ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση και διερεύνηση των τεχνολογικών της παραμέτρων

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

υπό τον

Ταπόγλου Νικόλαο

Χανιά
Ιούνιος 2012

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT
DIVISION OF PRODUCTION ENGINEERING

Gear hobbing simulation and investigation of the technological parameters involved

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

by

Tapoglou Nikolaos

Chania
June 2012

Copyright © υπό Νικόλαο Ταπόγλου
Χανιά 2012

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.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Η διατριβή του Ταπόγλου Νικόλαου εγκρίνεται από τους:

Αντωνιάδης Αριστομένης (Επιβλέπων)……
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μήτση Σεβαστή (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)……...
Καθηγήτρια Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Δουμανίδης Χαράλαμπος (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)……...
Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Κατασκευαστικής
Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Μπιλάλης Νικόλαος……
Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σταυρουλάκης Γεώργιος……
Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τσουρβελούδης Νικόλαος……
Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τσιάφης Ιωάννης……..
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Στην οικογένειά μου

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες ix
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα x
Περίληψη xi
Abstract xii

1. Εισαγωγή 1
1.1 Αντικείμενο της διατριβής 1
1.2 Στόχοι της διατριβής 1
1.3 Δομή της διατριβής 1

2. Στάθμη των γνώσεων 3
2.1 Συνοπτική παρουσίαση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση 3
2.2 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση 8
2.2.1 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας 9
2.2.2 Μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων 19
2.2.3 Φθορά στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση 22
2.3 Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής 24

3. Μοντέλο προσομοίωσης 26
3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου 26
3.2 Δομή του μοντέλου προσομοίωσης 28
3.3 Μοντελοποίηση της κινηματικής της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση 28
3.4 Διαδικασία παραγωγής απαραμόρφωτων αποβλίττων 35
3.5 Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής 42
3.6 Υπολογισμός χαρακτηριστικών ποιότητας οδοντωτών τροχών 51
3.7 Το λογισμικό HOB3D 54
3.7.1 Κύρια φόρμα του προγράμματος 54
3.7.2 Φόρμα παρουσίασης αποτελεσμάτων 56
3.7.3 Φόρμα παρουσίασης των δυνάμεων κοπής 57
3.7.4 Φόρμα δημιουργίας αναφορών 58
3.7.5 Φόρμα προεπεξεργαστή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων 58
3.7.6 Φόρμα υπολογισμού της ποιότητας οδοντωτών τροχών 59

4. Επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης HOB3D 60
4.1 Επαλήθευση του αυλακιού της παραγόμενης οδόντωσης 60
4.2 Επαλήθευση του κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής 63

5. Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων 67
5.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων 67
5.2 Διαδικασία προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων 68
5.2.1 Ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης 71
5.2.2 Εισαγωγή και πλεγματοποίηση του τεμαχίου 71
5.2.3 Μοντελοποίηση του υλικού προς κατεργασία 73
5.2.4 Εισαγωγή και πλεγματοποίηση του κοπτικού εργαλείου 75
5.2.5 Μοντελοποίηση του υλικού του κοπτικού εργαλείου 76

5.2.6 Εισαγωγή οριακών συνθηκών 76
5.3 Επαλήθευση της τροχιάς του κοπτικού δοντιού 76
5.4 Επαλήθευση των παραγόμενων αποβλίττων....78
5.5 Επαλήθευση δυνάμεων κοπής 82

6. Διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας.... 85
6.1 Επίδραση των παραμέτρων του οδοντωτού τροχού στις δυνάμεις κοπής....85
6.2 Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής 90
6.3 Επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στις δυνάμεις κοπής....93
6.4 Επίδραση των παραμέτρων του οδοντωτού τροχού στις δυνάμεις κοπής....94

7. Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις.... 96

8. Βιβλιογραφία 98

Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνεται μία δεκάχρονη και πλέον διαδρομή μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με στήριξαν κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την καθοδήγησή του καθ΄ όλο το διάστημα της εκπόνησης της διατριβής. Αναμφισβήτητα οι συμβουλές του με ώθησαν στην αναζήτηση νέων δρόμων στην έρευνα και ταυτόχρονα με επανέφεραν στον ορθό δρόμο, όταν ο ενθουσιασμός με απομάκρυνε από το στόχο μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, την κ. Σεβαστή Μήτση, Καθηγήτρια του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, και τον κ. Χαράλαμπο Δουμανίδη, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Κύπρου, για την υποστήριξη και τις παρατηρήσεις τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για το χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της παρούσας εργασίας και τις παρατηρήσεις τους για τη βελτίωση της ποιότητας της.

Για τα πειραματικά αποτελέσματα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Mrs Irina Cozminca, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του "Gh. Asachi" Technical University of Iasi.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο φίλο και συνάδελφο Ταξιάρχη Μπελή, Διπλ. Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης (M.Sc.), για τη βοήθεια, την ηθική στήριξη και τη φιλία του.

Για τη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Στέλιο και Διονυσία και την αδερφή μου Ευδοκία.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Ταπόγλου Νικόλαος γεννήθηκε στην Αθήνα το 1983 όπου και ολοκλήρωσε τη βασική του εκπαίδευση. Το 2001 ξεκίνησε τις σπουδές του στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης από όπου και αποφοίτησε το Σεπτέμβριο του 2006, με βαθμό πτυχίου 7,83. Συνέχισε και ολοκλήρωσε επιτυχώς (2008) τις σπουδές του στο Μεταπτυχιακό πρόγραμμα ειδίκευσης στον τομέα των Συστημάτων Παραγωγής του ίδιου τμήματος. Τον Αύγουστο του 2008 έγινε δεκτός ως υποψήφιος διδάκτωρ στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Από το 2008 έως και σήμερα έχει εργαστεί ως εργαστηριακός συνεργάτης στο Πολυτεχνείο Κρήτης όπου και συμμετείχε στην εκπαίδευση σαν εργαστηριακός βοηθός στα μαθήματα «Μελέτη και ανάπτυξη Προϊόντων», «Μελέτη και σχεδίαση με χρήση Η/Υ (CAD)», «Μετρολογία», «Δίκτυα παραγωγής (CAM)» και «Στοιχεία Μηχανών». Από το 2007 έως και σήμερα έχει εργαστεί με συμβάσεις έργου σε εθνικά ερευνητικά προγράμματα όπως: «Καινοτόμες Δράσεις στο Πεδίο του Εργαστηριακού και Λειτουργικού Χαρακτηρισμού Λεπτών Επικαλύψεων και άλλων Σκληρών Προηγμένων Υλικών Βιομηχανικών Εφαρμογών», «Βασική έρευνα 2008-Προσομοιωτικό μοντέλο μετωπικού φραιζαρίσματος με χρήση συστημάτων CAD» και «Ηράκλειτος ΙΙ – Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας».

Δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές

- Tapoglou, N., Antoniadis, A.
  CAD-based calculation of cutting force components in Gear Hobbing, A.S.M.E. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, Vol. 134(3), pp. 031009-1 - 031009-8.
- Kyratsis, P., Tapoglou, N., Bilalis, N. and Antoniadis, A.
  Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface, International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2011, Vol. 10, Nos. 1/2, pp.18–33.
- Tapoglou, N., Antoniadis, A.
  3-Dimenstional Kinematics Simulation of Face Milling, Measurement, 2012, Vol. 45(6), pp. 1396-1405.
- Tapoglou, N., Mammas, A., Antoniadis, A.
  Influence of Machining Data on Developed Cutting Forces in Gear Hobbing, International Journal of Machining and Machinability of Materials (υπό κρίση).

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές

- Tapoglou, N., Maravelakis E., Antoniadis, A.
  3D Simulation of Face Milling, International Conference on Mechanical and Industrial Engineering, ICMIE 2009, Amsterdam, Netherlands.
- Tapoglou, N. Antoniadis, A.
  Influence of cutting parameters in face milling on cutting forces and surface roughness using CAD based simulation, International Conference on Manufacturing Systems, ICMS 2009, Iasi, Romania pp. 1-11.
- Tapoglou, N., Antoniadis, A.
  CAD-Based calculation of cutting force components in gear hobbing, Design, Technology and Management in Manufacturing D.T.M.M.-2010, Iasi Romania, pp. 21-30.
- Tapoglou, N., Belis, T., Vakondios, D., Antoniadis, A.
  CAD-Based Simulation of Gear hobbing, 31st International Symposium on Mechanics of Materials Aghia Marina, Greece, pp. 136-150.

Περίληψη

Η κατασκευή οδοντώσεων συνθέτει διεθνώς μια από τις πλέον σημαντικές παραγωγικές διαδικασίες, με υψηλό τεχνολογικό και οικονομικό ενδιαφέρον. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο αριθμός των παραγόμενων οδοντωτών τροχών υψηλής ακρίβειας ξεπερνά τα ένα δισεκατομμύριο τεμάχια ετησίως. Ως εκ τούτου, είναι φανερό ότι η βελτιστοποίηση του παραγωγικού εξοπλισμού, των διαδικασιών και της ποιότητας των τελικών προϊόντων στις κατεργασίες οδοντώσεων συνθέτουν θέματα ερευνητικής αιχμής.

Η συντριπτική πλειοψηφία των τελικών προϊόντων οδοντώσεων παράγεται μέσω της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων (gear hobbing). Η σύνθετη κινηματική της εν λόγω κατεργασίας, αλλά και η πολύπλοκη γεωμετρία των κοπτήρων, αποτελούν δύο μόνο από τα σημαντικά προβλήματα που ανακύπτουν, μέσω των προσπαθειών βελτιστοποίησής της.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου (HOB3D) με τη βοήθεια ενός συστήματος CAD, το οποίο θα είναι σε θέση να προσομοιώσει την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Για την καλύτερη υλοποίηση του στόχου χρησιμοποιήθηκε η ακρίβεια ενός εμπορικού πακέτου CAD για τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου καθώς και για τη μοντελοποίηση της σύνθετης κινηματικής της κατεργασίας. Έτσι τα παραγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου έχουν τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και περιλαμβάνουν τη τρισδιάστατη γεωμετρία του τελικού τροχού και όλων των ενδιάμεσων απαραμόρφωτων αποβλίττων και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώθηκαν επίσης, είτε με αναλυτικές σχέσεις και πειραματικά δεδομένα στη περίπτωση της γεωμετρίας της παραγόμενης αυλάκωσης, είτε με αποτελέσματα πειραμάτων που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και αφορούν τις δυνάμεις κοπής, τόσο σε κάθε ένα κοπτικό δόντι, όσο και συνολικά σε όλο το κοπτικό εργαλείο. Το μοντέλο εξοπλίστηκε με ένα πλήρως λειτουργικό περιβάλλον μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να εκπονήσει προσομοιώσεις καθώς και να αναλύσει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.

Στη συνέχεια και προκειμένου να συγκριθεί το μοντέλο που αναπτύχθηκε με αντίστοιχα γενικότερα μοντέλα που χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία, αναπτύχθηκε αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του λογισμικού Deform. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της ροής του αποβλίττου μέσα στο αυλάκι καθώς και, επιπλέον των ανωτέρω, για επιβεβαίωση των υπολογισμένων με το λογισμικό HOB3D απαραμόρφωτων αποβλίττων και των αναπτυσσομένων δυνάμεων κοπής. Για την κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το μοντέλο προσομοίωσης με χρήση συστήματος CAD για τους συμμετέχοντες παράγοντες της κοπής (εργαλείο, τεμάχιο) ενώ τα αποτελέσματά του επιβεβαιώθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τέλος, έγινε διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας ανά περίπτωση, με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Abstract

Every high performance gear transmission module is composed of involute gears. External involute gears can be manufactured with a series of methods, the most widely applied of which being gear hobbing. The prediction of the quality of the produced gear and the determination of the cutting forces involved are of great importance.

The present thesis introduces a novel simulation code called HOB3D that simulates the process of gear hobbing. This code can simulate the complex movements involved in gear hobbing with the best available accuracy, which is achieved by embedding the developed algorithm in a commercial CAD environment. The simulation code calculates the solid gap and non-deformed chip geometries. The latter where used to calculate the total cutting forces as well as the cutting forces in every cutting edge involved in the cutting process using Kienzle Victors' equations. These equations predict the cutting forces in relation to the non-deformed chip geometry dimensions in the rake face of the cutter.

The results of the model have been verified either with the use of analytic equations and experimental results, in the case of the profile of the produced gear gap, or with the use of experimental results found in the references, regarding the cutting forces. HOB3D is also equipped with a fully functional user friendly graphical user interface where the user can enter the simulation data, keep track of the simulation course, view and analyze the results.

Moreover, a finite element program was used to simulate the flow of the chip in the confined space of a gear gap, as well as the determination of the developed cutting forces. Appropriate pre-processors were developed in order to prepare the data taken from HOB3D for an easier and error proof insertion in the finite element program selected. In order to verify the results of the model, the trajectories that the cutter forms where compared to the ones created by HOB3D. The cutting forces that were calculated were also verified with the HOB3D corresponding results.

Finally, the effect of the different machining data on the resulting cutting forces was studied. Parameters like the module and the number of teeth of the produced gear, the number of hob columns and origins, and the axial feed was studied with respect to the maximum and minimum developed cutting force components.

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με τη χρήση ενός εμπορικού πακέτου CAD. Η κατεργασία αυτή είναι μια από τις κυριότερες κατεργασίες που χρησιμοποιείται στην κοπή οδοντώσεων υψηλής ακρίβειας. Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον που έχει ερευνητικά η περιοχή της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση, ελάχιστα μοντέλα, υπολογιστικά ή αναλυτικά, έχουν παρουσιαστεί, που μελετούν αυτήν την κατεργασία. Η σύνθετη κινηματική, η περίπλοκη γεωμετρία και το υψηλό κόστος κοπτικών εργαλείων και κτήσης μιας εργαλειομηχανής φραιζαρίσματος με κύλιση, είναι μερικοί από τους λόγους για τους οποίους η δημοσιευμένη έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο είναι σχετικά περιορισμένη. Επιπλέον η δημοσιευμένη έρευνα στο πεδίο αυτό είναι περιορισμένη λόγο του ότι αυτή πραγματοποιείται από εταιρίες κατασκευής εργαλειομηχανών και κοπτικών εργαλείων η οποία δεν δημοσιεύεται.

1.2 Στόχοι της διατριβής

Συνοπτικά, οι πρωτότυπες ερευνητικές δραστηριότητες οι οποίες αναπτύχθηκαν είχαν τους παρακάτω στόχους:

- Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης για την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση που περιλαμβάνει τρισδιάστατη μοντελοποίηση των παραγόντων της κοπής, προσομοίωση της σύνθετης κινηματικής, προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίττων και της γεωμετρίας του κατεργαζόμενου τροχού. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να αποτελεί μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα προσομοίωσης της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση και θα πρέπει να συνοδεύεται από πλήρως λειτουργικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη-μοντέλου.
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου υπολογισμού των δυνάμεων κοπής με βάση τη γεωμετρία των τρισδιάστατων αποβλίττων και επιβεβαίωση μοντέλου με πειραματικά μετρημένες δυνάμεις κοπής.
- Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να περιλαμβάνουν τη ροή του αποβλίττου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας καθώς και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις στο κοπτικό εργαλείο.
- Έλεγχος της επίδρασης παραμέτρων του κοπτήρα του τροχού και των συνθηκών κατεργασίας πάνω στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής.

1.3 Δομή της διατριβής

Στο κεφάλαιο της στάθμης των γνώσεων παρουσιάζεται η ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας στα θέματα της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι ερευνητικές προσεγγίσεις από άλλες ερευνητικές ομάδες, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- Εκείνες που δημιουργούν μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας με αναλυτικές, μαθηματικές ή αριθμητικές μεθόδους προκειμένου να υπολογιστούν μεγέθη που σχετίζονται με τις διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίττων, ή/και τις δυνάμεις κοπής.
- Εκείνες που ασχολούνται με τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας, υπολογίζοντας τις τάσεις και τις θερμοκρασίες κοπτικού και τεμαχίου έχοντας ως στόχο τον υπολογισμό της αντοχής του κοπτικού.

- Εκείνες που εκτελούν πειράματα για την εύρεση των μηχανισμών πίσω από τη φθορά των κοπτικών εργαλείων κατά τη κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης HOB3D το οποίο αναπτύχθηκε με τη χρήση συστήματος CAD. Η δομή που ακολουθήθηκε για το κεφάλαιο αυτό μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω σημεία:

- Σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύχθηκε το σύστημα CAD που χρησιμοποιήθηκε.
- Περιγραφή της δομής του μοντέλου που αναπτύχθηκε, αναλύοντας τα δεδομένα εισόδου, τη διαδικασία της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα του μοντέλου.
- Παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης του κοπτικού εργαλείου και της κινηματικής της κατεργασίας.
- Παρουσίαση της διαδικασίας παραγωγής των απαραμόρφωτων αποβλίττων καθώς και της τελικής γεωμετρίας του κατεργαζόμενου τροχού.
- Περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των δυνάμεων κοπής και παρουσίαση της διαδικασίας υπολογισμού τους στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση.
- Παρουσίαση του λογισμικού διεπαφής χρήστη-μοντέλου που αναπτύχθηκε και με το οποίο μπορούν να εισαχθούν τα δεδομένα της κατεργασίας τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωσή της.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία επιβεβαίωσης του μοντέλου το οποίο αναπτύχθηκε. Αρχικά, ελέγχθηκε η ορθότητα της παραγόμενης γεωμετρίας του τροχού, η οποία και έγινε με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων που την περιγράφουν καθώς επίσης και με πειραματικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, πιστοποιήθηκε ο κώδικας υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, τόσο για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε ένα δόντι όσο και συνολικά σε ολόκληρο το κοπτικό εργαλείο.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχτηκε στο κεφάλαιο 3, για τον ορισμό του αυλακιού προς κατεργασία. Για την αποτελεσματικότερη εισαγωγή των δεδομένων της προσομοίωσης δημιουργήθηκε προ-επεξεργαστής ο οποίος προετοιμάζει δεδομένα, όπως το αυλάκι του τροχού, η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου καθώς και τα κέντρα περιστροφής του για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα το οποίο και αναλαμβάνει την επίλυσή τους για τον υπολογισμό της ροής του αποβλίττου και των αναπτυσσομένων δυνάμεων κοπής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ελέγχθηκαν σε σχέση με αντίστοιχα που βρεθήκαν στη βιβλιογραφία ενώ επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του προγράμματος προσομοίωσης HOB3D που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Οι παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν αφορούσαν γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τροχού και παραμέτρους της κατεργασίας. Από τις προσομοιώσεις τη χρήση του CAD μοντέλου μπορεί να παρατηρηθεί ότι κρισιμότερος παράγοντας είναι η πρόωση της κατεργασίας, η οποία μεταβάλει σε μεγάλο βαθμό τις δυνάμεις κοπής.

