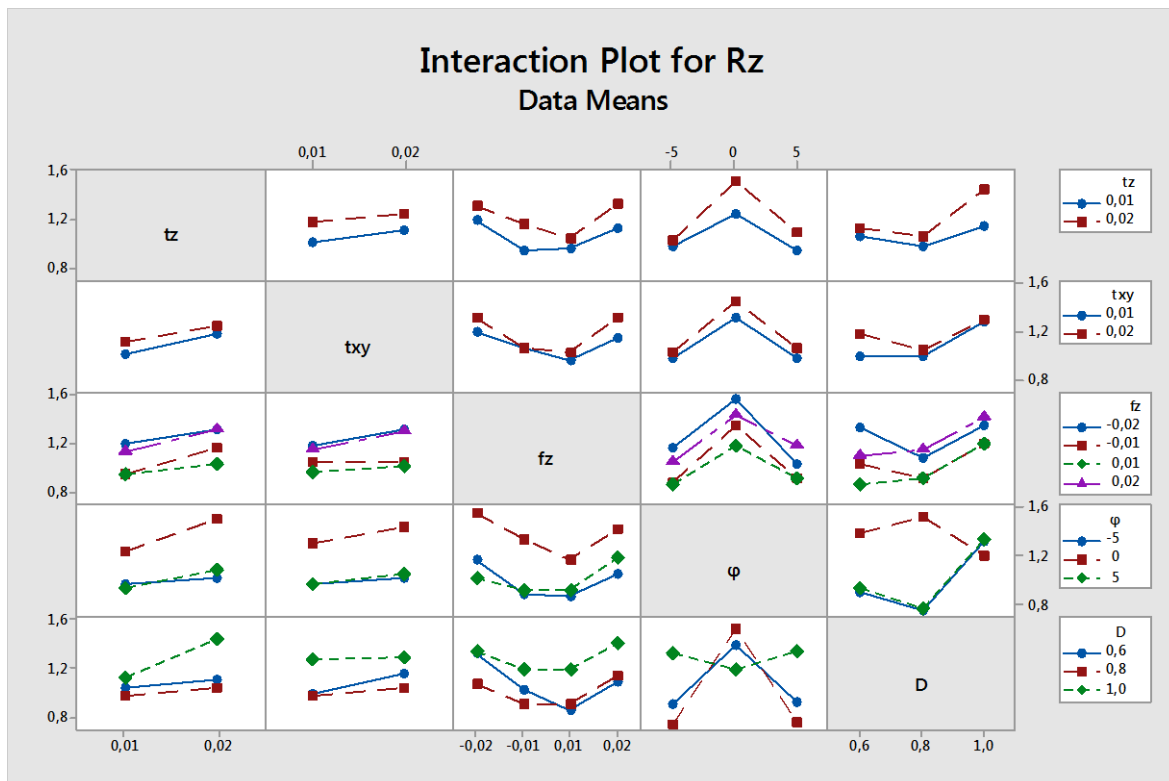


Σχήμα 6.16 Διαγράμματα κάθετου φραιζαρίσματος για την παράμετρο Rz

Από τα αποτελέσματα είναι ορατό ότι οι χαμηλές τιμές πρόωσης δίνουν επιφάνειες μικρής τραχύτητας, τόσο στο αντίρροπο, όσο και στο ομόρροπο φραιζάρισμα. Επίσης, η αύξηση των παραγόντων του αξονικού και ακτινικού βάθους κοπής έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερες τραχιές επιφάνειες.

Οι μέθοδοι αντίρροπου και ομόρροπου φραιζαρίσματος για τα συγκεκριμένα μικρά βάθη κοπής δεν εμφανίζουν μεγάλες διαφορές στην επιφανειακή τραχύτητα. Ως επί το πλείστον μικρότερης τραχύτητας επιφάνεια παράγει η κοπή με εργαλείο διαμέτρου 0,8mm και είναι εμφανής η διαφορά στο γεγονός ότι το κάθετο φραιζάρισμα υστερεί πολύ σε αποτέλεσμα από το διατηρητικό και το ελκτικό.

Τα προηγούμενα συμπεράσματα προκύπτουν από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των κυριών παραγόντων σε σχέση με την τραχύτητα όπως ακριβώς παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα 6.17 για την παράμετρο επιφανειακής τραχύτητας Rz.