Τέλος, στα **Κεφάλαια 7** και **8** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και η βιβλιογραφία αντίστοιχα.

2 Στάθμη των Γνώσεων

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα και απαραίτητα στοιχεία μηχανών, λόγω της ικανότητάς τους να συνθέτουν ευέλικτες, ακριβείς και αξιόπιστες μεταδόσεις περιστροφικής κίνησης. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία ο κύκλος εργασιών της διεθνούς βιομηχανίας παραγωγής οδοντώσεων ξεπερνά τα 150 δις. €, ενώ η ετήσια παραγωγή οδοντωτών τροχών είναι της τάξης των δυο δισ. τεμαχίων, με τους μισούς από αυτούς να είναι οδοντωτοί τροχοί υψηλής ακριβείας [1]. Ως εκ τούτου, η κατασκευή οδοντώσεων είναι διεθνώς μία από τις πλέον σημαντικές παραγωγικές διαδικασίες, με υψηλό τεχνολογικό και οικονομικό ενδιαφέρον.

Μια από τις κυριότερες μεθόδους παραγωγής οδοντωτών τροχών είναι η κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Οι οδοντωτοί τροχοί που μπορούν να κατασκευασθούν με αυτήν τη μέθοδο ποικίλουν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους. Έτσι με την μέθοδο αυτή κατασκευάζονται οδοντωτοί τροχοί για μικρομειωτήρες με διάμετρο μερικών χιλιοστών, οδοντωτοί τροχοί στην αυτοκινητοβιομηχανία με διάμετρο μερικών εκατοστών ακόμα και οδοντωτοί τροχοί για κιβώτια ταχυτήτων σε πλοία ή ανεμογεννήτριες με διάμετρο μερικών μέτρων (Σχήμα 2.1).

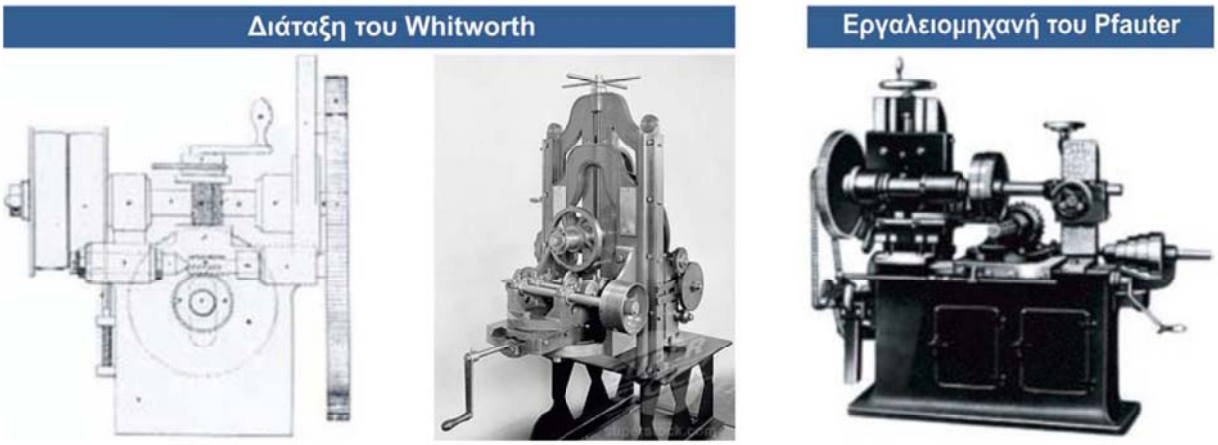
Σχήμα 2.1 Παραδείγματα οδοντωτών τροχών

Η κατεργασία οδοντωτών τροχών με φραιζάρισμα με κύλιση παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες στη μελέτη της και όχι μόνο λόγω της σύνθετης κινηματικής της. Η πολύπλοκη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων, οι συγκρούσεις των υπο-αποβλίττων κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσής τους από το προς κατεργασία αυλάκι και οι πολλές παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την κατεργασία, είναι μερικοί από τους λόγους που καθιστούν τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας αναγκαία αλλά και ταυτόχρονα εξαιρετικά ενδιαφέρουσα και απαιτητική.

2.1 Συνοπτική παρουσίαση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση

Η ιστορία των οδοντωτών τροχών ξεκινά με τον μηχανισμό των Αντικυθήρων, ο οποίος χρονολογείται στο 1^{ο} αιώνα π.Χ., και αποτελεί τον αρχαιότερο σωζόμενο μηχανισμό ο οποίος λειτουργούσε με οδοντωτούς τροχούς. Η δημιουργία τους με κατεργασίες κοπής με εργαλειομηχανές ξεκινά με αυτήν του Juanelo Torrianno (1501–1575) η οποία ήταν σε θέση να κατασκευάζει τρείς οδοντωτούς τροχούς ημερησίως. Το 1835 ο Joseph Whitworth παρουσίασε την πρώτη διάταξη η οποία μπορούσε να κατεργαστεί οδοντωτούς τροχούς με φραιζάρισμα με κύλιση. Στην πατέντα που κατέθεσε, παρουσιάζεται ένα κοπτικό εργαλείο φραιζαρίσματος με κύλιση το οποίο κατεργάζεται έναν οδοντωτό τροχό. Η πρώτη εργαλειομηχανή κοπής ευθείας οδόντωσης με φραιζάρισμα με κύλιση παρουσιάστηκε από

τον George B. Grant το 1889, ενώ το 1897 ο Robert Hermann Pfauter παρουσίασε την πρώτη εργαλειομηχανή κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση για κοπή ευθείας και ελικοειδούς οδόντωσης. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το σχέδιο της πατέντας του Whitworth καθώς και η εργαλειομηχανή του Pfauter.



Σχήμα 2.2 Εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος με κύλιση

Σήμερα, η κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση γίνεται ως επί το πλείστον σε ειδικές εργαλειομηχανές γραναζοκοπής οι οποίες μπορούν να εκτελέσουν και περιορισμένης έκτασης κατεργασίες διάτρησης και τορναρίσματος. Ανάλογα με τον προσανατολισμό τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κατακόρυφες ή οριζόντιες εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος με κύλιση [2], με τα πλεονεκτήματα του κάθε τύπου να παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.

		Ευκολία χειρισμού	Ευθυγράμμιση τεμαχίου	Απομάκρυνση αποβλίττων	Κέντρο ύψους της μηχανής
Κατακόρυφη		Η ρύθμιση και φόρτωση του κοπτικού και του τεμαχίου είναι εύκολη	Εύκολη ευθυγράμμιση του τεμαχίου	Τα απόβλιττα ωθούνται προς τα κάτω απο την φορά της κατεργασίας	Υψηλό κέντρο της μηχανής, γεγονός που την καθιστά λιγότερο στιβαρή
Οριζόντια		Δύσκολη αλλαγή και ρύθμιση του κοπτικού λόγω περιορισμένου χώρου	Δυσκολη ευθυγράμμιση του τεμαχίου λόγω της βαρύτητας	Τα απόβλιττα μπορεί να εκτοξευθούν προς τα πάνω.	Το κέντρο ύψους βρίσκεται χαμηλά με αποτέλεσμα μία στιβαρή μηχανή

Σχήμα 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσανατολισμών εργαλειομηχανών φραιζαρίσματος με κύλιση

Τα κοπτικά εργαλεία τα όποια χρησιμοποιούνται για την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση ονομάζονται φραίζες κύλισης (Hob). Η φραίζα έχει κυλινδρικό σχήμα με περιφερικά διατεταγμένες κοπτικές ακμές, οι οποίες σχηματίζουν μιαν έλικα. Η μορφή του εργαλείου σε μία τομή του βασίζεται στην κατατομή αναφοράς των κοπτικών εργαλείων DIN 3972 [3] ενώ οι διαστάσεις του κοπτήρα βασίζονται στο ISO 2490 [4]. Τα συνήθη μεγέθη αυτού του είδους των κοπτικών εργαλείων ποικίλουν σε διάμετρο από 20 έως και 350mm και οι οδοντώσεις που μπορούν να προκύψουν έχουν μέτρο οδόντωσης από 0.2 έως 30mm.

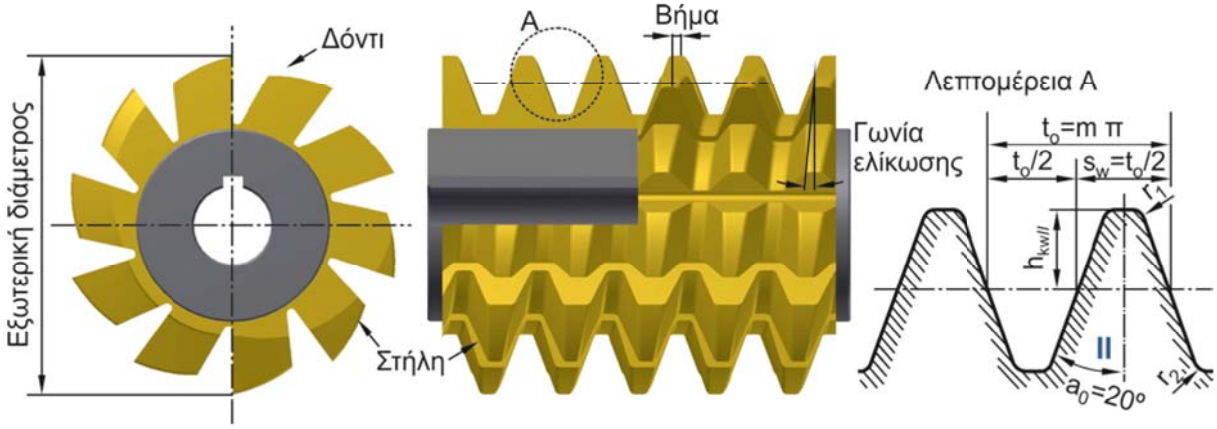
Τα κοπτικά εργαλεία κατασκευάζονται είτε από ταχυχάλυβες (HSS) είτε από σκληρομέταλλα, τα οποία είναι προϊόντα κονιομεταλλουργίας και αποτελούνται από καρβίδιο του βολφραμίου (WC), κατά κύριο λόγο, καθώς και άλλα καρβίδια σε μικρότερα ποσοστά. Συνδετική ύλη μεταξύ των κόκκων στα σκληρομέταλλα είναι το κοβάλτιο (Co). Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του κοπτικού εργαλείου και τη μείωση της φθοράς του επικαλύπτονται με σκληρά μεταλλικά κράματα, όπως TiN, TiAlN, Ti(C,N) κ α (Al,Cr)N, με την επικάλυψη να γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις με τη μέθοδο της φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD). Οι επικαλύψεις αυτές έχουν μικρο-σκληρότητα κατά Vickers της τάξης των 3000 HV0.05, ενώ μπορούν να κατεργαστούν οδοντωτούς τροχούς σε συνθήκες ξηρής κοπής αγγίζοντας ταυτόχρονα περιφερικές ταχύτητες της τάξης των 400 m/min [5-7]. Οι πιο συνήθεις επικαλύψεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.

Υλικό επικάλυψης	Μικροσκληρότητα HV 0.05	Συντελεστής τριβής	Μέγιστη Θερμοκρασία	Δομή	Χρώμα
TiN	2300	0.4	600	Μονοστρωματική	Χρυσό
AlCrN	3200	0.35	1100	Μονοστρωματική	Μπλέ-γκρί
TiCN	300	0.4	400	Πολυστρωματική	Μπλέ-γκρί
CrN	1750	0.5	700	Μονοστρωματική	Ασημί-γκρί
TiAlN	3300-3500	0.25-0.4	900	Μονοστρωματική	Μπλέ-γκρί
TiCN+TiN	3000	0.4	400	Πολυστρωματική	Χρυσό
TiAlN+WC/C	3000	0.15-0.2	800	Πολυστρωματική	Σκούρο γκρί

Σχήμα 2.4 Ιδιότητες επικαλύψεων

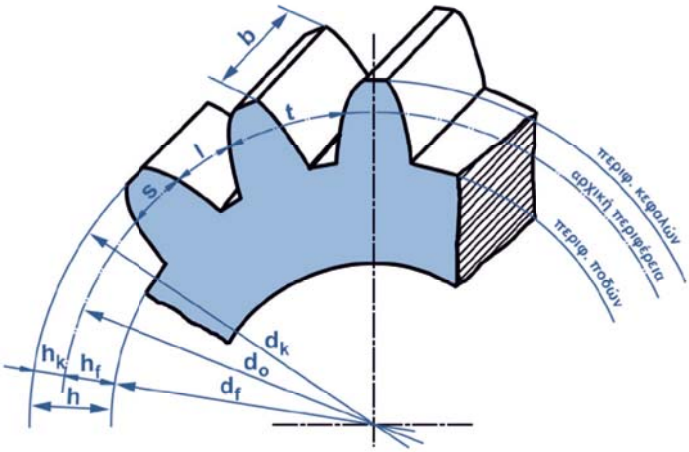
Η περιγραφή ενός κοπτικού εργαλείου κοπής οδοντώσεων με κύλιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 μαζί με την αντίστοιχη ορολογία για κάθε μέρος του. Το σώμα του κοπτικού εργαλείου αποτελείται από μια κυλινδρική εξελιγμένη σπείρα με δεδομένη εξωτερική διάμετρο, με κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος το μέτρο της οδόντωσης του οδοντωτού κανόνα του. Το εργαλείο διαθέτει μια διαμπερή οπή με σφηναύλακα για τη συγκράτησή του στην άτρακτο της εργαλειομηχανής. Οι κοπτικές ακμές είναι διατεταγμένες σε μια ή περισσότερες ελικοειδείς τροχιές, οι οποίες ονομάζονται αρχές, ενώ ταυτόχρονα είναι χωρισμένες σε στήλες. Η επιφάνεια κάθε στήλης ορίζει την επιφάνεια αποβλίττου, η οποία περνά και από τον άξονά του. Το διάκενο μπροστά από την επιφάνεια αποβλίττου κάθε δοντιού χρησιμοποιείται τόσο για τη ροή του υγρού κοπής για τη λίπανση και την ψύξη της κοπτικής ακμής, όσο και για την απομάκρυνση του αποβλίττου από το προς κατεργασία αυλάκι. Το μέγεθός του είναι κρίσιμος σχεδιαστικός παράγοντας μιας και πιθανή μεγέθυνσή του γίνεται εις βάρος του πάχους του δοντιού με αποτέλεσμα την πιθανή εμφάνιση κραδασμών στο κοπτικό εργαλείο ως αποτέλεσμα της μειωμένης στιβαρότητάς του.

Η μορφή της επιφάνειας αποβλίττου παρουσιάζεται στη λεπτομέρεια Α, όπου φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός οδοντωτού κανόνα. Έτσι, παρουσιάζονται τα μεγέθη όπως η γωνία πίεσης (a_0), το βήμα της οδόντωσης (t_0) και το πάχος του δοντιού (s_W). Η κλίση της σπείρας ορίζει τη γωνία ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου, η οποία με τη σειρά της μπορεί να μας δώσει την αξονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δοντιών κατά μήκος της σπείρας, που ονομάζεται αξονικό βήμα.



Σχήμα 2.5 Περιγραφή φραίζας κύλισης κατά ISO 2490

Τα γεωμετρικά μεγέθη του κοπτικού εργαλείου αποτυπώνονται με τη διαδικασία της κοπής στη γεωμετρία του τελικού οδοντωτού τροχού, έτσι σε ένα οδοντωτό τροχό μπορούν να αναγνωριστούν αυτά τα γεωμετρικά μεγέθη και να ορισθούν κάποιες βασικές περιφέρειες οι οποίες προκύπτουν από αυτά. Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη ενός οδοντωτού τροχού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.

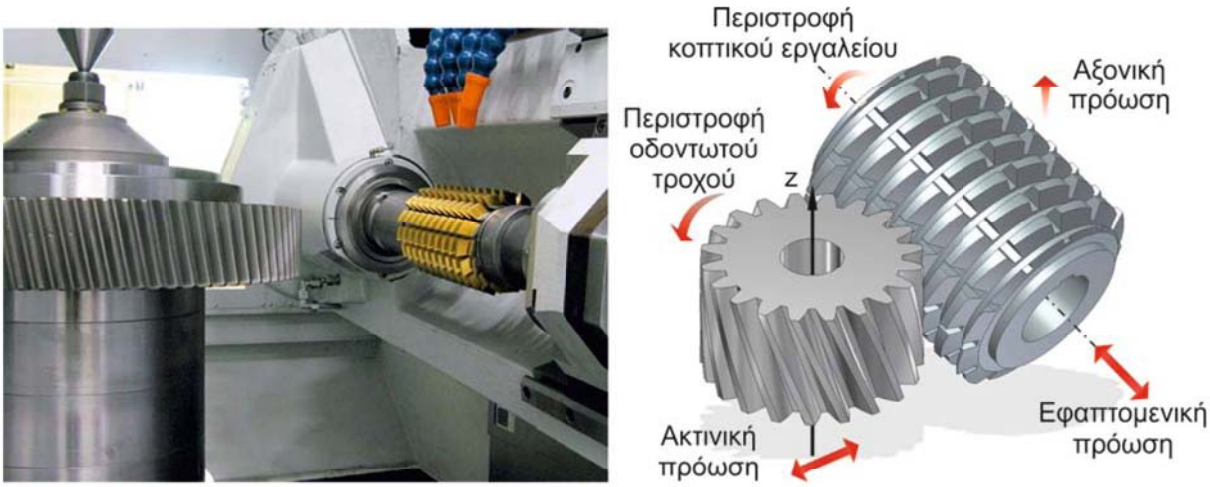


m = μέτρο οδόντωσης (modul) = t/π
d_k = διάμετρος κεφαλής
d_o = αρχική διάμετρος
d_f = διάμετρος ποδιού
s = πάχος δοντιού
l = διάκενο δοντιού
h = ύψος δοντιού
h_f = ύψος ποδιού
h_k = ύψος κεφαλής
t = βήμα οδόντωσης
z = αριθμός δοντιών
b = πλάτος οδοντωτού τροχού

Σχήμα 2.6 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη ενός οδοντωτού τροχού

Η κινηματική της κατεργασίας κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση περιγράφεται από τρεις ανεξάρτητες κινήσεις, ο σωστός συγχρονισμός των οποίων είναι κρίσιμος για την παραγωγή ενός οδοντωτού τροχού συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Οι τρεις κινήσεις που εκτελούνται από το κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο προς κατεργασία, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7, είναι :

- Η πρωτεύουσα κίνηση κοπής, που είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονα του, η οποία γίνεται με περιφερειακή ταχύτητα ίση με την ταχύτητα κοπής ενώ καθορίζει την ταχύτητα όλων των άλλων κινήσεων.
- Η περιστροφή του τεμαχίου προς κατεργασία γύρω από τον άξονά του, η οποία εξαρτάται από την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, έτσι ώστε να προκύπτουν συνθήκες εμπλοκής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου.
- Η αξονική πρόωση, η οποία είναι μια μεταφορική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ως προς τον άξονα του τεμαχίου προς κατεργασία και είναι η κίνηση πρόωσης.



Σχήμα 2.7 Κινηματική κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων

Εκτός από τις τρεις παραπάνω κινήσεις σε μια εργαλειομηχανή κατεργασίας κοπής με φραιζάρισμα με κύλιση υπάρχουν άλλες δύο βοηθητικές κινήσεις οι οποίες είναι:

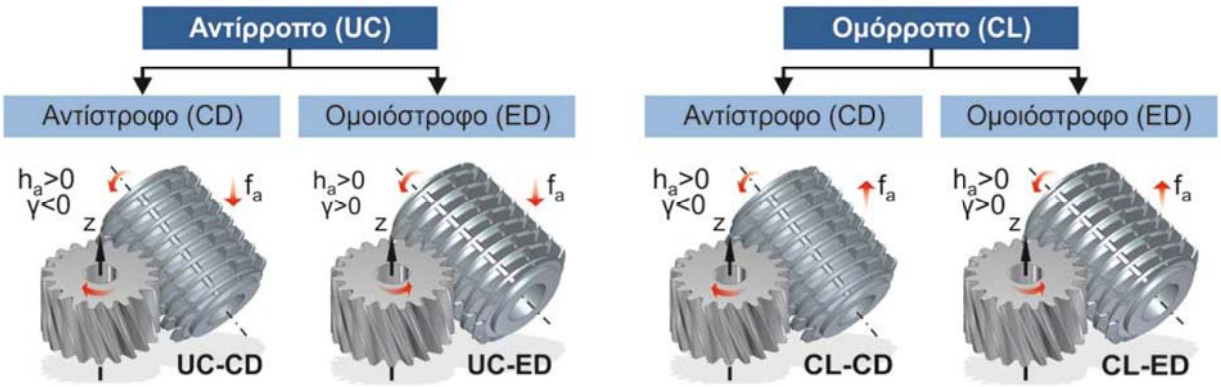
- Η εφαπτομενική πρόωση, η οποία γίνεται βηματικά ως προς τον άξονα του κοπτικού εργαλείου και σκοπός της είναι η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου για την όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη φθορά του, το μέγεθος του βήματος που χρησιμοποιείται είναι πολλαπλάσιο του αξονικού βήματος του χρησιμοποιούμενου κοπτικού εργαλείου.
- Η ακτινική πρόωση, η οποία χρησιμοποιείται στην κατασκευή οδοντώσεων σφαιρικής μορφής, κοίλων ή κυρτών, καθώς και στην κατασκευή οδοντώσεων για συστήματα ατέρμονα κορώνας.

Σχήμα 2.8 Θέσεις κύλισης στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων

Λόγω της κινηματικής της κατεργασίας κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου κατεργάζεται με το δικό του μοναδικό τρόπο το αυλάκι του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού εξαιτίας της κύλισης του κοπτικού εργαλείου και του οδοντωτού τροχού. Κάθε μία από αυτές τις διεισδύσεις ονομάζεται θέση κύλισης και συμβάλει στη δημιουργία του αυλακιού. Με τη σειρά της κάθε θέση κύλισης του κοπτικού εργαλείου μπορεί να χωρισθεί σε θέσεις περιστροφής, οι οποίες είναι οι διαδοχικές θέσεις από τις οποίες περνά το δόντι μιας θέσης κύλισης κατά τη

διάρκεια της περιστροφής του. Οι θέσεις κύλισης οι οποίες απαιτούνται για την κατεργασία ενός αυλακιού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.

Ανάλογα με τη φορά της πρόωσης το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων διακρίνεται σε ομόρροπο και αντίρροπο. Στις πλάγιες οδοντώσεις διακρίνονται δύο επιπλέον παραλλαγές, ανάλογα με την κατεύθυνση της ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με αυτήν του οδοντωτού τροχού. Ορίζεται με αυτό τον τρόπο το ομοιόστροφο φραιζάρισμα, αν η ελίκωση του κοπτικού εργαλείου έχει την ιδία κατεύθυνση με αυτήν του οδοντωτού τροχού και αντίστροφο σε αντίθετη περίπτωση. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τέσσερις συνολικά παραλλαγές για την κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Παραλλαγές κατεργασίας φραιζαρίσματος πλάγιων οδοντώσεων με κύλιση

2.2 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση

Η μελέτη της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο βασικά έξι ερευνητικών ομάδων, που βρίσκονται κυρίως στην Ευρώπη, ενώ κατά καιρούς έχουν ασχοληθεί με το πεδίο αυτό και μεμονωμένοι ερευνητές. Το μεγάλο κόστος κτήσης μιας εργαλειομηχανής κοπής οδοντώσεων, το μεγάλο κόστος αναλώσιμων υλικών, όπως κοπτικά και τεμάχια κατεργασίας και ο σχετικά μεγάλος χρόνος που απαιτείται για τη διεξαγωγή πειραμάτων είναι οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους η έρευνα στο αντικείμενο αυτό είναι σχετικά περιορισμένη σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η έρευνα σε αυτό το πεδίο πρόκειται για προσπάθεια βελτίωσης των υφιστάμενων εργαλείων και όχι για την παραγωγή νέας γνώσης, καθώς επίσης και στο ότι κύριο κομμάτι αυτής είναι βιομηχανική έρευνα, η οποία δεν δημοσιεύεται.

Για τη μελέτη της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση ακολουθήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις από τους ερευνητές, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

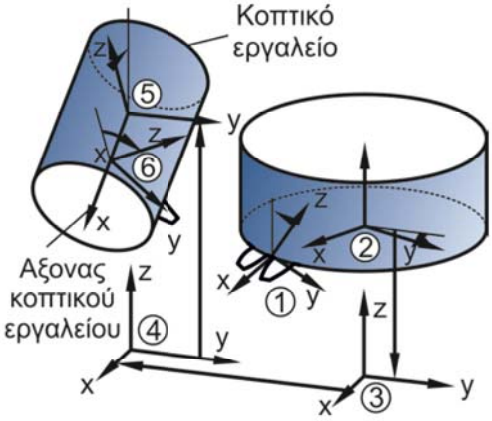
- Δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης της κατεργασίας, είτε με αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις, είτε με αριθμητικές μεθόδους. Τα μοντέλα αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούν παραδοχές ή διακριτοποιήσεις, τόσο στην κίνηση, όσο και στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και του οδοντωτού τροχού. Το Werkzeugmaschinenlabor (WZL) του Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen και το Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας (ΕΕΔΜ) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, είναι τα εργαστήρια τα οποία δραστηριοποιούνται σε αυτήν την περιοχή μελέτης.
- Δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με σκοπό την εύρεση των

τάσεων στο κοπτικό εργαλείο και τον έλεγχο της αντοχής του. Το Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας (ΕΕΔΜ) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και το Εργαστήριο Σχεδιομελέτης και Κατεργασιών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης είναι οι φορείς οι οποίοι έχουν δημιουργήσει μοντέλα για την πρόβλεψη της αντοχής των κοπτικών εργαλείων σε διάφορες συνθήκες.

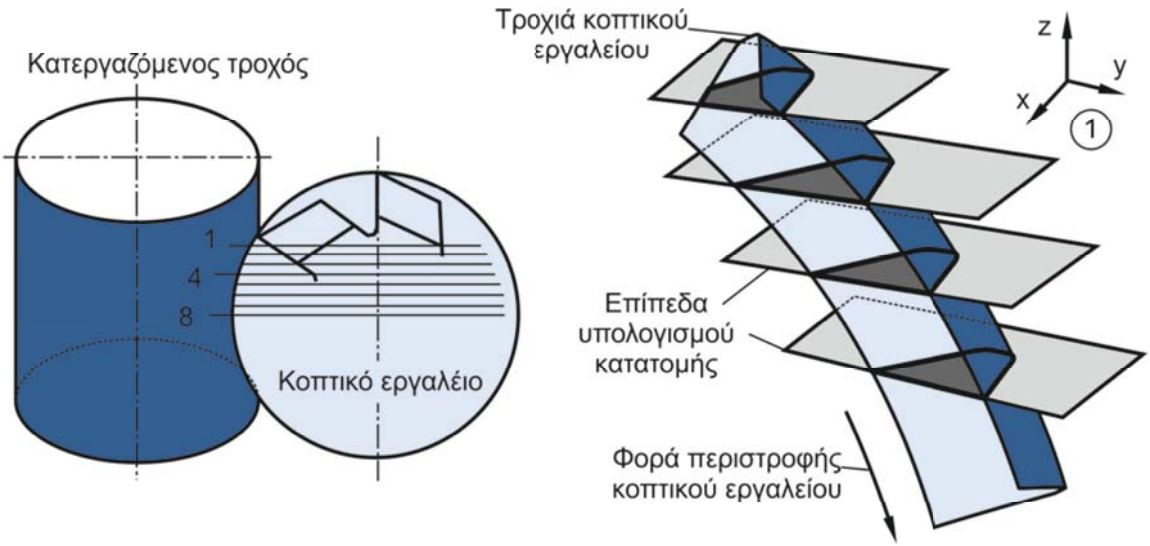
- Η εκτέλεση πειραμάτων για τη μελέτη των μηχανισμών φθοράς και την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών υποστρώματος επικάλυψης, καθώς και η εύρεση μεθόδων ταχέως χαρακτηρισμού της αντοχής των επικαλύψεων, είναι τα αντικείμενα έρευνας της ομάδας του Prof. Dr. J. Rech του Πανεπιστημίου της Λυών, καθώς και ερευνητών των Πανεπιστημίων της Οίτα της Ιαπωνίας και της Ουψάλας της Σουηδίας.

2.2.1 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας

Ο Sulzer [8] στη διδακτορική του διατριβή ήταν ο πρώτος ο οποίος ανέπτυξε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης για την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Το μοντέλο του (FRS), που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, αποτέλεσε βάση για τη μετέπειτα ανάπτυξη παρόμοιων εργαλείων στο Werkzeugmaschinenlabor (WZL) του Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen. Για την προσομοίωσή του ο Sulzer, διακριτοποίησε τον οδοντωτό τροχό, σε ένα αριθμό επιπέδων παράλληλων προς τον άξονά του. Το τελικό αυλάκι του οδοντωτού τροχού προέκυπτε σαν μία συλλογή πολυγωνικών γραμμών, οι οποίες δημιουργούνταν από την αφαίρεση της τροχιάς της κοπτικής ακμής, ως προβολή της σε κάθε ένα από τα επίπεδα από την πολυγωνική γραμμή του τρέχοντος οδοντωτού τροχού, για κάθε θέση κύλισης. Όσον αφορά την κατατομή του κοπτικού εργαλείου και σε αυτήν υπήρχε διακριτοποίηση στα καμπύλα τμήματά της. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν έξι συστήματα συντεταγμένων, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 Συστήματα συντεταγμένων του μοντέλου FRS



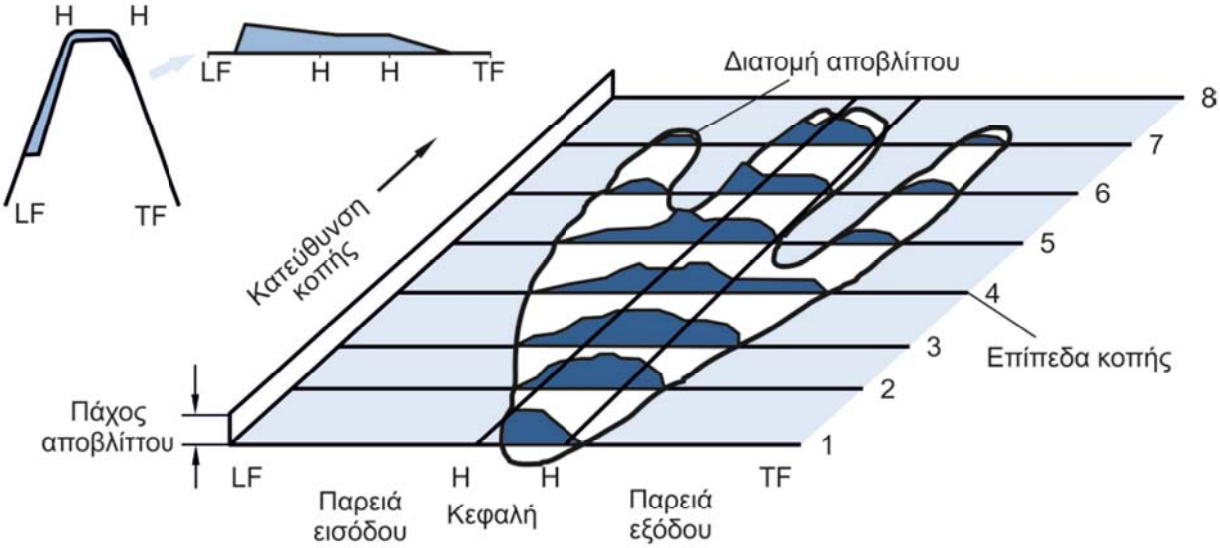
Σχήμα 2.11 Διαδικασία προσδιορισμού θέσεων περιστροφής της κοπτικής κατατομής

Το πρώτο βήμα του μοντέλου προσομοίωσης FRS περιελάμβανε τη διακριτοποίηση του οδοντωτού τροχού σε μια σειρά επιπέδων παράλληλων στον άξονα του, καθώς επίσης και τη δημιουργία της κοπτικής ακμής ως μία σειρά πολυγωνικών γραμμών. Προκειμένου να υπολογισθούν οι διεισδύσεις του κοπτικού εργαλείου υπολογίζονταν η κατατομή του κοπτικού εργαλείου σε κάθε ένα από τα επίπεδα διακριτοποίησης του οδοντωτού τροχού και η τομή των δύο πολυγωνικών γραμμών σε κάθε επίπεδο έδινε το απόβλιττο στην αντίστοιχη θέση περιστροφής. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 2.11.

Μετά τον υπολογισμό της κατατομής του κοπτικού εργαλείου στα επίπεδα κοπής, ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού του τελικού αυλακιού, καθώς επίσης και των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην πολυγωνική γραμμή, η οποία περιγράφει το αυλάκι του οδοντωτού τροχού τοποθετούταν η πολυγωνική γραμμή που περιγράφει την κατατομή του κοπτικού εργαλείου στο εκάστοτε επίπεδο. Με υπολογισμό της τομής των πολυγωνικών γραμμών υπολογιζόταν τόσο η διατομή του αποβλίττου σε εκείνο το επίπεδο όσο και το αυλάκι του οδοντωτού τροχού. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η διαδικασία αυτή.

Σχήμα 2.12 Διαδικασία υπολογισμού των διεισδύσεων του κοπτικού εργαλείου με το λογισμικό FRS

Τα αποτελέσματα του μοντέλου FRS συμπεριλάμβαναν την τελική μορφή του αυλακιού του οδοντωτού τροχού και τη διατομή των απαραμόρφωτων αποβλίττων για κάθε θέση περιστροφής, τα οποία δίνονταν ως ένα σύνολο αριθμητικών δεδομένων. Το ανάπτυγμα του αποβλίττου, όπως αυτό εξάγεται από το πρόγραμμα FRS παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13.