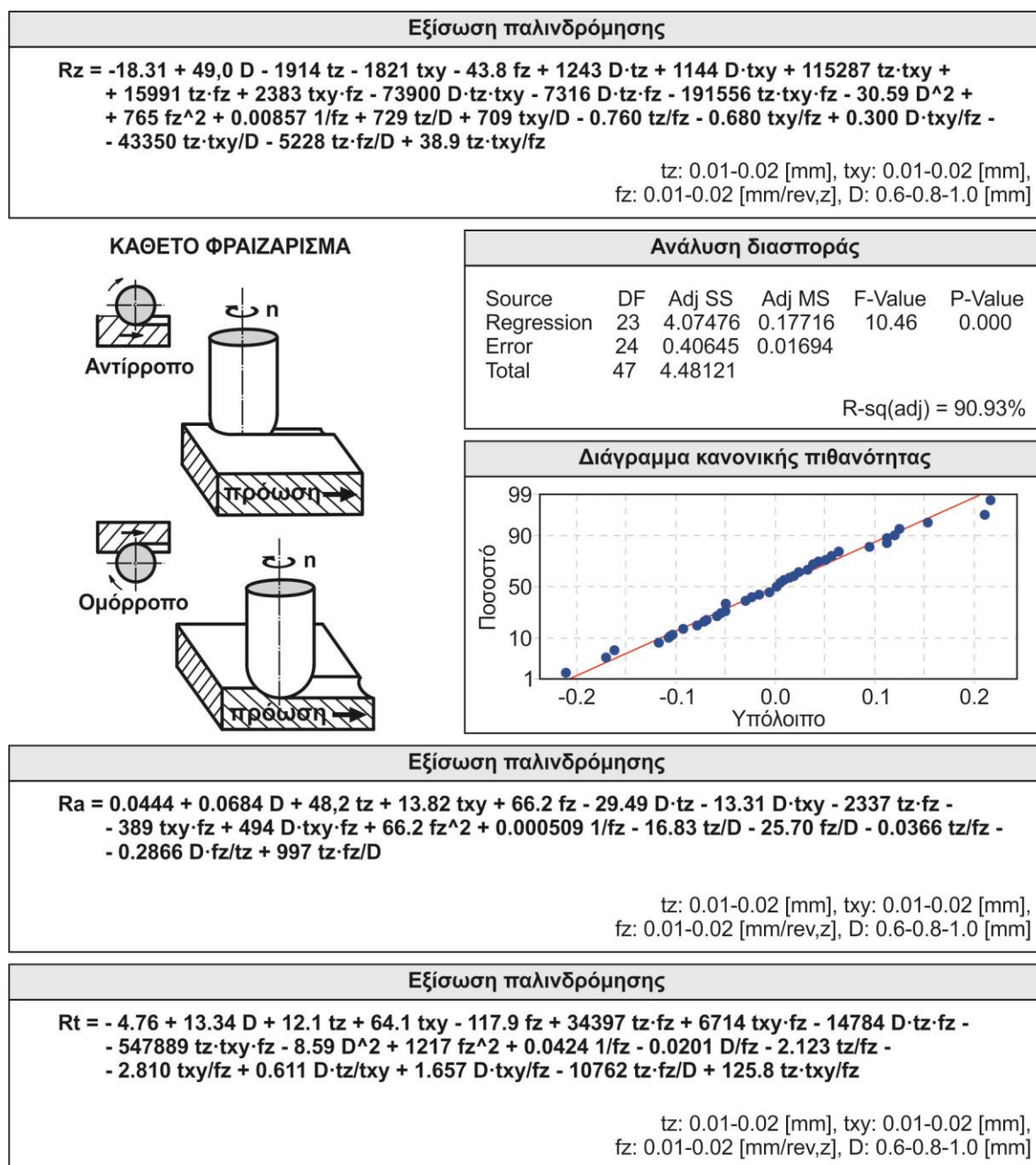
Σχήμα 6.17 Αλληλεπιδράσεις κυρίων παραγόντων με την τραχύτητα της επιφάνειας Rz

Από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης παρατηρήθηκε επίσης ότι οι αλλαγές των τιμών τραχύτητας συμβαδίζουν σε όλους τις παραμέτρους τραχύτητας, δηλαδή αντίστοιχη αλλαγή των συνθηκών κατεργασίας επηρεάζει προς αύξηση ή μείωση και τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους σε διαφορετική όμως κλίμακα.

Αντίστοιχα με την προσέγγιση της παραμέτρου Rz, αναπτύχθηκαν εξισώσεις εκτίμησης και διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τις άλλες παραμέτρους τραχύτητας, τόσο στο κάθετο, όσο και στο διατρητικό και ελκτικό φραιζάρισμα. Ορισμένα από τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στο ακόλουθο [σχήμα 6.18](#) για το υπό κλίση φραιζάρισμα και στο [σχήμα 6.19](#) όπου αναγράφονται οι εξισώσεις εκτίμησης των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας στο κάθετο φραιζάρισμα.

Εξίσωση παλινδρόμησης στο διατρητικό φραιζάρισμα με $\varphi = 5^\circ$	
$R_z = 0.828 - 0.359 D - 837.9 t_z + 7.31 t_{xy} - 19.0 f_z + 583.4 D \cdot t_z + 18456 t_z \cdot f_z - 11437 D \cdot t_z \cdot f_z + 1874 D \cdot t_{xy} \cdot f_z - 78946 t_z \cdot t_{xy} \cdot f_z + 621 f_z^2 + 0.00635 1/f_z + 295.0 t_z/D - 0.318 t_{xy}/f_z - 0.578 D \cdot t_z/f_z - 6131 t_z \cdot f_z/D + 21.52 t_z \cdot t_{xy}/f_z$	
$t_z: 0.01-0.02 \text{ [mm]}, t_{xy}: 0.01-0.02 \text{ [mm]}, f_z: 0.01-0.02 \text{ [mm/rev,z]}, D: 0.6-0.8-1.0 \text{ [mm]}$	
Εξίσωση παλινδρόμησης στο ελκτικό φραιζάρισμα με $\varphi = -5^\circ$	
$R_z = -2.053 + 3.23 D - 609 t_z - 170.9 t_{xy} + 740 f_z + 334.9 D \cdot t_z - 532 D \cdot f_z + 10229 t_z \cdot t_{xy} - 53612 t_z \cdot f_z + 38628 D \cdot t_z \cdot f_z + 779 f_z^2 + 271.7 t_z/D + 140.2 t_{xy}/D - 251 f_z/D - 0.262 t_z/f_z + 0.343 D \cdot t_z/f_z - 8229 t_z \cdot t_{xy}/D + 17925 t_z \cdot f_z/D$	
$t_z: 0.01-0.02 \text{ [mm]}, t_{xy}: 0.01-0.02 \text{ [mm]}, f_z: 0.01-0.02 \text{ [mm/rev,z]}, D: 0.6-0.8-1.0 \text{ [mm]}$	

Σχήμα 6.18 Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης στο υπό κλίση φραιζάρισμα