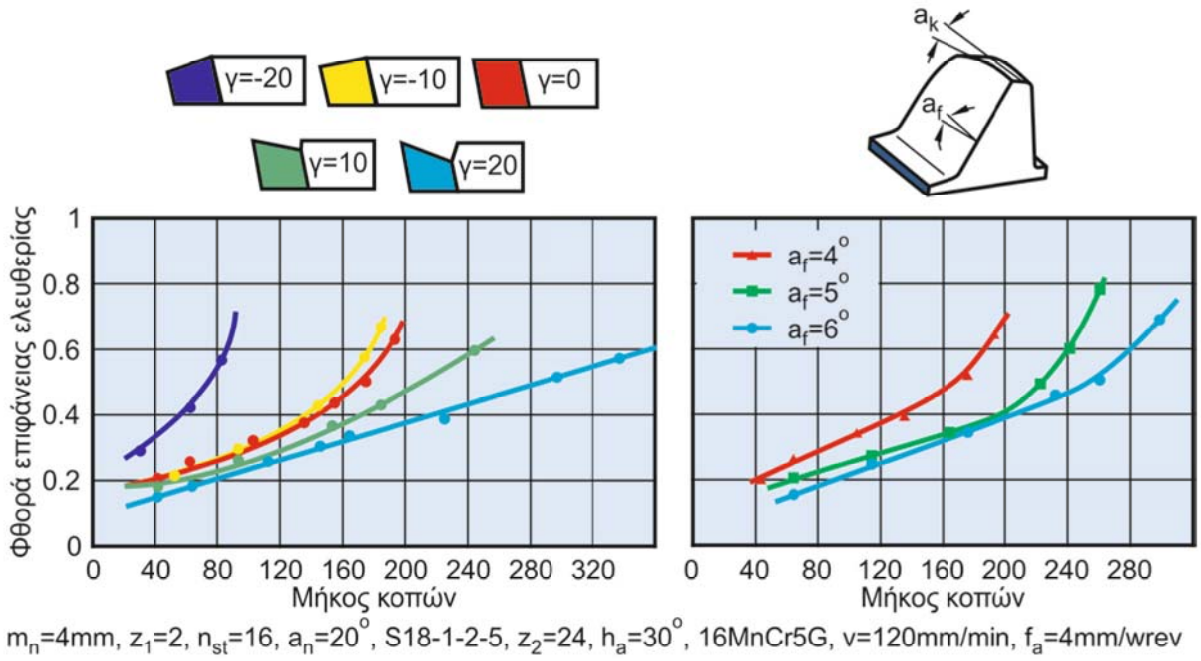
Σχήμα 2.13 Μορφή απαραμόρφωτου αποβλίττου από το FRS

Ο Joppa [9] χρησιμοποίησε το μοντέλο FRS για να προτείνει τροποποιήσεις στην κατατομή του κοπτικού εργαλείου για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του σε φθορά. Για την έρευνά του αυτή αρχικά ασχολήθηκε με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων κατεργασίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των παραγομένων αποβλίττων (Σχήμα 2.14).

Χαρακτηριστικά μεγέθη της κατεργασίας \ Εξωτερικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία		Συνθήκες κατεργασίας							Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου						Υλικά	
		Ταχύτητα κοπής (v)	Πρόωση (f_a)	Φραιζάρισμα (UC, CL)	Κατεργασία (CD,ED)	Εφαπ/κή προωση (s_h)	Κατανομή κοπής	Υγρό κοπής	Αριθμός αρχών (z_1)	Αριθμός στηλών (n_{st})	Εξωτερική διάμετρος (d_h)	Γωνία αποβλίττου (γ)	Γωνία ελευθερίας (a_f)	Διόρθωση κατατομής	Υλικό τροχού	Υλικό κοπτικού εργαλείου
Γεωμετρία αποβλίττου	Μήκος αποβλίττου		■				■		■	■						
	Μορφή αποβλίττου		■		■		■		■	■						
	Πάχος αποβλίττου				■		■			■						
Ροή αποβλίττου	Συμπίεση	■		■					■		■			■		
	Παρενόχληση ροής		■						■			■				
	Ψευδοκοπή		■					■				■	■			■
	Ενεργή γωνία ελευθερίας				■											
Κατεργασία	Αριθμός κοπών									■						
	Χρόνος κατεργασίας					■					■					
	Θερμοκρασία κοπής			■						■		■	■	■		

Μεγάλη επίδραση ■ Μικρή επίδραση ■

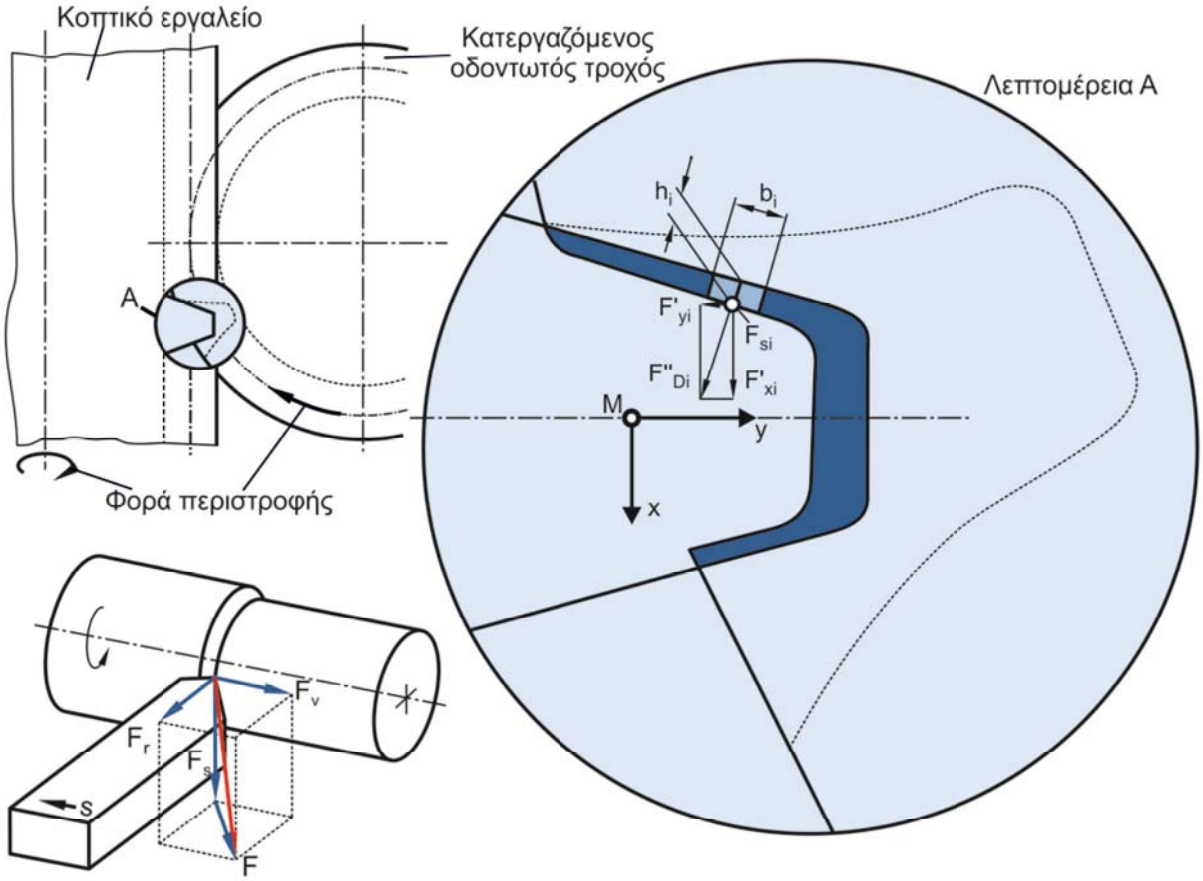
Σχήμα 2.14 Αλληλεπιδράσεις μεταξυ παραμέτρων και κατεργασίας



Σχήμα 2.15 Επίδραση γωνιών ελευθερίας και αποβλίττου στην φθορά του κοπτικού εργαλείου

Αφού μελέτησε τον τρόπο δημιουργίας του αποβλίττου και τη μορφή του, τροποποίησε με τη βοήθεια του FRS, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει κατά το δυνατόν τις συγκρούσεις των υπο-αποβλίττων. Τέλος, επικεντρώθηκε στην επίδραση των γωνιών ελευθερίας και αποβλίττου στη φθορά της επιφάνειας ελευθερίας. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15, η αύξηση της κατασκευαστικής γωνίας ελευθερίας οδηγεί στη μείωση της φθοράς της επιφάνειας ελευθερίας. Με την αύξηση της γωνίας αποβλίττου παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά.

Οι Κ. Δ. Μπουζάκης και König [10, 11] δημιούργησαν ένα μοντέλο φθοράς βασισμένο στα απαραμόρφωτα απόβλιττα του μοντέλου FRS, καθώς επίσης και ενσωμάτωσε στο FRS τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής ο οποίος επιβεβαιώθηκε και πειραματικά. Αναλυτικότερα, το μοντέλο δυνάμεων που παρουσίασαν βασίστηκε στο νόμο των Kienzle και Victor [12], η βασική αρχή του οποίου παρουσιάζεται στο κάτω αριστερό μέρος του σχήματος Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 Μοντέλο δυνάμεων στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων [10,11]

Η συνολική δύναμη κοπής μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες κατά μήκος τριών αξόνων κάθετων μεταξύ τους. Οι συνιστώσες αυτές είναι η κύρια δύναμη κοπής F_S, η δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V και η δύναμη απώθησης F_R. Το μέτρο της κάθε μιας δύναμης εξαρτάται από τις διαστάσεις του απαραμόρφωτου αποβλίττου καθώς και από παραμέτρους του υλικού. Με βάση τα παραπάνω, το μέτρο της κύριας δύναμης κοπής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_S=b\cdot K_{s1,1}\cdot h^{1-z} \quad (2.1)$$

όπου :

F_s κύρια δύναμη κοπής [N]
b πλάτος αποβλίττου [mm]
h πάχος αποβλίττου [mm]
$K_{s1,1}$ ειδική αντίσταση κοπής [N/mm^2]
z σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Παρόμοιες σχέσεις με την (2.1) ισχύουν για τις υπόλοιπες συνιστώσες της δύναμης κοπής, απώθησης F_R και στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V:

$$F_R=b\cdot K_{R1,1}\cdot h^{1-y} \quad (2.2)$$

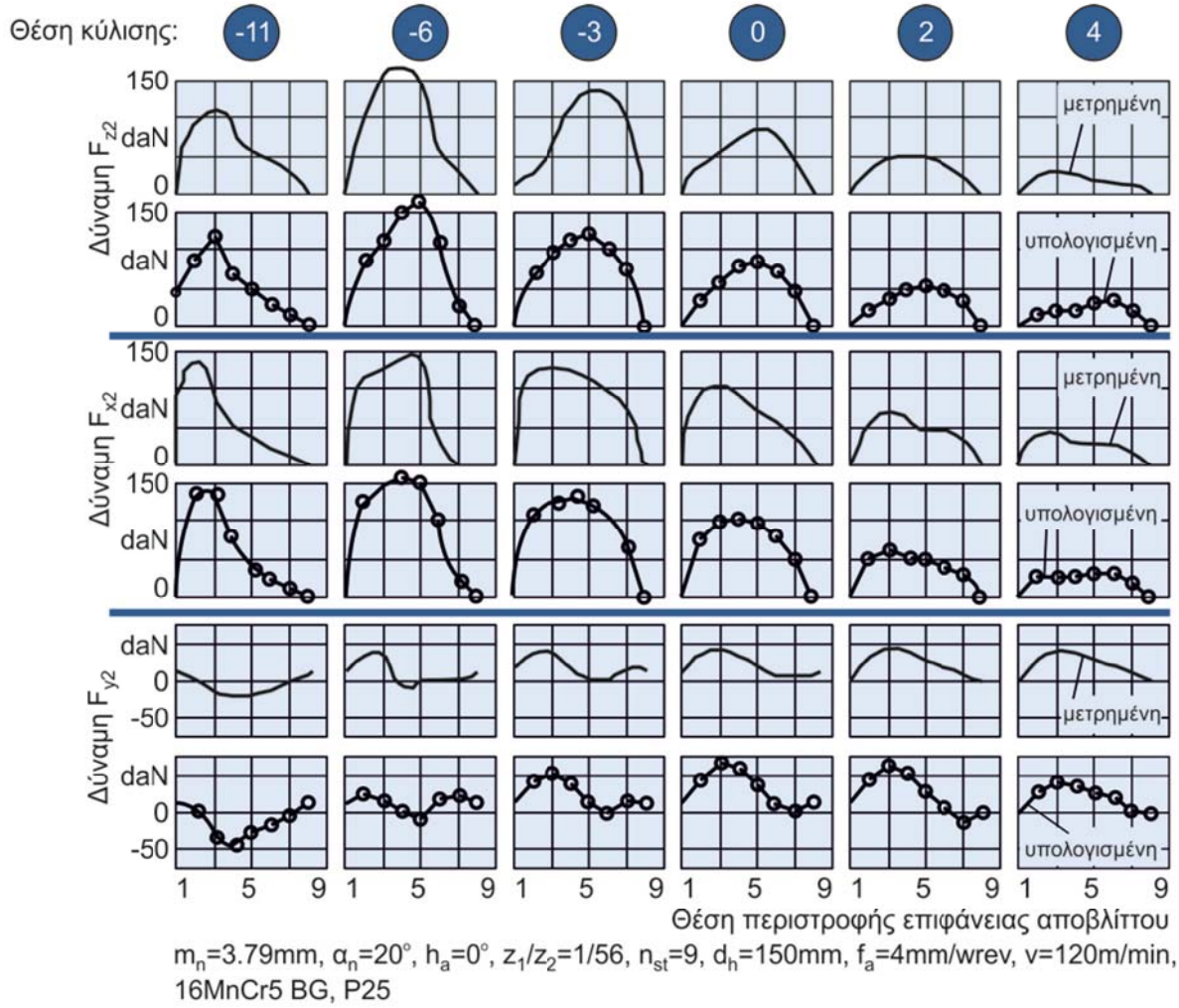
$$F_V=b\cdot K_{V1,1}\cdot h^{1-x} \quad (2.3)$$

Όπως φάνηκε από το Σχήμα 2.16 [10,11] υπολόγισαν τις δυνάμεις κοπής στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με αντίστοιχο υπολογισμό με την κλασική τόρνευση. Έτσι αρχικά για κάθε θέση κύλισης και για κάθε θέση περιστροφής υπολόγιζαν τη διατομή του απαραμόρφωτου αποβλίττου με βάση τον κώδικα FRS. Οι διατομές αυτές προβάλλονταν στο επίπεδο της κόψης ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι σχέσεις Kienzle-Victor. Στη διατομή αυτή γίνεται μια διακριτοποίηση και για κάθε στοιχειώδες τμήμα γίνεται ο υπολογισμός της δύναμης με βάση τις σχέσεις (2.1 - 2.3). Οι δυνάμεις στη συνέχεια αθροίζονται και μετασχηματίζονται σε κάθε ένα από τα συστήματα συντεταγμένων του FRS. Το μοντέλο αυτό επιβεβαιώθηκε και πειραματικά με κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση με ένα δόντι. Τα αποτελέσματα τόσο των πειραμάτων, όσο και της προσομοίωσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.17.

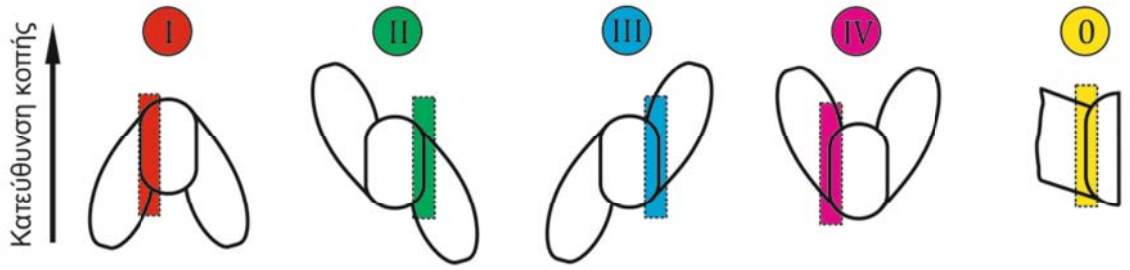
Για τη δημιουργία του μοντέλου πρόβλεψης της φθοράς, τα απόβλιττα χωρίσθηκαν σε πέντε τύπους ανάλογα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, καθένας από τους οποίους διαπιστώθηκε ότι ακολουθεί ένα διαφορετικό νόμο φθοράς. Η ομαδοποίηση αυτή στηρίχτηκε σε πειραματικά αποτελέσματα και μετρήσεις. Έτσι, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.18, ένα απόβλιττο που ανήκει στην ομάδα I προήλθε από την κοπή που ξεκινά από τις παρειές του κοπτικού δοντιού και καταλήγει στην κεφαλή του. Για κάθε ομάδα αποβλίττου, η παρεμπόδιση που δέχεται το απόβλιττο κατά τη ροή του είναι διαφορετική, με συνέπεια να υπάρχει διαφορετική επίδραση στη φθορά του κοπτικού δοντιού.

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της εφαπτομενικής πρόωσης [13], ενώ επιβεβαιώθηκε και με πειράματα φραιζαρισματος με κύλιση με ένα δόντι για επικαλυμμένο και μη κοπτικό εργαλείο [14]. Η κατεργασία του φραιζαρίσματος με κύλιση με ένα δόντι παράγει απόβλιττα πού προέρχονται από την κατεργασία μόνο μιας θέσης κύλισης καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να παρατηρηθεί πιο εύκολα η φθορά σε κάθε θέση κύλισης.