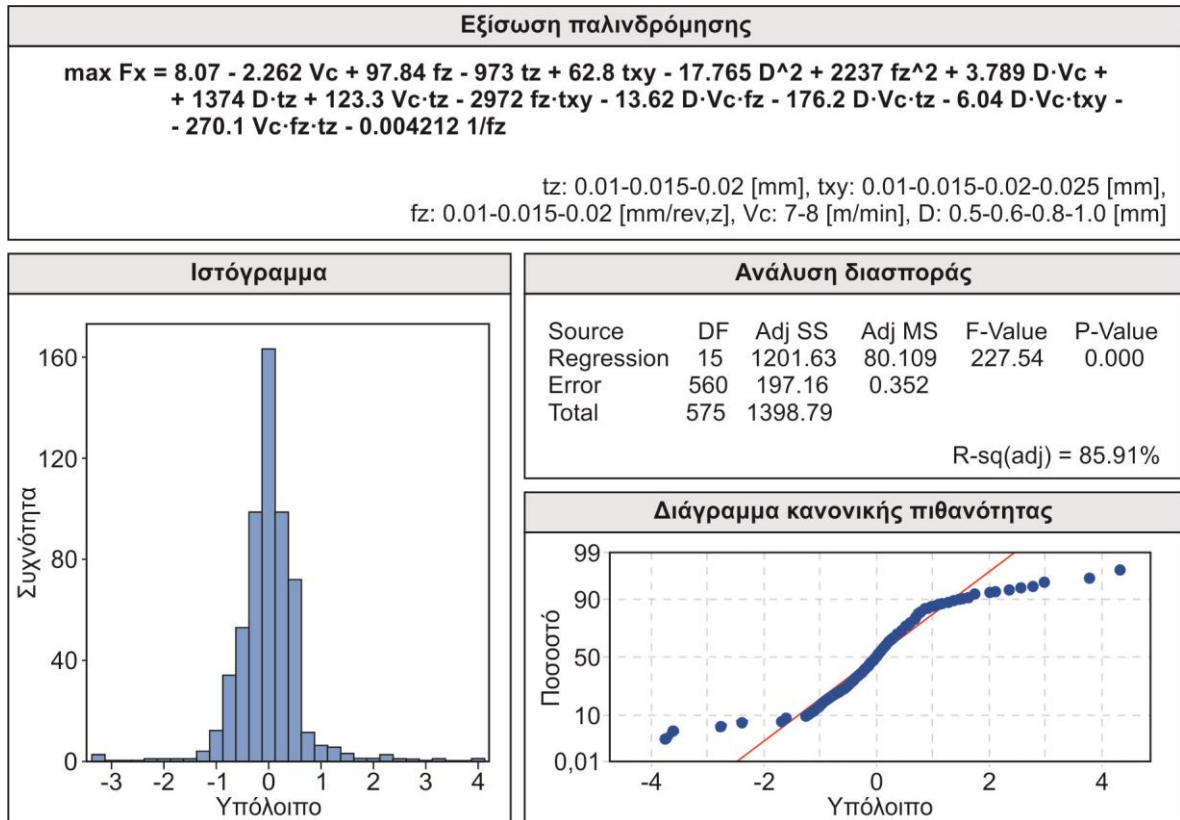


Σχήμα 6.19 Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης στο κάθετο φραιζάρισμα

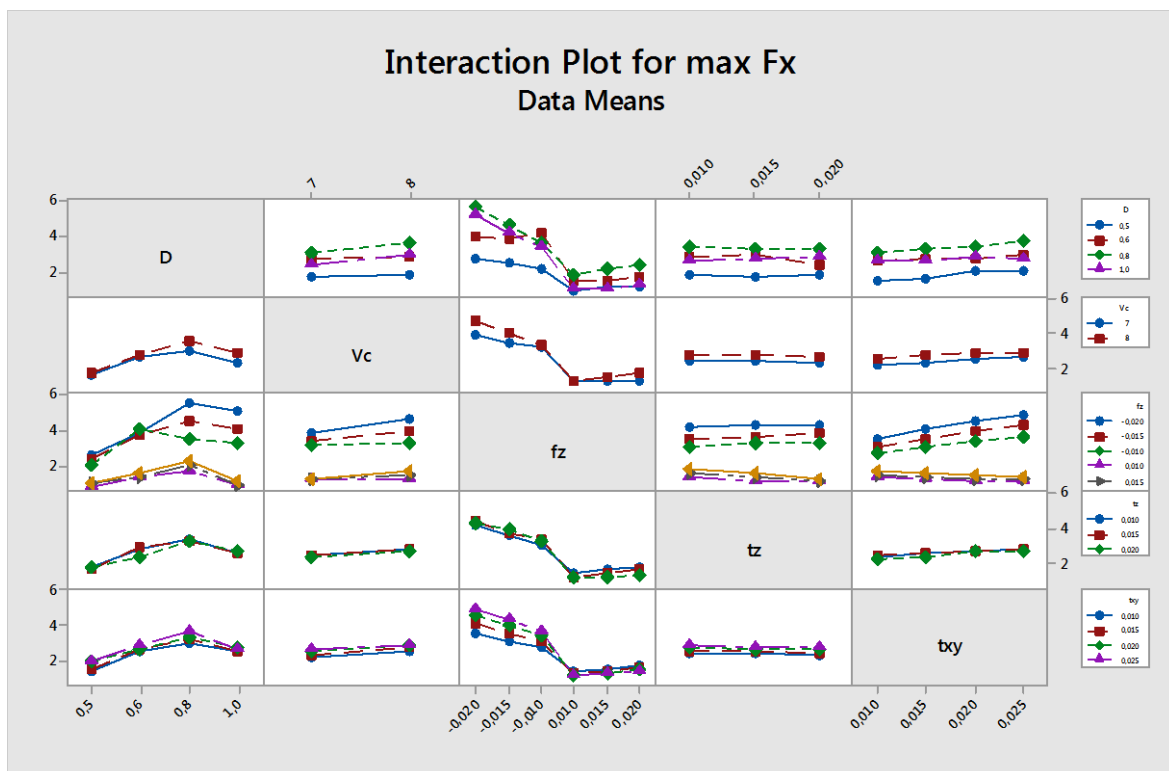
#### 6.4.5 Πρόβλεψη δυνάμεων κοπής

Όμοια με την τραχύτητα έγινε εκτίμηση των τριών συνιστωσών των δυνάμεων κοπής με τη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που προαναφέρθηκε με διαφορετικούς παράγοντες προέκυψαν οι εξισώσεις για τις δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$  του κάθετου μικροφραιζαρίσματος. Στους παράγοντες πρόβλεψης των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής συμπεριλήφθη και η ταχύτητα κοπής  $v_c$ .

Μετά από αντίστοιχες ενέργειες κατασκευής, προσθήκης και αφαίρεσης παραγόντων, προέκυψαν τα αποτελέσματα που προβάλλονται στο σχήμα 6.20 που ακολουθεί. Καθ' ότι προστέθηκε άλλος ένας κύριος παράγοντας, η πολυπλοκότητα εύρεσης περιγραφής του φαινομένου αυξήθηκε και οι δυνάμεις εκτιμήθηκαν σε αρκετά μεγάλο βαθμό, σε ποσοστό άνω του 85%.


 Σχήμα 6.20 Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης για τη δύναμη  $F_x$ 

Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με την κατασκευή των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης των συνθηκών στις μέγιστες τιμές τραχύτητας όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.21 για τη συνιστώσα  $F_x$ .


 Σχήμα 6.21 Αλληλεπιδράσεις συνθηκών κοπής με τη μέγιστη δύναμη  $F_x$







## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

### 7.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η κατεργασία μικροφραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Η μελέτη αυτή έγινε σε δύο στάδια: Στο πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας βασισμένο πάνω σε ένα εμπορικό πρόγραμμα CAD και στο δεύτερο στάδιο διεξήχθησαν πειράματα επαλήθευσης και αξιολόγησης πάνω σε AI7075-T651. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης είναι δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που αναφέρονται στην αξιοπιστία του μοντέλου αλλά και στην πραγματοποίηση της κατεργασίας μικροφραιζαρίσματος.

### 7.2 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν περιλαμβάνουν:

1. Την ανάπτυξη της εφαρμογής Ball 3D για την προσομοίωση του φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης. Η εφαρμογή χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του Autodesk Inventor, συνδύασε με ολοκληρωμένο τρόπο όλες τις απαραίτητες ενέργειες για την εκτέλεση των προσομοιώσεων του σφαιρικής απόληξης μικροφραιζαρίσματος οι οποίες είναι οι εξής:
  - Η δημιουργία ενός κώδικα υπολογισμού των περασμάτων και της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου στον όγκο του προς κατεργασία τεμαχίου. Η προκύπτουσα επιφάνεια παράγεται μέσα στο περιβάλλον του προγράμματος CAD με αυτόματο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού, του τεμαχίου καθώς και τις συνθήκες κατεργασίας. Η ακρίβεια της διαδικασίας βασίστηκε στην αναλυτική κινηματική της κατεργασίας και εξαρτάται από την επιθυμητή κάθε φορά διακριτοποίηση.
  - Η προσομοίωση της κατεργασίας έδειξε ότι μπορεί να προσεγγίσει σε μεγάλο βαθμό με ακρίβεια το φαινόμενο της κατεργασίας φραιζαρίσματος με εργαλείο σφαιρικής απόληξης στη διάσταση της μικρο-κλίμακας. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι παρά το μικρό μέγεθος η τοπομορφία της κατεργαζόμενης επιφάνειας προσεγγίζεται σε μεγάλο βαθμό εφαρμόζοντας σωστή κινηματική εντός ενός συστήματος τρισδιάστατης σχεδίασης.
  - Με την ανάπτυξη κώδικα έγινε εφικτή ανάλυση της προκύπτουσας 3D επιφάνειας από την οποία προέκυψαν ύστερα από διαδοχικές ενέργειες οι τρεις κύριες παράμετροι της επιφανειακής τραχύτητας. Καθ' ότι το μοντέλο είναι γεωμετρικό δε συμπεριλαμβάνει τις ιδιότητες του υλικού ή εξωγενείς παράγοντες όπως είναι οι ταλαντώσεις του συστήματος.
  - Παράλληλα αναπτύχθηκε εφαρμογή η οποία μέσα από την ανάλυση των απαραίτερων αποβλίπτων υπολογίζει τις δυνάμεις κοπής που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία του τεμαχίου. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων Kienzle-Victor, με βάση τις οποίες η δύναμη κοπής σε μια τομή του αποβλίπτου στην επιφάνεια αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου προκύπτει ως συνάρτηση του πάχους και του πλάτους του αποβλίπτου, σταθμισμένα με τη χρήση δύο παραμέτρων του κατεργαζόμενου υλικού.