Ο Guttmann [15] παρουσίασε ένα νέο τρόπο υπολογισμού των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Το μοντέλο του περιελάμβανε τόσο παραμέτρους της γεωμετρίας του αποβλίττου από το FRS, όσο και πειραματικά προσδιορισμένους συντελεστές και έτσι μελέτησε, την επίδραση διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας στις προκύπτουσες δυνάμεις κοπής.

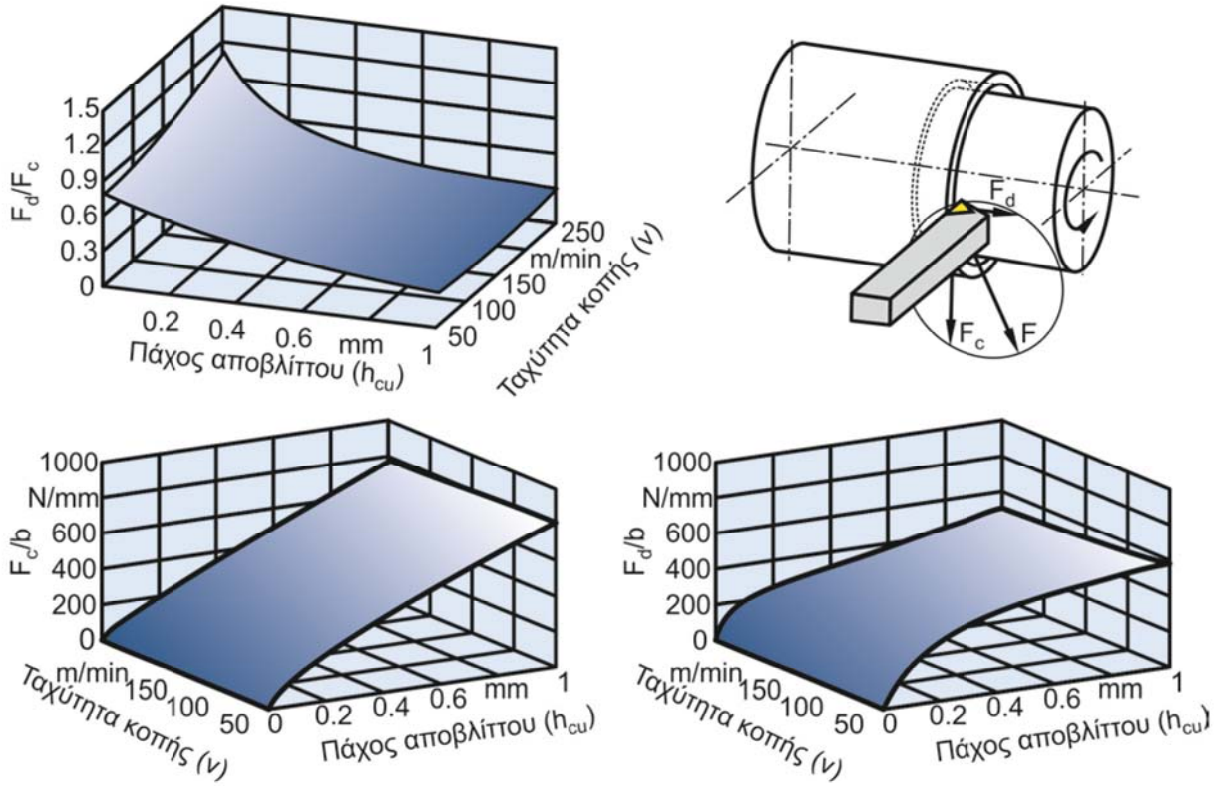


Σχήμα 2.17 Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων δυνάμεων κοπής [10,11]



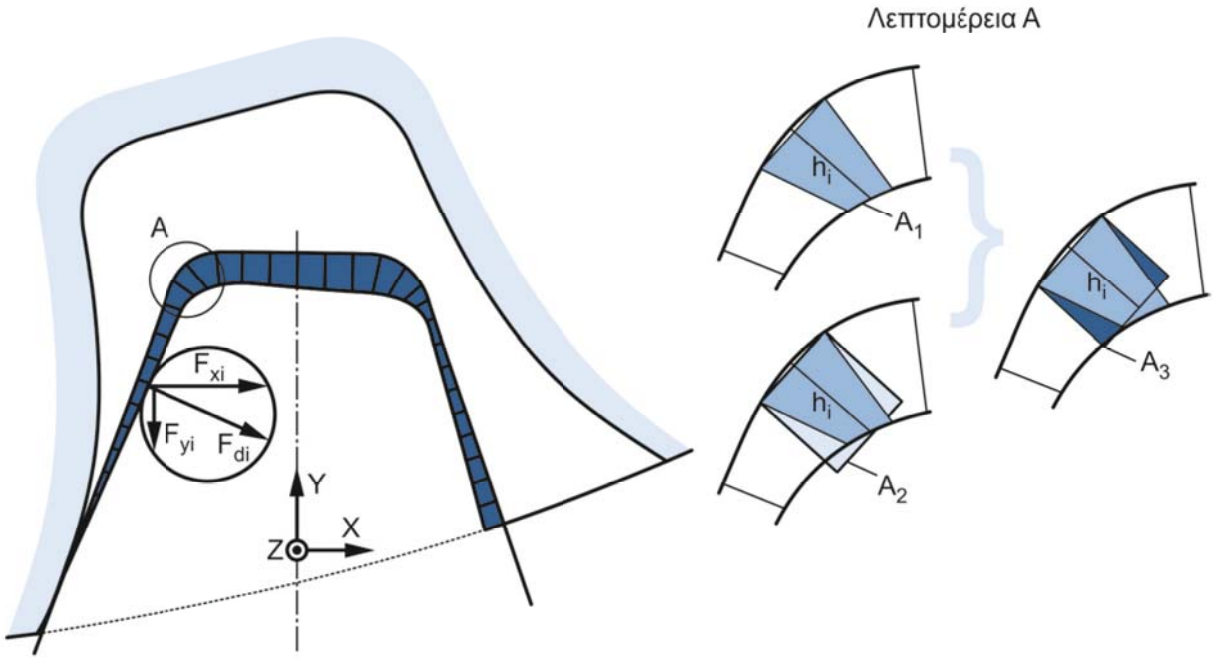
Σχήμα 2.18 Ομαδοποίηση αποβλίττων [10,11]

Για τη δημιουργία του νέου μοντέλου υπολογισμού δυνάμεων, εκπόνησε μια σειρά πειραμάτων ορθογωνικής κοπής σε διάφορα υλικά και συνθήκες, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση που παρουσιάζεται στο άνω δεξιό μέρος του σχήματος 2.19. Από τα πειραματικά δεδομένα δημιουργήθηκαν σχέσεις οι οποίες περιγράφουν την εξέλιξη των δυνάμεων κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής, του πάχους και πλάτους του αποβλίττου. Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζονται οι καμπύλες που περιγράφουν τις δυνάμεις κοπής συναρτήσει των παραμέτρων κοπής για το υλικό 16MnCr5N.



Σχήμα 2.19 Συναρτήσεις δυνάμεων κοπής [15]

Στο παραπάνω μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση, τα δεδομένα για τη γεωμετρία των αποβλίττων υπολογίστηκαν με το FRS, ενώ υπήρξε μια επιπλέον διόρθωση στα πάχη των αποβλίττων, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20 Υπολογισμός του πάχους αποβλίττου [15]

Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια A, για να υπολογιστεί το πάχος του αποβλίττου στα κυκλικά τμήματα του κοπτικού εργαλείου υπολογίζεται το εμβαδό μεταξύ δυο διαδοχικών ακτινών του κοπτικού (A_1), καθώς επίσης και το εμβαδό του ορθογωνίου πλάτους b και ύψους h_i. Τα δύο αυτά εμβαδά σταθμίζονται και έτσι προκύπτει το εμβαδό A_3 και από αυτό το διορθωμένο πάχος του αποβλίττου. Το μοντέλο αυτό επιβεβαιώθηκε με πειράματα κατεργασίας οδοντώσεων που εκπονήθηκαν.

Ένα αριθμητικό μοντέλο της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση παρουσιάστηκε από τον Abood [16]. Στο μοντέλο του, σε αντίθεση με την λογική του FRS, διακριτοποιήθηκε ο κατεργαζόμενος οδοντωτός τροχός με τη χρήση ενός πλέγματος, ενώ η κίνηση του κοπτικού εργαλείου μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια τρισδιάστατης επιφάνειας. Με αυτές τις δύο προσεγγίσεις υπολογίσθηκαν οι διαδοχικές διεισδύσεις του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια τα δεδομένα του αποβλίττου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, οι οποίες υπολογίστηκαν σε κάθε δόντι, σε διαδοχικές θέσεις περιστροφής. Η κατεύθυνση της συνολικής δύναμης κοπής είναι παράλληλη στη ταχύτητα κοπής, ενώ το μέτρο της δίνεται από τη σχέση (2.4).

$$|\overline{F_C}|=l_k \cdot h_k \cdot K_c \qquad (2.4)$$

όπου :

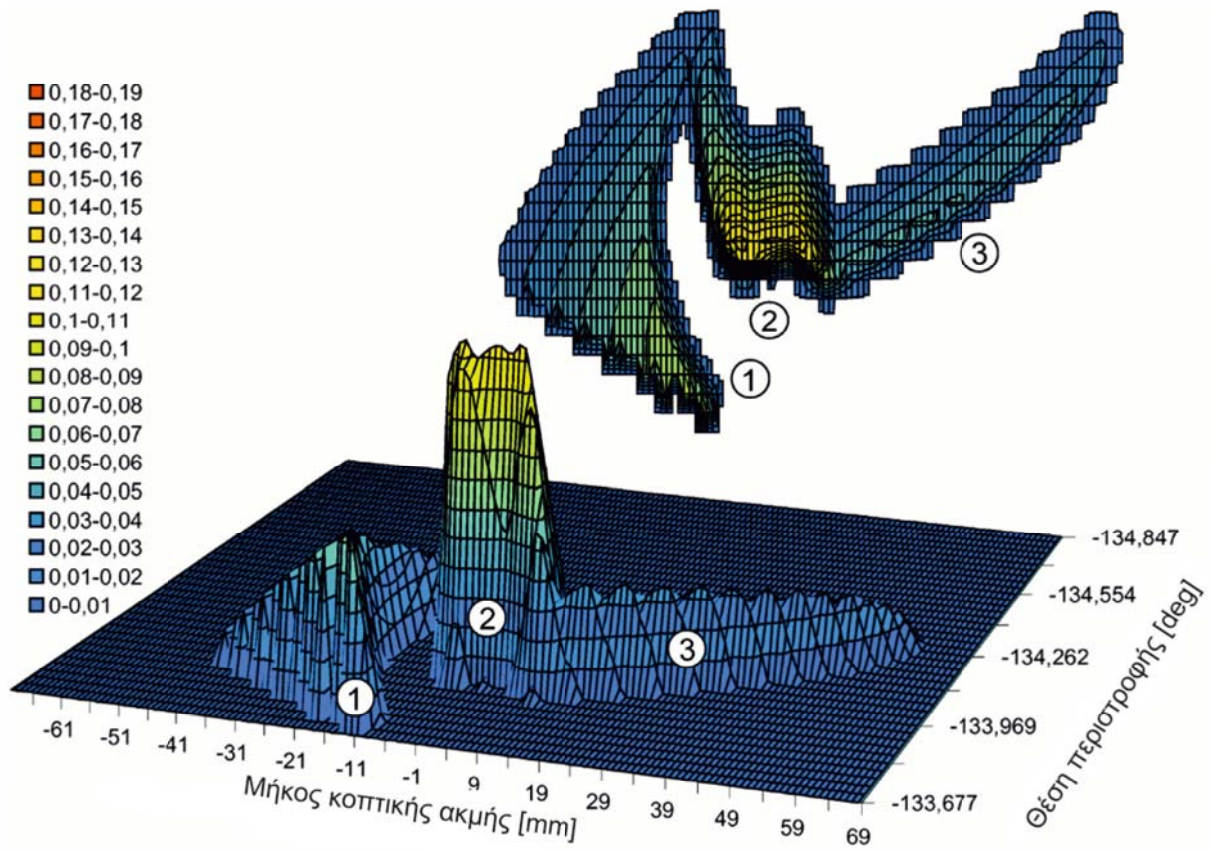
F_c κύρια δύναμη κοπής [N]
l_k μήκος αποβλίττου [mm]
h_k πάχος αποβλίττου [mm]
K_c ειδική αντίσταση κοπής [N/mm^2]

Το μοντέλο του Abood επιβεβαιώθηκε πειραματικά με μετρήσεις δυνάμεων κοπής κατά τη διάρκεια της κοπής ενός αυλακιού ενός οδοντωτού τροχού καθώς επίσης και στην κατεργασία ενός ολόκληρου οδοντωτού τροχού.

Έχοντας ως σκοπό τη μελέτη των συγκρούσεων των αποβλίττων κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης τους στο αυλάκι και την επίδραση τους στη φθορά του κοπτικού εργαλείου, ο Komori και οι συνεργάτες του [17] παρουσίασαν ένα αριθμητικό μοντέλο της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις διατομές του αποβλίττου σε επίπεδα παράλληλα με τον άξονα του οδοντωτού τροχού.

Ο κώδικας του FRS αποτέλεσε το βασικό υπολογιστικό πυρήνα για το πρόγραμμα SpartaPro, το οποίο συνεχίζει να αναπτύσσεται και να εμπλουτίζεται μέχρι και σήμερα στο Werkzeugmaschinenlabor (WZL) του Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen. Οι τελευταίες προσθήκες σε αυτό σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας, την οικονομοτεχνική μελέτη της και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε πιο κατανοητή μορφή [18]. Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η μορφή του αποβλίττου όπως αυτό υπολογίζεται από το SpartaPro.

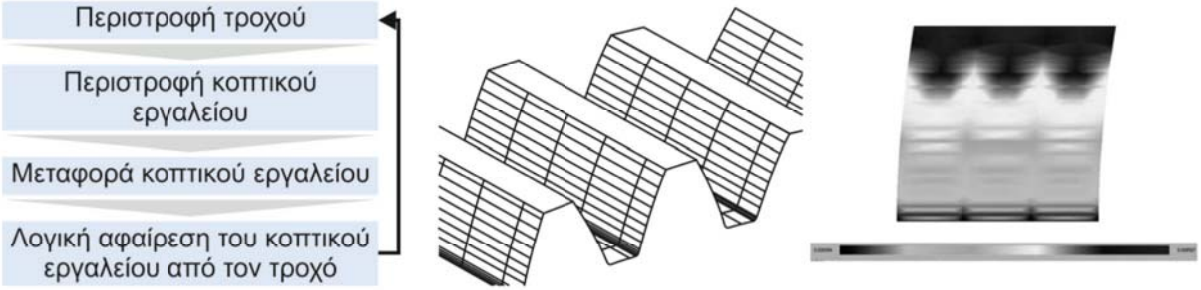
Ο Klocke και οι συνεργάτες του [19] μελέτησαν τη μορφή του αποβλίττου για δυο είδη κοπτικών εργαλείων, ένα που εκτελούσε κατεργασία και στο πόδι του δοντιού του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία και ένα που κατεργαζόταν μόνο τις παρειές του αυλακιού, υπολογίζοντας ταυτόχρονα τη φθορά και στις δυο περιπτώσεις, όπως επίσης και τη μορφή του τελικού αυλακιού.



m_n=2.5mm, a_n=20°, d_h=69.9mm, l=180mm, n_{st}=19, z_1/z_2=2/42, d_g=116.74mm, b=18.5mm, h_a=-20,095°, x=0.0483, t=5.81mm, v=220mm/min, f_a=1.8mm/wrev, h_{cu}=0.14mm, ξηρά κοπή

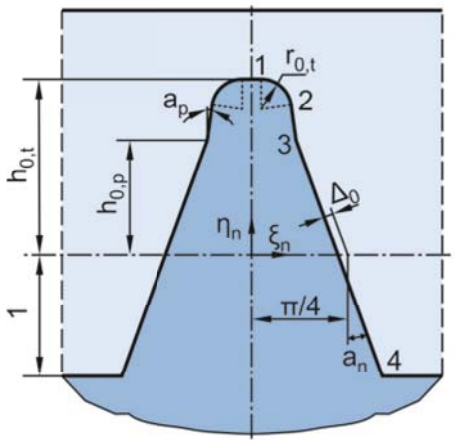
Σχήμα 2.21 Μορφή αποβλίττου όπως παρουσιάζεται απο το SpartaPro

Οι Michalski και Skoczylas [20, 21] ασχολήθηκαν με τη μοντελοποίηση της κατεργασίας με τη χρήση προγράμματος CAD. Στο μοντέλο τους αρχικά γίνεται διακριτοποίηση των κινήσεων του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού. Σε κάθε βήμα υπολογισμού το μοντέλο των Michalski και Skoczylas εκτελεί την πράξη της λογικής αφαίρεσης του κοπτικού εργαλείου από τον κατεργαζόμενο οδοντωτό τροχό και με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται η τελική επιφάνεια του οδοντωτού τροχού χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής κινηματική αλυσίδα. Το μοντέλο υπολογίζει ένα πλήθος παραμέτρων τραχύτητας, τόσο κατά μήκος της εξελιγμένης της οδόντωσης, όσο και κάθετα σε αυτήν. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώθηκαν και με σειρά πειραμάτων, τα οποία εκτελέστηκαν από τον Michalski [22] και στα οποία έγιναν σειρές προφιλομετρήσεων προκειμένου να υπολογιστούν οι παράμετροι της τραχύτητας.