2. Με πειραματική μελέτη πάνω στο κράμα Al7075-T651 εφαρμόστηκε κοπή με περιστροφικό υψηλόστροφο τσοκ. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και η μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων προσέφερε χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση των συνθηκών πάνω στην προκύπτουσα τοπομορφία, τραχύτητα επιφάνειας και δυνάμεις κοπής. Μέσα από τα πειράματα προέκυψαν τα ακόλουθα:
  - Παρατηρήθηκε μεγάλη ομοιότητα της τοπομορφίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας σε σχέση με την προκύπτουσα τοπομορφία του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Καθ' ότι η τοπομορφία αποτελεί ένα οπτικό χαρακτηριστικό της επιφάνειας ήταν απαραίτητη η πορεία προς ποσοτικές μεθόδους εκτίμησης της ποιότητας της επιφάνειας όπως είναι η επιφανειακή τραχύτητα.
  - Γραφικές απεικονίσεις συσχετίσεων των παραγόντων με την προκύπτουσα τραχύτητα και τις δυνάμεις κοπής έδωσαν μια πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς των συνθηκών κοπής κατά το μικροφραιζάρισμα με εργαλείο σφαιρικής απόληξης, τόσο στο κάθετο, όσο και στο διατρητικό και ελκτικό φραιζάρισμα. Η ανάλυση αυτή οδήγησε σε συμπεράσματα που δείχνουν το κατά πόσο επηρεάζει η μεταβολή ενός παράγοντα τα αποτελέσματα της τραχύτητας και της δύναμης κοπής.
  - Η μέθοδος της ανάλυσης παλινδρόμησης και της ανάλυσης διασποράς που χρησιμοποιήθηκε ώστε να κατασκευαστούν εξισώσεις εκτίμησης των παραμέτρων της τραχύτητας και των δυνάμεων κοπής μέσα από μαθηματική ανάλυση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων, έδωσε την δυνατότητα πρόβλεψης των τιμών τραχύτητας και δυνάμεων κατά το μικροφραιζάρισμα. Το αποτέλεσμα αυτό παρέχει τη δυνατότητα της εκ των προτέρων γνώσης των τιμών τραχύτητας και δύναμης χωρίς να διεξαχθεί η κατεργασία, για τις επιθυμητές από τον χρήστη τιμές.
3. Στην τελευταία φάση της διατριβής έγινε εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης Ball 3D για τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατεργασία τόσο, στο επίπεδο της επιφανειακής τραχύτητας, όσο και στο επίπεδο των δυνάμεων κοπής.

### 7.3 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Όσον αφορά τις μελλοντικές κατευθύνσεις, μετά την απόδειξη της αξιοπιστίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας, μια σειρά από περεταίρω ερευνητικές προτάσεις θα μπορούσαν να εκτελεστούν, όπως π.χ. να:

- ενσωματωθούν παράμετροι του υλικού στο τρισδιάστατο μοντέλο καθώς και εξωγενών παραγόντων όπως ταλαντώσεων,
- εκτελεστεί μεγαλύτερος αριθμός προσομοιώσεων για περισσότερες συνθήκες κοπής οδηγώντας στη δημιουργία μιας τεχνικής βάσεως δεδομένων,
- συνδυαστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία και με άλλες τεχνικές στατιστικής ή τεχνητής νοημοσύνης,
- γίνει βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής με χρήση γενετικών αλγορίθμων,
- γίνει επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας προσομοίωσης και σε άλλες κατεργασίες με σκοπό τη δημιουργία μιας ενιαίας πλατφόρμας προσομοίωσης μηχανουργικών κατεργασιών.



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Groover, M.P., 2004, "Fundamentals of modern manufacturing: materials processes and systems," New York, Society of Manufacturing Engineers (2nd edition), Wiley.
- [2] Sandvik Coromant, 1996, "Modern Metal Cutting – a practical handbook," Fair Lawn NJ, Sandvik Coromant.
- [3] Kiliçkap, E., Çakir, Q., Aksoy, M., and İnan, A., 2005, "Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenized SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite," *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, pp. 862-867.
- [4] Grzesik, W., 2007, "Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools," *Wear*, 265, pp. 327-335.
- [5] Chen, J.S.B., Huang, Y.K., and Chen M.S., 2005, "Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, pp. 1070-1076.
- [6] Kang, M.C., Kim, K.K., Lee, D.W., Kim, J.S., and Kim, N.K., 2001, "Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high-speed ball-end milling," *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(5), pp. 323-329.
- [7] Antoniadis, A., Savakis, C., Bilalis, N., and Balouktsis, A., 2003, "Prediction of surface topomorphy and roughness in ball-end milling," *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(12), pp. 965-971.
- [8] Ko, T.J., Kim, H.S. and Lee, S.S., 2001, "Selection of the machining inclination angle in high speed ball end milling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(3), pp. 163-170.
- [9] Quintana, G., De Ciurana, J., and Ribatallada, J., 2010, "Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations," *Materials and Manufacturing Processes*, 25(6), pp. 386-398.
- [10] Quintana, G., Garcia-Romeu, M.L., and Ciurana, J., 2011, "Surface roughness monitoring application based on artificial neural network for ball end milling operations," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(4), pp. 607-617.
- [11] Mizugaki, Y., Hao, M., and Kikkawa, K., 2001, "Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50(1), pp. 69-72.
- [12] Saito, A., Zhao, X., and Tsutsumi, M., 2001, "Control of surface pattern of mold generated by ball-end milling," *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, 10th International Conference on Precision Engineering (ICPE)*, pp. 92-96.
- [13] Mizugaki, Y., Kikkawa, K., Terai, H., and Hao, M., 2003, "Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1), pp. 49-52.
- [14] Jung, T.-S., Yang, M.-Y., and Lee, K.-J., 2005, "A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part I: Formulation of characteristic lines of cut remainder," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10), pp. 833-840.
- [15] Jung, T.-S., Yang, M.-Y., and Lee, K.-J., 2005, "A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling, part II: Roughness prediction and experimental verification," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10), pp. 841-849.
- [16] Zhang, W.-H., Tan, G., Wan, M., Gao, T., and Bassir, D.H., 2008, "A new algorithm