Σχήμα 2.22 Διάγραμμα ροής και αποτελέσματα του μοντέλου [20,21]

Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου των Michalski και Skoczylas καθώς επίσης και η επιφάνεια που παράγει το μοντέλο σε συνδυασμό με μια ανάλυση καμπυλότητας η οποία φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος.



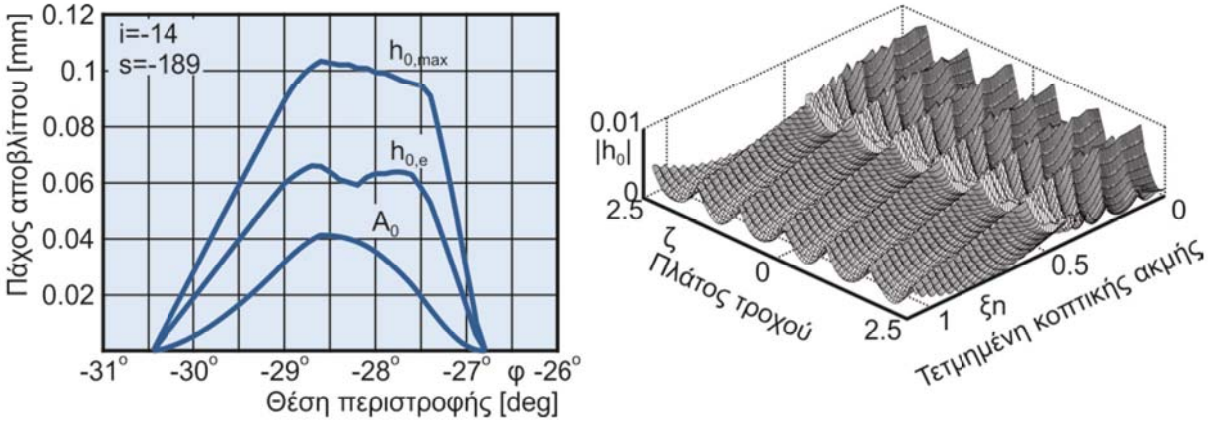
Σχήμα 2.23 Μαθηματική περιγραφή της κοπτικής ακμής

Ο Vedmar και οι συνεργάτες του [23, 24] ασχολήθηκαν με τη μαθηματική μοντελοποίηση της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων. Η μοντελοποίησή τους έγινε με τη χρήση παραμετρικών και αναλυτικών διαφορικών εξισώσεων. Η περιγραφή της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου έγινε με τη χρήση μιας σειράς παραμετρικών εξισώσεων οι οποίες δίνουν την τεταγμένη της κοπτικής ακμής συναρτήσει της τετμημένης, η οποία χρησιμοποιείται ως παράμετρος (Σχήμα 2.23). Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που ανέπτυξαν, υπολόγισαν τις διαδοχικές διεισδύσεις του κοπτικού εργαλείου στο αυλάκι, με χρήση πράξεων πινάκων και υπολόγισαν εν τέλει το πάχος καθώς επίσης και το εμβαδό του αποβλίττου.

$$\eta_n=\begin{cases} h_{0,t} & 0\le|\xi_n|\le\xi_1 \\ h_{0,t}-r_{0,t}+\sqrt{r_{0,t}^2-\left(|\xi_n|-\xi_1\right)^2} & \xi_1\le|\xi_n|\le\xi_2 \\ h_{0,t}-r_{0,t}\left(1-\sin a_p\right)-\dfrac{|\xi_n|-\xi_2}{\tan a_p} & \xi_2\le|\xi_n|\le\xi_3 \\ -1+\dfrac{\xi_4-|\xi_n|}{\tan a_n} & \xi_3\le|\xi_n|\le\xi_4 \\ -1 & \xi_4\le|\xi_n|\le\dfrac{\pi}{2} \end{cases} \qquad \begin{aligned} &\xi_1=\frac{\pi}{4}-\frac{\Delta_0}{\cos a_n}-h_{0,p}\tan a_n-r_{0,t}\cos a_p \\ &-\left(h_{0,t}-h_{0,p}-r_{0,t}\left(1-\sin a_p\right)\right)\tan a_p \\ &\xi_2=\xi_1+r_{0,t}\cos a_p \\ &\xi_3=\xi_2+\left(h_{0,t}-h_{0,p}-r_{0,t}\left(1-\sin a_p\right)\right)\tan a_p \\ &\xi_4=\xi_3+\left(1+h_{0,p}\right)\tan a_n \end{aligned} \tag{2.5}$$

Με την ιδία λογική ο Vedmar και οι συνεργάτες του υπολόγισαν και την ποιότητα της τελικής επιφάνειας του δοντιού καθώς επίσης και την τραχύτητά του. Στο αριστερό μέρος του σχήματος 2.24 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εμβαδού (A_0), του μέγιστου ($h_{0,max}$), και του μέσου πάχους του αποβλίττου ($h_{0,a}$) για την περίπτωση της θέσης κύλισης -14 ως προς τη γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Στο δεξιό μέρους του ιδίου σχήματος παρουσιάζεται η τοπομορφία της παρειάς του οδοντωτού τροχού συναρτήσει του πλάτους και της διαμέτρου του οδοντωτού τροχού.

Οι Β. Δημητρίου και Α. Αντωνιάδης [25-27] ήταν οι πρώτοι οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα εμπορικό πρόγραμμα CAD για να προσεγγίσουν την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση υπολογίζοντας την ακριβή της κινηματική αλυσίδα της. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε μπορούσε να παράξει τη στερεή γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων, καθώς επίσης και την αντίστοιχη του αυλακιού, τόσο για ευθεία, όσο και για πλάγια οδόντωση. Το μοντέλο τους κινήθηκε στην ίδια κατεύθυνση με το μοντέλο της παρούσας εργασίας αλλά η μελέτη τους ολοκληρώθηκε με τη παραγωγή της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλίττου.



Σχήμα 2.24 Αποτελέσματα του μοντέλου [23,24]

2.2.2 Μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

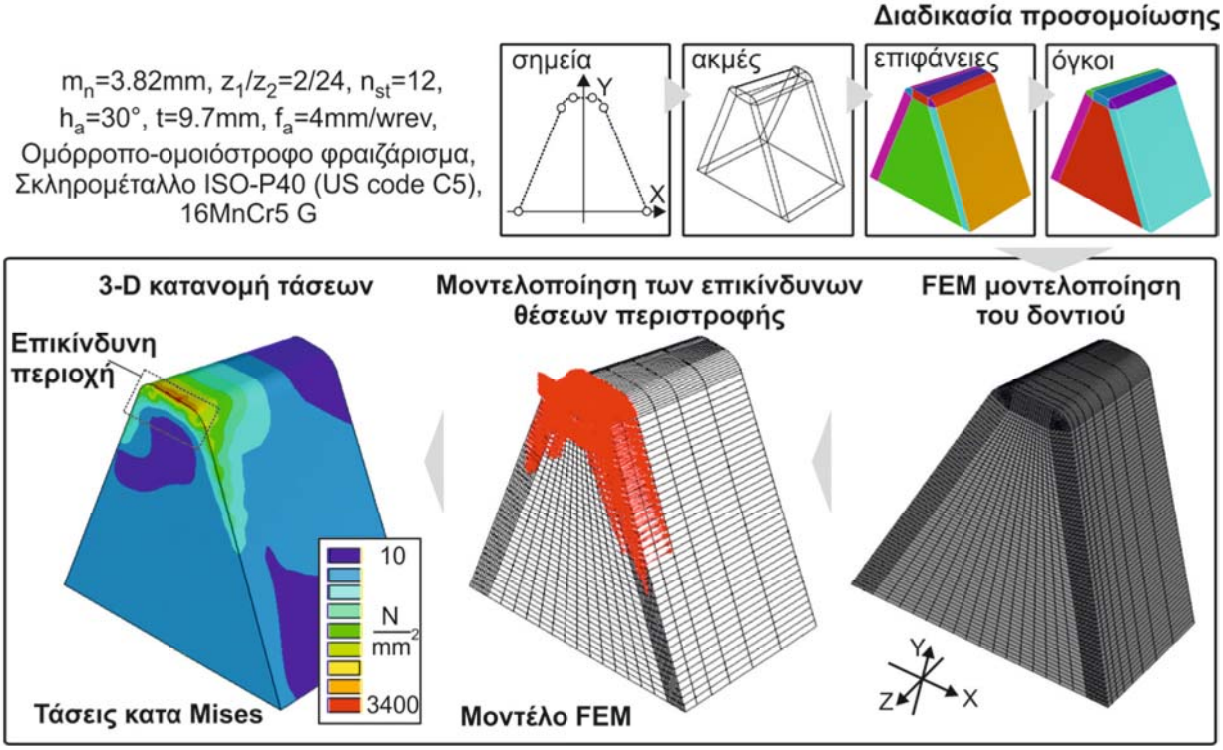
Η μελέτη της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ξεκίνησε με τον Α. Αντωνιάδη [28, 29], ο οποίος ανέπτυξε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στο κοπτικό εργαλείο. Το μοντέλο του βασίστηκε στη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων, όπως αυτή υπολογίζεται από το λογισμικό FRS. Από τη γεωμετρία των αποβλίττων υπολογίστηκαν οι δυνάμεις κοπής χρησιμοποιώντας όμως τη διατομή του αποβλίττου στην εκάστοτε στιγμιαία επιφάνεια αποβλίττου, σε αντίθεση με την προσέγγιση του FRS το οποίο χρησιμοποιούσε την τομή του αποβλίττου σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα του οδοντωτού τροχού.

Η διαδικασία υπολογισμού των τάσεων στο κοπτικό εργαλείο με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, αποτελείτο από τρεις βασικούς υπολογισμούς. Ο πρώτος υπολογισμός ήταν η διακριτοποίηση του κοπτικού δοντιού σε πεπερασμένα στοιχεία, η οποία γίνεται σε τρία διαδοχικά βήματα (Σχήμα 2.25). Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός της κατατομής του κοπτικού εργαλείου, ενώ το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων πάνω στο επίπεδο της επιφάνειας αποβλίττου και τέλος επεκτείνεται το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο.

Σχήμα 2.25 Μοντελοποίηση του κοπτικού δοντιού με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια, οι δυνάμεις κοπής μιας θέσης περιστροφής, κατανέμονται, τόσο στην κοπτική ακμή, όσο και στους εσωτερικούς κόμβους επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου. Η κατανομή αυτή γίνεται με βάση το συντελεστή συμπίεσης του υλικού κατεργασίας. Η διαδικασία υπολογισμού ολοκληρώνεται με την επίλυση της εξίσωσης δυναμικής ισορροπίας με τη μέθοδο Newmark-Wilson.

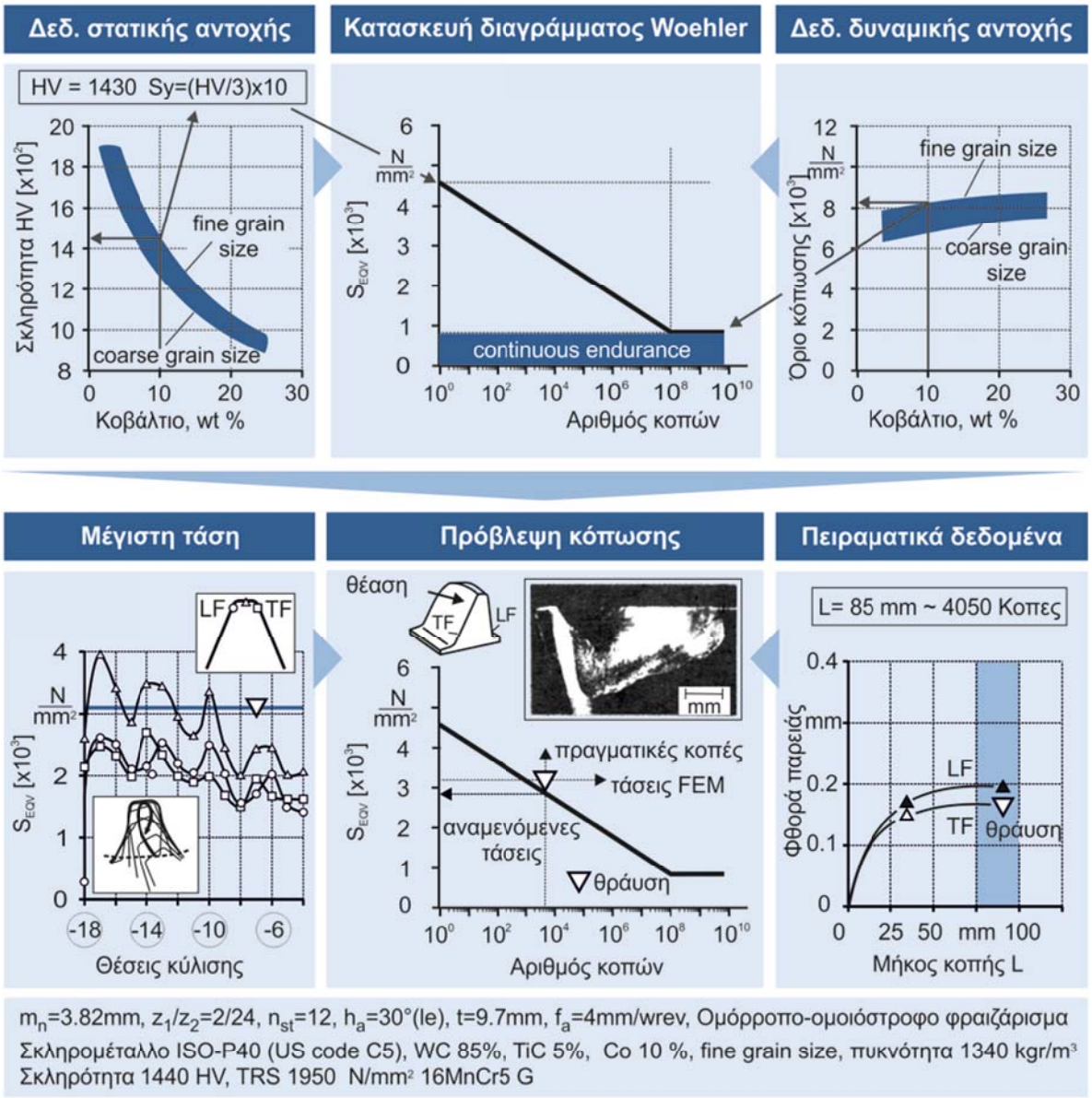
Έχοντας το παραπάνω μοντέλο ως βάση και χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Ansys®), ο Α. Αντωνιάδης και οι συνεργάτες του [30, 31] μελέτησαν τη θραύση της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου σαν αποτέλεσμα της κόπωσής του, καθώς επίσης και την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες τάσεις στην ακμή του δοντιού του κοπτικού εργαλείου. Αρχικά, περιγράφηκε η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, το οποίο μοντελοποιήθηκε με έξι διαφορετικούς όγκους, έτσι ώστε να υπάρχει έλεγχος της πυκνότητας του πλέγματος ανάλογα με την κρισιμότητα της περιοχής. Το επόμενο βήμα ήταν η εύρεση της πιο κρίσιμης θέσης περιστροφής, με βάση τη γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίττου από το λογισμικό FRS. Η θέση αυτή εντοπίζεται σε εκείνη με το μεγαλύτερο πάχος απαραμόρφωτου αποβλίττου. Στο μοντέλο του κοπτικού εργαλείου εφαρμόστηκαν οι δυνάμεις κοπής όπως αυτές υπολογίζονται από το FRS και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση του συστήματος και τον υπολογισμό των τάσεων κατά von Mises. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26 Μεθοδολογία υπολογισμού τάσεων [30,31]

Για την επιβεβαίωση του μοντέλου εκπόνησαν μια σειρά πειραμάτων κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με τη χρήση ενός δοντιού. Προκειμένου να γίνει η συσχέτιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων κατασκευάσθηκε το διάγραμμα Woehler, με χρήση των δεδομένων στατικής και δυναμικής αντοχής του υλικού του κοπτικού εργαλείου. Με βάση τις τάσεις στο κοπτικό εργαλείο υπολογίσθηκε η θεωρητική δυναμική αντοχή του κοπτικού εργαλείου με τη χρήση του διαγράμματος Woehler. Αντίστοιχα, στο

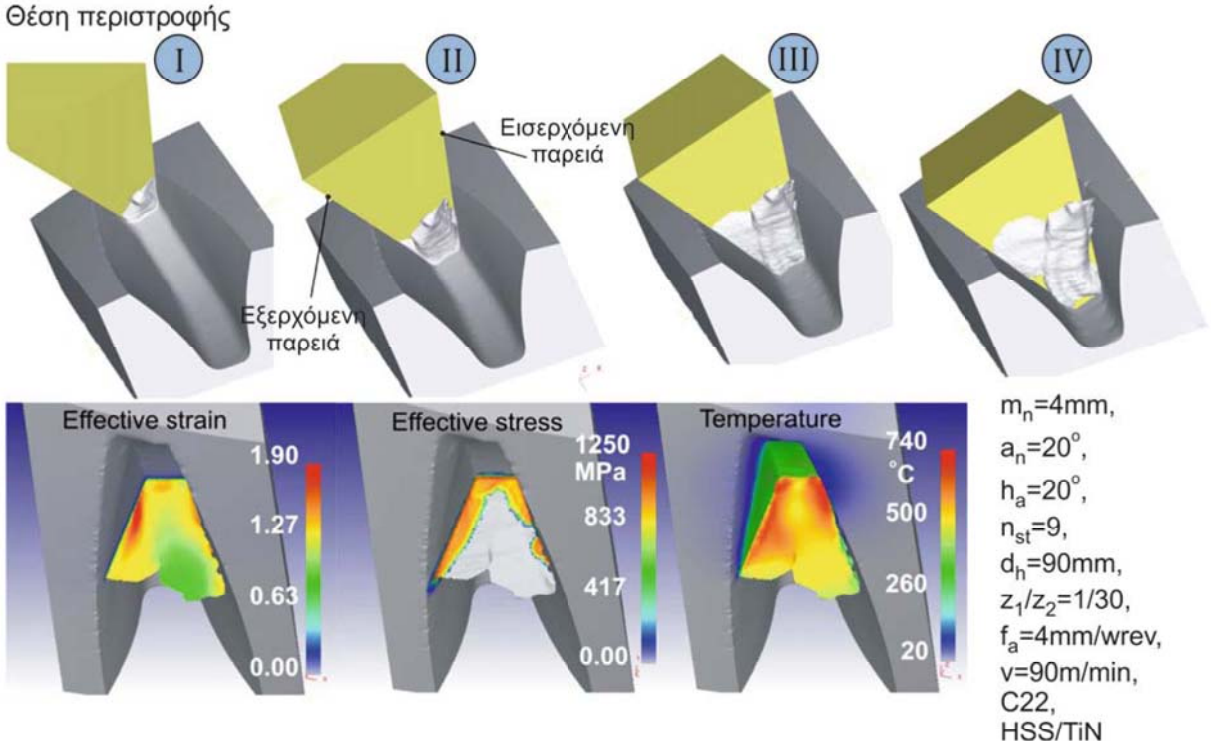
πειραματικό μέρος μετρήθηκε το μήκος που κατεργάστηκε το κοπτικό εργαλείο πριν τη θραύση του και μετατράπηκε σε αριθμό κοπών. Συνδυάζοντας τα δυο αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η αντοχή του κοπτικού εργαλείου στο μοντέλο πεπερασμένων εμφανίζεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πραγματική. Η διαδικασία υπολογισμού της αντοχής του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.27.