- for the numerical simulation of machined surface topography in multiaxis ball-end milling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 130(1), pp. 0110031-01100311.
- [17] Arizmendi, M., Fernández, J., Lacalle, L.N.L.d., Lamikiz, A., Gil, A., Sánchez, J.A., Campa, F.J., and Veiga, F., 2008, "Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), pp. 101-104.
  - [18] Quinsat, Y., Sabourin, L., and Lartigue, C., 2008, "Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter," *Journal of Material Processing Technology*, 95, pp. 135-143.
  - [19] Zhang, S., and Guo, Y.B., 2009, "Taguchi method based process space for optimal surface topography by finish hard milling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 131(5), pp. 0510031-0510039.
  - [20] Lazoglu, I., Boz, Y., and Erdim, H., 2011, "Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), pp. 117-120.
  - [21] Boujelbene, M., Moisan, A., Bouzid, W., and Torbaty, S., 2007, "Variation cutting speed on the five axis milling," *J Achiev Mater Manuf Eng*, 21(2), pp. 7-14.
  - [22] Arizmendi, M., Campa, F.J., Fernández, J., López de Lacalle, L.N., Gil, A., Bilbao, E., Veiga, F., and Lamikiz, A., 2009, "Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), pp. 93-96.
  - [23] Biermann, D., Kersting, P., and Surmann, T., 2010, "A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), pp. 125-128.
  - [24] Lee, P., and Altıntaş, Y., 1996, "Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(9), pp. 1059-1072.
  - [25] Altıntaş, Y., and Lee, P., 1996, "A general mechanics and dynamics model for helical end mills," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45(1), pp. 59-64.
  - [26] Lamikiz, A., De Lacalle, L.N.L., Sánchez, J.A., and Salgado, M.A., 2004, "Cutting force estimation in sculptured surface milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), pp. 1511-1526.
  - [27] Fan, X., and Loftus, M., 2007, "The influence of cutting force on surface machining quality," *International Journal of Production Research*, 45(4), pp. 899-911.
  - [28] Naserian, R.S., Sadeghi, M.H., and Haghighat, H., 2007, "Static rigid force model for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5 SPEC. ISS.), pp. 785-792.
  - [29] Karpuschewski, B., Binh, N.T., and Beo, J., 2007, "An empirical cutting-force model in high-speed-milling process with spherical cutter," *Vrobné Inzinierstvo Technical University of Kosice*, 3(6), pp. 5-8.
  - [30] Tsai, C.-L., and Liao, Y.-S., 2008, "Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), pp. 24-33.
  - [31] Ben Said, M., Saï, K., and Bouzid Saï, W., 2009, "An investigation of cutting forces in machining with worn ball-end mill," *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), pp. 3198-3217.
  - [32] Rivière-Lorphèvre, E., and Filippi, E., 2009, "Mechanistic cutting force model parameters evaluation in milling taking cutter radial runout into account," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(1-2), pp. 8-15.
  - [33] Tsai, C.-L., and Liao, Y.-S., 2010, "Cutting force prediction in ball-end milling with inclined feed by means of geometrical analysis," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5-8), pp. 529-541.
  - [34] Tukora, B., and Szalay, T., 2011, "Real-time determination of cutting force coefficients without cutting geometry restriction," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(12), pp. 871-879.



- [35] Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K., and Sudhakaran, R., 2013, "Optimization of cutting parameters for cutting force in shoulder milling of Al7075-T6 using response surface methodology and genetic algorithm," *Procedia Engineering*, 64, pp. 690-700.
- [36] Bolsunovsky, S., Vermel, V., and Gubanov, G., 2013, "Cutting forces calculation and experimental measurement for 5-axis ball end milling," *Procedia CIRP*, 8, pp. 235-239.
- [37] Liu, X., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., and Ehmann, K.F., 2004, "The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(4), pp. 666-678.
- [38] Dornfeld, D., Min, S., and Takeuchi, Y., 2006, "Recent advances in mechanical micromachining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55 (2), pp. 745-768.
- [39] Lucca, D.A., Rhorer, R.L., and Komanduri, R., 1991, "Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), pp. 69-72.
- [40] Lucca, D.A., Seo, Y.W., and Komanduri, R., 1993, "Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(1), pp. 83-86.
- [41] Lucca, D.A., Seo, Y.W., and Rhorer, R.L., 1994, "Energy dissipation and tool-workpiece contact in ultra-precision machining," *S T L E Tribology Transactions*, 37(3), pp. 651-655.
- [42] Taminiau, D.A., and Dautzenberg, J.H., 1991, "Bluntness of the Tool and Process Forces in High-Precision Cutting," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), pp. 65-68.
- [43] Bao, W.Y., and Tansel, I.N., 2000, "Modeling micro-end-milling operations. Part I: Analytical cutting force model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(15), pp. 2155-2173.
- [44] Vogler, M.P., Kapoor, S.G., and DeVor, R.E., 2004, "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part II: Cutting force prediction," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(4), pp. 695-705.
- [45] Zaman, M.T., Kumar, A.S., Rahman, M., and Sreeram, S., 2006, "A three-dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), pp. 353-366.
- [46] Li, C., Lai, X., Li, H., and Ni, J., 2007, "Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(4), art. no. 001, pp. 671-678.
- [47] Newby, G., Venkatachalam, S., and Liang, S.Y., 2007, "Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations" *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, pp. 41-47.
- [48] Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., and Seo, Y.W., 2007, "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process," *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, pp. 250-255.
- [49] Bissacco, G., Hansen, H.N., and Slunsky, J., 2008, "Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), pp. 113-116.
- [50] Park, S.S., and Malekian, M., 2009, "Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), pp. 49-52.
- [51] Malekian, M., Park, S.S., and Jun, M.B.G., 2009, "Modeling of dynamic micro-milling cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7-8), pp. 586-598.
- [52] Ikawa, N., Shimada, Sh., Tanaka, H., and Ohmori, G., 1991, "An Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), pp. 551-554.



- [53] Ikawa, N., Donaldson, R.R., Komanduri, R., König, W., Aachen, T.H., McKeown, P.A., Moriwaki, T., and Stowers, I.F., 1991, "Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(2), pp. 587-594.
- [54] Weule, H., Hüntrup, V., and Tritschle, H., 2001, "Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50(1), pp. 61-64.
- [55] Kim, C.-J., Bono, M., and Ni, J., 2002, "Experimental analysis of chip formation in micro-milling," *Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers*. MR, (MR02-159), pp. 1-8.
- [56] Vogler, M.P., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G., 2001, "Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials," *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*, 12, pp. 3-10.
- [57] Vogler, M.P., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G., 2004, "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part i: Surface generation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(4), pp. 685-694.
- [58] Damazo, B.N., Davies, M.A., Dutterer, B.S., and Kennedy, M.D., 1999, "A summary of micro-milling studies," *Proceeding of 1st International Conference and General Meeting of EUSPEN*, pp. 322-324.
- [59] Lee, K., and Dornfeld, D.A., 2002, "An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper," *Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers*. MR, (MR02-202), pp. 1-8.
- [60] Wang, W., Kweon, S.H., and Yang, S.H., 2005, "A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool," *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, pp. 702-708.
- [61] Wang, J.S., Gong, Y.D., Abba, G., Chen, K., Shi, J.S., and Cai, G.Q., 2008, "Surface generation analysis in micro end-milling considering the influences of grain," *Microsystem Technologies*, 14(7), pp. 937-942.
- [62] Liu, X., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G., 2007, "Model-based analysis of the surface generation in microendmilling - Part I: Model development," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 129(3), pp. 453-460.
- [63] Liu, X., Devor, R.E., and Kapoor, S.G., 2007, "Model-based analysis of the surface generation in microendmilling - Part II: Experimental validation and analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 129(3), pp. 461-469.
- [64] Iwata, K., Moriwaki, T., and Okuda, K., 1987, "A study on cutting temperature in ultra-high precision diamond cutting of copper (OFHC)," *Proc. 15th North American Manufacturing Research Conf, Bethlehem, USA*, pp. 510-515.
- [65] Moriwaki, T., Horiuchi, A., and Okuda, K., 1993, "Effect of cutting heat on machining accuracy in ultra-precision diamond turning," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42, pp. 75-78.
- [66] Tansel, I.N., Arkan, T.T., Bao, W.Y., Mahendrakar, N., and Shisler, B., 2000, "Tool wear estimation in micro-machining. Part I: Tool usage-cutting force relationship," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, pp. 313-332.
- [67] Tansel, I., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E., and Li, W., 1998, "Micro-end-milling - I. Wear and breakage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(12), pp. 1419-1436.
- [68] Lucca, D.A., Seo, Y.W., Rhorer, R.L., and Donaldson, R.R., 1994, "Aspects of Surface Generation in Orthogonal Ultraprecision Machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43 (1), pp. 43-46.
- [69] Blake, Peter N., and Scattergood, R. O., 1990, "Ductile-regime machining of germanium and silicon," *Journal of the American Ceramic Society*, 73(4), pp. 949-957.
- [70] Li, D., Dong, S., Zhao, Y., and Zhou, M., 1999, "The influence of rake of diamond

- tool on the machined surface of brittle materials with finite element analysis,” Proc. of 1st International Conference and General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, pp. 338-341.
- [71] Ichida, Y., 1999, “Ductile mode machining of single crystal silicon using a single point diamond tool,” Proc. of 1st International Conference and General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, pp. 330-333.
  - [72] Kaji, S., Goto, T., Sumomogi, T., and Nakamura, M., 1999, “The study of ductile-brittle transition on microcutting of single crystal silicon,” Proc ASPE Annu Meet, 20, pp. 107-110.
  - [73] Arefin, S., Liu, K., Li, X.P., and Rahman, M., 2004, “Cutting conditions and tool edge radius for nanoscale ductile cutting of silicon wafer,” Proc. of 2004 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, pp. 19-21.
  - [74] Albrecht, P., 1960, “New developments in the theory of metal cutting process: Part I - The ploughing process in metal cutting,” ASME J. Eng. Ind., 82, pp. 348-358.
  - [75] Manjunathaiah, J., and Endres, J., 2000, “A New Model and Analysis of Orthogonal Machining with an Edge-radius Tool,” Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, pp. 1563-1568.
  - [76] Waldorf, D.J., Devor, R.E., and Kapoor, S.G., 1998, “A slip-line field for ploughing during orthogonal cutting,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 120(4), pp. 693-699.
  - [77] Zhang, H.T., Liu, P.D., and Hu, R.S., 1991, “A three-zone model and solution of shear angle in orthogonal machining,” Wear, 143(1), pp. 29-43.
  - [78] Waldorf, D.J., DeVor, R.E., and Kapoor, S.G., 1999, “An evaluation of ploughing models for orthogonal machining,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 121(4), pp. 550-558.
  - [79] Kountanya, R.K., and Endres, W.J., 2001, “A high-magnification experimental study of orthogonal cutting with edge-honed tools,” American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED, 12, pp. 157-164.
  - [80] Jardret, V., Zahouani, H., Loubet, J.L., and Mathia, T.G., 1998, “Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test,” Wear, 218(1), pp. 8-14.
  - [81] Taniyama, H., Eda, H., Zhou, L., Shimizu, J., and Sato, J., 2003, “Experimental investigation of micro scratching on the two-phase steel: Plastic flow mechanisms of the ferrite and cementite phases,” Key Engineering Materials, 238-239, pp. 15-18.
  - [82] Moriwaki, T., Sugimura, N., Manabe, K., and Iwata, K., 1991, “A Study on Orthogonal Micromachining of Single Crystal Copper,” Transaction of the NAMRI/SME, 19, pp. 177-183.
  - [83] Ueda, K., and Iwata, K., 1980, “Chip Formation Mechanism in Single Crystal Cutting of Beta-Brass,” CIRP Ann., 29, pp. 65-68.
  - [84] To, S., Lee, W. B., and Chan, C. Y., 1997, “Ultraprecision Diamond Turning of Aluminum Single Crystals,” Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), pp. 157-162.
  - [85] Lee, W. B., To, S., and Cheung, C. F., 2000, “Effect of Crystallographic Orientation in Diamond Turning of Copper Single Crystals,” Scripta Materialia, 42(10), pp. 937-945.
  - [86] Patten, J., Mundy, P., Fang, N., and Domblesky, J., 2004, “Advanced Machining of Alternative Materials—Part A: Cutting Mechanics,” Proc. of 1st Annual Manufacturing Technology Summit Conference, pp. 1-11.
  - [87] Belak, J. and Stowers, I. F., 1990, “A Molecular Dynamics Model of the Orthogonal Cutting Process,” Proc. of ASPE Annual Conference, Oct. 13-18, 1991, pp. 100-104.
  - [88] Belak, J., Lucca, D. A., Komanduri, R., Rhoerer, R. L., Moriwaki, K., Okuda, S., Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Dow, T. A., Drescher, J. D., and Stowers, I. F., 1991, “Molecular Dynamics Simulation of the Chip Formation Process in Single