Σχήμα 2.27 Υπολογισμός της αντοχής του κοπτικού [30,31]

Στο πεδίο της μελέτης του θερμοκρασιακού πεδίου και των τάσεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας οδοντώσεων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, οι Ο. Φρειδερίκος και Κ. Δ. Μπουζάκης [32-34] χρησιμοποίησαν το αυλάκι το οποίο δημιουργείται από το πρόγραμμα FRS/MAT, εξέλιξη του FRS συνταγμένο σε Matlab, για να μελετήσουν τις τάσεις και τις θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται κατά την παραμόρφωση του αποβλίττου από το δόντι του κοπτικού εργαλείου. Η διαδικασία της μοντελοποίησης του αυλακιού γίνεται με την εξαγωγή από το FRS/MAT ενός νέφους σημείων το οποίο στη συνέχεια εισάγεται σε πρόγραμμα CAD και με αυτόν τον τρόπο μετατρέπεται σε στερεό αντικείμενο προκειμένου να εισαχθεί τελικά στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στο

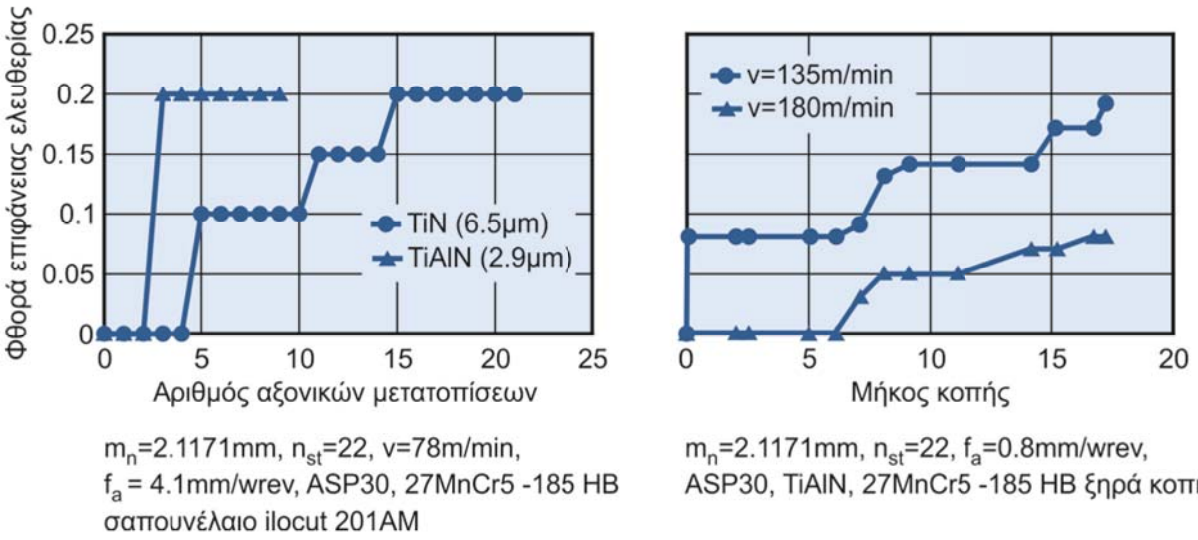
μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε ως υλικό κατεργασίας ο χάλυβας C22 (Mat. Number 1.0402), με την μοντελοποίησή του να γίνεται με τις εξισώσεις διαρροής κατά Oxley και Lei. Τα αποτελέσματα του μοντέλου του παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.28.



Σχήμα 2.28 Αποτελέσματα του μοντέλου [32-34]

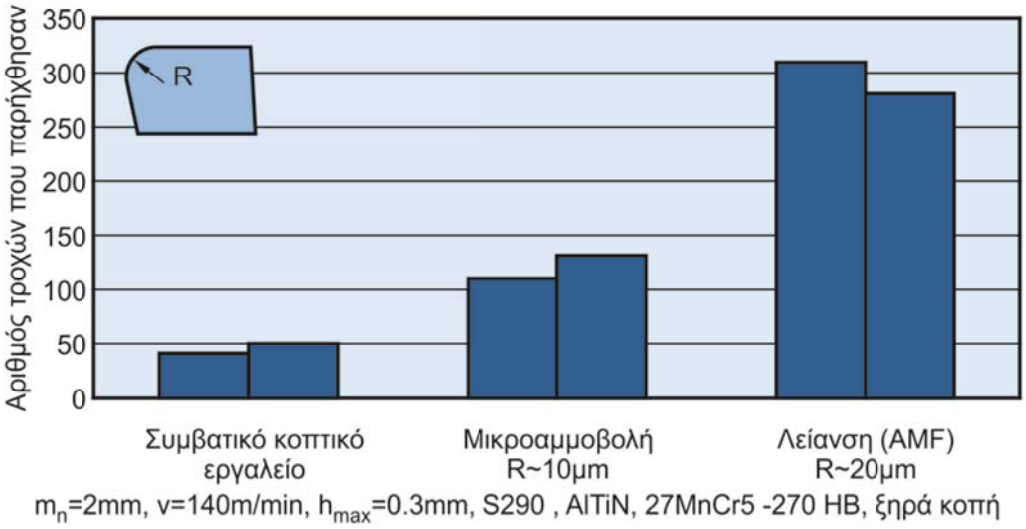
2.2.3 Φθορά στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση

Ο Rech και οι συνεργάτες του [35-37] μελέτησαν τη φθορά των εργαλείων κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με και χωρίς τη χρήση υγρού κοπής. Στην πρώτη τους εργασία εκπόνησαν πειράματα κοπής οδοντώσεων με δυο διαφορετικά υλικά υποστρώματος και πέντε διαφορετικά υλικά επικαλύψεων προκειμένου να βρεθεί ο συνδυασμός υλικών που παρέχει την καλύτερη συμπεριφορά απέναντι στη φθορά, στην κατεργασία κοπής οδοντώσεων με υψηλές ταχύτητες και χωρίς υγρό κοπής. Έτσι έγιναν τρείς σειρές πειραμάτων όπου η πρώτη αφορούσε την κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση με χαμηλή ταχύτητα κοπής και με τη χρήση υγρού κοπής. Μετρώντας τη φθορά της επιφάνειας ελευθερίας παρατήρησαν ότι ο συνδυασμός με την καλύτερη απόδοση είναι αυτός με υπόστρωμα ASP30 και επικάλυψη TiN. Η δεύτερη σειρά πειραμάτων που εκπονήθηκε ήταν η κατεργασία ενός παραλληλεπίπεδου τεμαχίου με τη χρήση κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος με κύλιση και χωρίς τη χρήση υγρού κοπής. Σκοπός αυτής της σειράς πειραμάτων ήταν η αξιολόγηση και κατηγοριοποίηση των διαφόρων συνδυασμών υποστρώματος-επικάλυψης ως προς την αντοχή τους στη φθορά της επιφάνειας ελευθερίας. Τέλος, για το συνδυασμό υπόστρωμα ASP30 και επικάλυψης (T,Al)N, ο οποίος είχε και την καλύτερη επίδοση, πραγματοποιήθηκε και τρίτη σειρά πειραμάτων, η οποία περιελάμβανε κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση χωρίς τη χρήση υγρού κοπής σε υψηλές ταχύτητες. Στο Σχήμα 2.29 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φθοράς του επιλεγμένου συνδυασμού, τόσο για κοπή με αλλά και χωρίς υγρό κοπής. Επίσης παρουσιάζεται και η επίδοση της επικάλυψης TiN, η οποία ήταν η καλύτερη στα πειράματα με χρήση υγρού κοπής.



Σχήμα 2.29 Πειραματικά αποτελέσματα μελέτης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου [35-37]

Σε επόμενη εργασία του ο Rech [35] μελέτησε την επίδραση της προετοιμασίας της κοπτικής ακμής στην αντοχή του κοπτικού εργαλείου του φραιζαρίσματος με κύλιση. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων φραιζαρίσματος οδοντώσεων με τη χρήση ενός δοντιού, για να μελετήσει την επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της κοπτικής ακμής στην αντοχή του δοντιού απέναντι στην φθορά. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων εκπόνησε πειράματα φραιζαρίσματος με κύλιση χωρίς τη χρήση εφαπτομενικής πρόωσης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φραιζαρίσματος με κύλιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.30. στο οποίο εύκολα παρατηρείται ότι η αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας αυξάνει τον αριθμό των παραγόμενων οδοντωτών τροχών. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη δοντιών τα οποία είχαν υποστεί διαφορετικές κατεργασίες προετοιμασίας της κοπτικής τους ακμής, με τη πρώτη να είναι αιχμηρή, τη δεύτερη να έχει υποστεί μικροαμμοβολή και την τρίτη να έχει υποστεί λείανση. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και με περαιτέρω πειράματα τα οποία εκπόνησε και στα οποία χρησιμοποίησε την κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση με χρήση μιας στήλης του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.30 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της ακμής του κοπτικού εργαλείου στη φθορά της επιφάνειας ελευθερίας

Ο Matsuoka και οι συνεργάτες του [38-40] εστίασαν την έρευνά τους στην επίδραση του είδους του υγρού κοπής στη φθορά του κοπτικού εργαλείου επικαλυμμένου με TiN ή (Al,Ti)N. Για την αξιολόγηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποίησαν την κατεργασία του φραιζαρίσματος κύλισης με ένα δόντι. Με αυτόν τον τρόπο μελέτησαν την επίδραση της παρουσίας και της συγκέντρωσης του θειούχου ασβεστίου (CaS) στο υγρό κοπής. Από τα πειράματά τους διαπίστωσαν ότι η παρουσία του CaS βελτιώνει την αντοχή του κοπτικού εργαλείου με επικάλυψη TiN, ενώ ελαφρώς επιδεινώνει την αντίστοιχη του κοπτικού εργαλείου με επικάλυψη (Al,Ti)N. Σε επόμενη μελέτη τους σύγκριναν την απόδοση τεσσάρων υδατοδιαλυτών υγρών κοπής σε σχέση με αυτή της ξηράς κοπής. Έτσι, παρατήρησαν ότι η παρουσία οποιουδήποτε υγρού κοπής δεν αυξάνει την αντοχή του κοπτικού εργαλείου με επικάλυψη TiN, σε σχέση με την ξηρά κοπή, ενώ αυξάνει αυτή του κοπτικού εργαλείου με επικάλυψη (Al,Ti)N. Με την ίδια πειραματική μέθοδο μελέτησαν την επίδραση της παροχής του υγρού κοπής στην φθορά του κοπτικού εργαλείου. Παρατήρησαν επίσης, ότι μια παροχή υγρού κοπής της τάξης του 1mL/h βελτιώνει την απόδοση ενός κοπτικού εργαλείου από ταχυχάλυβα, ενώ η παροχή υγρού κοπής δεν έχει σημαντική επίδραση στα επικαλυμμένα κοπτικά εργαλεία, σε σχέση με την ξηρά κοπή.

Ο Gerth και οι συνεργάτες του [41, 42] μελέτησαν τους μηχανισμούς φθοράς των επικαλυμμένων κοπτικών εργαλείων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση και παρατήρησαν ότι η προετοιμασία της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου πριν την επικάλυψη, τυχόν σφάλματα στην επικάλυψη όπως μικρορωγμές και παραμένουσες τάσεις, παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στην αντοχή της επικάλυψης και κατ' επέκταση του κοπτικού εργαλείου. Σε επόμενη μελέτη τους προσπάθησαν να αναπαράγουν τους μηχανισμούς φθοράς των κοπτικών εργαλείων κύλισης με την χρήση απλού φραιζαρίσματος.

2.3 Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής

Το πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής πραγματεύεται τη μελέτη της κατεργασίας κοπής οδοντώσεων με φραιζαρίσματος με κύλιση. Η βασική συμβολή της εργασίας στη μελέτη της κατεργασίας προκύπτει από τη χρήση ενός εμπορικού πακέτου CAD για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πακέτου προσομοίωσης της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Η καινοτομία του μοντέλου που αναπτύχθηκε πηγάζει από το γεγονός ότι το κοπτικό εργαλείο καθώς και όλες οι κινήσεις οι οποίες εμπλέκονται στην κατεργασία, μοντελοποιούνται στο σύστημα CAD το οποίο επιλέχθηκε, με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, με τη χρήση των ελάχιστων δυνατών διακριτοποιήσεων και παραδοχών. Η προσέγγιση αυτή δίνει στο μοντέλο τη δυνατότητα να υπολογίσει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια την κινηματική του κοπτικού εργαλείου και μέσα από την αλληλεπίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου με τις αντίστοιχες γεωμετρίες του κατεργαζόμενου τεμαχίου, να υπολογίσει τα 3D στερεά μοντέλα των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Τα απόβλιττα αυτά χρησιμοποιούνται για τον ακριβή υπολογισμό των δυνάμεων κοπής με τη χρήση σχέσεων που εμπλέκουν τις διαστάσεις του αποβλίττου στην πραγματική στιγμιαία επιφάνεια του αποβλίττου, ενώ τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής μετρήθηκαν μέσα στο σύστημα CAD με αυτόματο τρόπο. Η ανάκτηση των δεδομένων για τις διαστάσεις του αποβλίττου απαλείφει την απαίτηση για την ύπαρξη προσεγγιστικών σχέσεων για το πάχος του αποβλίττου συμβάλλοντας στην ακρίβεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου ελέγχθηκαν για την ορθότητά τους με δύο διαφορετικές διαδικασίες: η πρώτη περιελάμβανε τον έλεγχο της ορθότητας της αυλάκωσης της παραγόμενης οδόντωσης, σύμφωνα με τη θεωρητικά ορθή αυλάκωση καθώς και με τη

χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ ο δεύτερος έλεγχος έγινε με τη χρήση πειραματικά μετρημένων δυνάμεων κοπής.

Η διαδικασία της προσομοίωσης και του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής εκτελείται αυτόματα χωρίς την εμπλοκή του χρήστη σε ένα σύστημα CAD. Η εισαγωγή των δεδομένων καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσα από ένα περιβάλλον διεπαφής χρήστη-μοντέλου το οποίο σχεδιάστηκε με γνώμονα την κατά το δυνατόν καλύτερη και πληρέστερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιήθηκαν πέραν των αυτόματων γραφημάτων, πλαίσια παρουσίασης των τρισδιάστατων μοντέλων, τόσο των αποβλίττων όσο και των αυλακιών.

Η παραπάνω προσέγγιση με τη χρήση συστήματος CAD για την ακριβή μοντελοποίηση και προσομοίωση μιας οποιασδήποτε κατεργασίας έχει παρουσιαστεί μόνο σε κατεργασίες κοπής με απλή κινηματική, όπως το φραιζάρισμα και η διάτρηση [43-45] ενώ κανένα από τα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί στη κατεργασία οδοντώσεων δεν έχει μοντελοποιήσει με τόσο καλή ακρίβεια την κινηματική του, χωρίς τη χρήση διακριτοποιήσεων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου τα οποία περιλαμβάνουν τόσο τη μορφή του οδοντωτού τροχού, όσο και τις δυνάμεις κοπής οι οποίες υπολογίστηκαν με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, αποτελούν μια καινοτόμα πρόταση μια και κανένα από τα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί δεν είναι σε θέση να υπολογίσει ταυτόχρονα και τα δύο μεγέθη χωρίς απλοποιήσεις και παραδοχές, με την ακρίβεια του μοντέλου που προτείνεται.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η μελέτη της κατεργασίας με τη χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός αυτού του μέρους είναι η προσομοίωση της ροής του αποβλίττου μέσα στην αυλάκωση του οδοντωτού τροχού καθώς και η περαιτέρω επιβεβαίωση των υπολογισμένων με το λογισμικό HOB3D απαραμόρφωτων αποβλίττων και των αναπτυσσομένων δυνάμεων κοπής. Για την ορθότερη και ευκολότερη εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργήθηκε ένας προ-επεξεργαστής. Οι λειτουργίες οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν από αυτόν, περιλαμβάνουν τη σχεδίαση του κοπτικού εργαλείου και τη σωστή τοποθέτησή του στο χώρο, τον υπολογισμό των κέντρων περιστροφής του και την προετοιμασία του αυλακιού προς κατεργασία.