- Crystal Copper and Comparison With Experimental Data,” Proc. ASPE Annual Conference, Oct. 13–18, pp. 100–109.
- [89] Ikawa, N., Shimada, S., and Tanaka, H., 1992, “Minimum Thickness of Cut in Micromachining,” *Nanotechnology*, 3, pp. 6–9.
- [90] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmori, G., Uchikoshi, J., and Yoshinaga, H., 1993, “Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(1), pp. 91–94.
- [91] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., and Raff, L. M., 1998, “Effect of Tool Geometry in Nanometric Cutting: A Molecular Dynamics Simulation Approach,” *Wear*, 219(1), pp. 84–97.
- [92] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., and Raff, L. M., 1999, “Orientation Effects in Nanometric Cutting of Single Crystal Materials: An MD Simulation Approach,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(1), pp. 67–72.
- [93] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., and Raff, L. M., 2000, “M.D. Simulation of Nanometric Cutting of Single Crystal Aluminum-Effect of Crystal Orientation and Direction of Cutting,” *Wear*, 242(1-2), pp. 60–88.
- [94] Liu, X., Vogler, M. P., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., Ehmann, K. F., Mayor, R., Kim Changju, and Ni, J., 2004, “Micro-Endmilling With Meso-Machine-Tool System,” NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference Proc., pp. 1-9.
- [95] Moriwaki, T., Sugimura, N., and Luan, S., 1993, “Combined Stress, Material Flow and Heat Analysis of Orthogonal Micromachining of Copper,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42 (1), pp. 75–78.
- [96] Dinesh, D., Swaminathan, S., Chandrasekar, S., and Farris, T. N., 2001, “An Intrinsic Size-Effect in Machining Due to the Strain Gradient,” *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*, 12, pp. 197-204.
- [97] Liu, K., and Melkote, S. N., 2004, “A Strain Gradient Based Finite Element Model for Micro/Meso-Scale Orthogonal Cutting Process,” *Proceedings of 2004 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*.
- [98] Kopalinsky, E. M., and Oxley, P. L. B., 1984, “Size Effect in Metal Removal Processes,” *Mechanical Properties at High Rates of Strain Oxford*, pp. 389-396.
- [99] Chuzhoy, L., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., and Bammann, D. J., 2001, “Microstructure-Level Modeling of Ductile Iron Machining,” *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*, 12, pp. 125-134.
- [100] Inamura, T., Takezawa, N., Kumai, Y., and Sata, T., 1994, “On a Possible Mechanism of Shear Deformation in Nanoscale Cutting,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43(1), pp. 47-50.
- [101] Abraham, F. F., Broughton, J. Q., Bernstein, N., and Kaxiras, E., 1998, “Spanning the Length Scales in Dynamic Simulation,” *Comput. Phys.*, 12(6), pp. 538–546.
- [102] Broughton, J. Q., Abraham, F. F., Bernstein, N., and Kaxiras, E., 1999, “Concurrent Coupling of Length Scales: Methodology and Application,” *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 60(4), pp. 2391-2403.
- [103] Lidorikis, E., Bachlechner, M. E., Kalia, R. K., Voyiadjis, G. Z., Nakano, A., and Vashishta, P., 2001, “Coupling of Length Scales: Hybrid Molecular Dynamics and Finite Element Approach for Multiscale Nanodevice Simulations,” *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 653, pp. Z9.3.1-Z9.3.6.
- [104] Zhigilei, L. V., 2001, “Computational Model for Multiscale Simulation of Laser Ablation,” *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 677, pp. AA2.1.1-AA2.1.11.
- [105] Kim, J. D., and Kim, D. S., 1995, “Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining,” *Journal of Materials Processing Tech.*, 49(3-4), pp. 387-398.
- [106] Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, “On the Modeling and

- Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(4), pp. 695-705.
- [107] Joshi, S., and Melkote, S., 2002, “An Explanation for the Size-Effect in Machining Using Strain Gradient Plasticity,” *JSME/ASME Int. Conf. on Materials and Processing*, 1, pp. 318-323.
- [108] Liu, X., Jun, M. B. G., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, “Cutting Mechanisms and Their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-Endmilling,” *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*, 15, art. no. IMECE2004-62416, pp. 583-592.