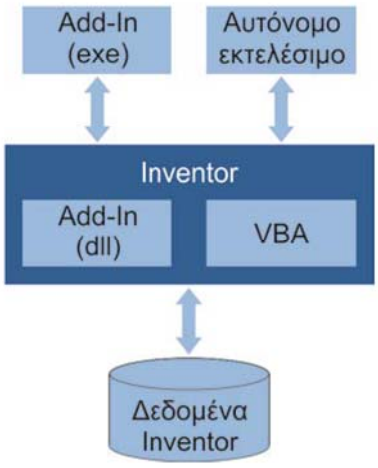
Τέλος, έγινε ικανός αριθμός προσομοιώσεων κοπής οδοντώσεων με διάφορα δεδομένα κατεργασίας ώστε να μελετηθεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής.

3 Μοντέλο Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση χρησιμοποιήθηκε ένα γενικής χρήσης πρόγραμμα CAD/CAM. Το μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε είναι γεωμετρικό, έτσι θεωρήθηκε ότι στο σύστημα κοπτικού εργαλείου-οδοντωτού τροχού δεν υπάρχουν ταλαντώσεις, ενώ το κοπτικό εργαλείο δεν αλλάζει μορφή κατά την κατεργασία λόγο της φθοράς του και δεν υπάρχουν εκκεντρότητες στους άξονες περιστροφής οδοντωτού τροχού και κοπτικού εργαλείου. Τέλος, θεωρήθηκε ότι το τεμάχιο προς κατεργασία είναι συμπαγές και ομοιογενές και δεν υπάρχει ελαστική επαναφορά του μετά την κοπή. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής έγινε με βάση το απαραμόρφωτο απόβλιττο και τις εξισώσεις των Kienzle και Victor. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν δύο πειραματικά προσδιορισμένους συντελεστές οι οποίοι και εμπεριέχουν την επίδραση στις δυνάμεις κοπής διαφόρων φαινομένων που παρατηρούνται κατά την κοπή. Έτσι, παράγοντες όπως η δυναμική συμπεριφορά του κοπτικού εργαλείου κατά την κοπή, η σύγκρουση των υποαποβλίττων και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της κοπής δεν υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του μοντέλου παρά μόνο μέσω των συντελεστών των δυνάμεων κοπής.

3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου

Η εφαρμογή η οποία επιλέχθηκε είναι το Autodesk Inventor 2011, το οποίο διαθέτει περιβάλλον API (Application Programming Interface). Ο όρος API χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργικότητα που παρέχεται από μια εφαρμογή η οποία της επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί μέσα από ένα προγραμματιστικό περιβάλλον. Μέσα από το API μπορούν να αυτοματοποιηθούν διαδικασίες και να δημιουργηθούν κώδικες οι οποίοι εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης όταν χρησιμοποιεί την εφαρμογή μέσα από το τυπικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης της. Με τη χρήση του API μπορούν, όμως, να δημιουργηθούν και πολλές άλλες διαδικασίες οι οποίες δεν είναι εύκολο να εκτελεστούν απ' ευθείας μέσα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής. Το περιβάλλον API είναι επίσης σημαντικό επειδή επιτρέπει εξωτερικές εφαρμογές να λειτουργήσουν παράλληλα με το Autodesk Inventor, όπως προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, προγράμματα δημιουργίας γραφικών, προγράμματα εφαρμογών γραφείου καθώς επίσης και άλλα προγράμματα CAD/CAM/CAE.



Σχήμα 3.1 Τρόποι αλληλεπίδρασης API - Inventor

Το περιβάλλον API μπορεί να αξιοποιηθεί είτε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic for Application (VBA) είτε με τον προγραμματισμό σε εξωτερικό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών και τη δημιουργία Add-in και αυτόνομων εκτελέσιμων εφαρμογών. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο τρόπος αλληλεπίδρασης της εφαρμογής με τα δεδομένα του Inventor. Όπως είναι προφανές, η επιλογή ανάπτυξης μιας αυτόνομης εφαρμογής επιφέρει αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, μια και οι εντολές της εφαρμογής μεταφέρονται πρώτα στον πυρήνα του Inventor και στη συνέχεια μετατρέπονται σε δεδομένα του. Στον αντίποδα, η επιλογή της ανάπτυξης ενός Add-In σαν dll ή η επιλογή της δημιουργίας ενός προγράμματος σε VBA, οδηγεί στην

ταχύτερη εκτέλεση του κώδικα του προγράμματος, μια και επικοινωνεί άμεσα με τον πυρήνα του Inventor.

Για την παρούσα μελέτη επελέγη η ανάπτυξη του λογισμικού στην πυρήνα του Inventor μια και η προσομοίωση της κατεργασίας είναι απαιτητική όσον αφορά τον υπολογιστικό φόρτο και η επιλογή της δημιουργίας ενός αυτόνομου εκτελέσιμου θα αύξανε εκθετικά το χρόνο εκτέλεσης του κώδικα. Αναφορικά με τους δύο τρόπους αξιοποίησης του API μέσα από τον πυρήνα του Inventor τα πλεονεκτήματα της κάθε εναλλακτικής επιλογής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.

Ο προγραμματισμός με τη δημιουργία Add-in ήταν η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, με την ανάπτυξη του κώδικα να γίνεται στο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών Microsoft Visual Studio .Net 2010 Ultimate. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμονα την ευκολότερη χρήση του προγράμματος μια και με αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται η γνώση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της API από το χρήστη.

Add-In	VBA
Αυτόματη φόρτωση της εφαρμογής με την εκκίνηση του Inventor	Διάθεση των εργαλείων μαζί με το Inventor, δεν απαιτείται αγορά επιπλέον λογισμικού
Δυνατότητα χρήσης οποιασδήποτε γλώσσας προγραμματισμού	Ευκολότερη κατανόηση των αντικειμένων του Inventor
Δυνατότητα πλήρους ενσωμάτωσης της εφαρμογής στο περιβάλλον του Inventor	Ευκολότερη αποσφαλμάτωση του κώδικα
Αποδοτικότερη διαχείριση του κώδικα	Ευκολότερη σύνταξη του κώδικα
Εύκολη διανομή της εφαρμογής	

Σχήμα 3.2 Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της API με τη χρήση Add-in και VBA

Σχήμα 3.3 Διάγραμμα ροής του μοντέλου προσομοίωσης

3.2 Δομή του μοντέλου προσομοίωσης

Η προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση έγινε με τη χρήση εντολών του Inventor αυτόματα μέσα στο περιβάλλον του. Τα βήματα για την προσομοίωση της κατεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.

Λόγω της συμμετρίας του παραγόμενου οδοντωτού τροχού, και του γεγονότος ότι ένα δόντι του κοπτικού εργαλείου κατεργάζεται κάθε αυλάκι της οδόντωσης με τον ίδιο πάντα τρόπο, το μοντέλο προσομοίωσης αρκεί να εκτελέσει την προσομοίωση για την κατεργασία ενός αυλακιού. Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω βήματα:

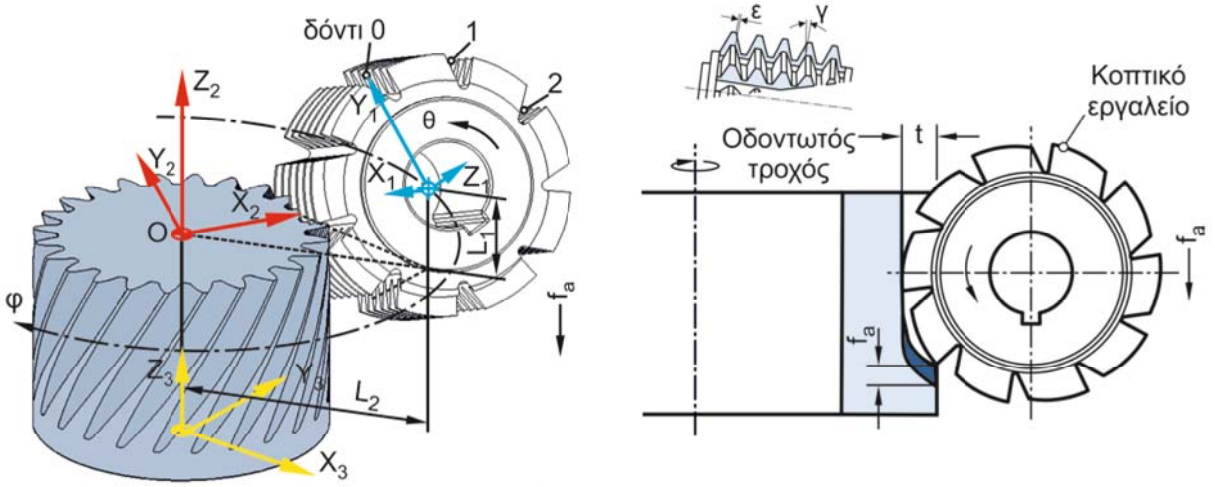
- Εισαγωγή των απαραίτητων, για την προσομοίωση, δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χωρισθούν σε τρείς κατηγορίες, τα δεδομένα που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου, τα δεδομένα τα οποία αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου οδοντωτού τροχού και τέλος τα δεδομένα της κατεργασίας. Κατά την εισαγωγή τους τα δεδομένα ελέγχονται για την ορθότητα τους, ενώ παράλληλα υπολογίζονται και μεγέθη τα οποία σχετίζονται με την οδόντωση και δίνονται ως σχέσεις των δεδομένων εισόδου.
- Δημιουργία του ακατέργαστου οδοντωτού τροχού, ο οποίος έχει τη μορφή ενός στερεού κυλίνδρου.
- Σχεδίαση της κατατομής του κοπτικού εργαλείου πάνω στη στιγμιαία επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου.
- Δημιουργία της τρισδιάστατης πορείας του κοπτικού εργαλείου για κάθε ενεργό δόντι. Η πορεία αυτή παράγεται αυτόματα με τη χρήση της κατατομής του κοπτικού εργαλείου. Η τροχιά αυτή περιέχει όλες τις εμπλεκόμενες κινήσεις στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση.
- Συναρμολόγηση της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία οδοντωτού τροχού.
- Δημιουργία της στερεάς γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού και του απαραμόρφωτου αποβλίττου.
- Επανάληψη της διαδικασίας για όλα τα ενεργά δόντια.
- Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής με βάση τη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων και τις σχέσεις Kienzle και Victor.

3.3 Μοντελοποίηση της κινηματικής της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση

Η γεωμετρία ενός οδοντωτού τροχού μπορεί να περιγραφεί πλήρως από μία σειρά παραμέτρων οι οποίες περιλαμβάνουν: το μέτρο της οδόντωσης (m_n), τον αριθμό των δοντιών του οδοντωτού τροχού (z_2), την εξωτερική διάμετρό του (d_g), τη γωνία ελίκωσής του (h_a), το πλάτος του και τη γωνία πίεσης (a_n). Για να ορισθεί πλήρως η κινηματική αλυσίδα της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση πρέπει να ορισθούν οι τιμές και σε μια σειρά άλλων παραμέτρων που αφορούν τόσο το κοπτικό εργαλείο όσο και την κατεργασία αυτή κάθε αυτή. Οι παράμετροι αυτοί είναι η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου (d_h), ο αριθμός των στηλών του (n_{st}), ο αριθμός των αρχών του (z_1), το βάθος κοπής (t), η αξονική πρόωση (f_a) και η ταχύτητα κοπής (v). Τέλος, υπάρχει και μια σειρά παραμέτρων οι οποίες εκφράζονται ως σχέση των παραπάνω δεδομένων και μπορούν να υπολογισθούν, όπως η γωνία ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου και το αξονικό του βήμα.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται τρία συστήματα συντεταγμένων, κάθε ένα από τα οποία, είτε κινείται μαζί με την κοπτική ακμή, είτε παραμένει σταθερό. Τα τρία αυτά συστήματα συντεταγμένων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4. Το πρώτο σύστημα συντεταγμένων είναι αυτό του δοντιού, στο οποίο ο άξονας X_1 είναι παράλληλος με τον άξονα του κοπτικού εργαλείου, ο Y_1 δείχνει προς το εκάστοτε εξεταζόμενο δόντι και μαζί με τον άξονα X_1 ορίζουν την επιφάνεια αποβλίττου και τέλος ο άξονας Z_1 ορίζεται ως κάθετος στους προηγούμενους δύο. Στα συστήματα συντεταγμένων 2 και 3 ο άξονας $Z_{2,3}$ ταυτίζεται με τον άξονα του οδοντωτού τροχού. Στο σύστημα 2 ο άξονας X_2 δείχνει πάντα το μέσο του υπό κατεργασία αυλακιού σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης ενώ στο τρίτο σύστημα συντεταγμένων ο X_3 παραμένει σταθερός στη θέση που είχε ο άξονας X_2 τη στιγμή που άρχισε η προσομοίωση.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαδικασία της προσομοίωσης γίνεται για την κατεργασία ενός αυλακιού του οδοντωτού τροχού, λόγω της συμμετρίας του οδοντωτού τροχού ως προς τον άξονά του. Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.8 για τη δημιουργία ενός τελικού αυλακιού αυτό πρέπει να υποστεί κατεργασία από ένα αριθμό δοντιών του κοπτικού εργαλείου, κάθε ένα από τα οποία κατεργάζεται με το δικό του, μοναδικό τρόπο το αυλάκι. Τα περάσματα αυτά ονομάζονται θέσεις κύλισης, ενώ η αρίθμησή τους ορίζεται με τη σειρά με την οποία περνούν μέσα από το αυλάκι. Έτσι εάν θεωρηθεί ότι το δόντι 0 είναι το δόντι το οποίο περνά από το μέσον του αυλακιού, το προηγούμενο δόντι του, κατά μήκος της ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου θα είναι το δόντι 1, ενώ το επόμενο το δόντι -1 μια και αυτό κατεργάζεται το αυλάκι πριν από το δόντι 0.



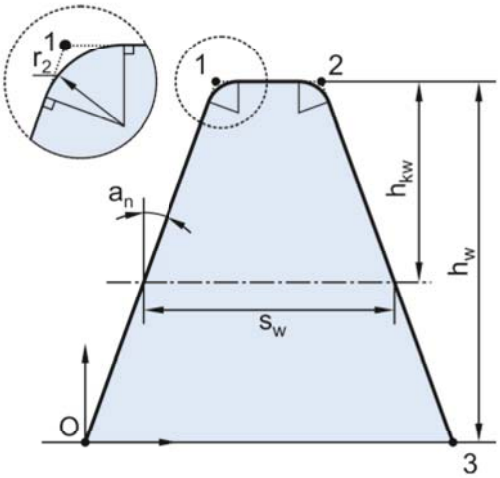
φ : Περιστροφή του οδοντωτού τροχού
θ : Περιστροφή του κοπτικού εργαλείου
L_1 : Κατακόρυφη απόσταση κοπτικού εργαλείου-τροχού
L_2 : Οριζόντια απόσταση κοπτικού εργαλείου-τροχού

Σχήμα 3.4 Κινηματική της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση

Για τη μοντελοποίηση της κινηματικής της κατεργασίας, όλες οι κινήσεις που εμπλέκονται στην κατεργασία -μια μεταφορική και δυο περιστροφικές- μεταφέρθηκαν στο κοπτικό εργαλείο. Με αυτόν το τρόπο δε χρειάζεται να γίνει διακριτοποίηση της κίνησης του κοπτικού εργαλείου ή του οδοντωτού τροχού, μια και όλες οι κινήσεις της κατεργασίας εμπεριέχονται σε μια ενιαία και συνεχή επιφάνεια στο χώρο. Η κατασκευή της επιφάνειας αυτής περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5.

Σχήμα 3.5 Διαδικασία υπολογισμού της πορείας του κοπτικού εργαλείου

Για τον υπολογισμό της πορείας του κοπτικού εργαλείου και τη σχεδίαση της επιφάνειας που την περικλείει, απαραίτητος είναι ο σχεδιασμός της κατατομής αναφοράς σύμφωνα με το DIN-3972. Λόγω του ότι η κοπτική ακμή μοντελοποιείται σε ένα περιβάλλον CAD δεν απαιτείται καμία διακριτοποίηση στην κοπτική ακμή. Η κοπτική ακμή αποτελείται από ένα σύνολο τριών ευθυγράμμων τμημάτων και δύο τόξων κύκλου, τα οποία είναι εφαπτομενικά συνδεδεμένα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Και τα πέντε στοιχεία της κοπτικής ακμής βρίσκονται πάνω σε ένα επίπεδο, αυτό της επιφάνειας αποβλίττου.



Σημείο 1

$x_1=h_w \tan a_n$ (3.1)

$y_1=h_w$ (3.2)

Σημείο 2

$x_2=x_1+S_w-2h_{kw} \tan a_n$ (3.3)

$y_2=h_w$ (3.4)

Σημείο 3

$x_3=x_2+h_w \tan a_n$ (3.5)

$y_3=0$ (3.6)

Σχήμα 3.6 Υπολογισμός των χαρακτηριστικών σημείων για τη σχεδίαση της κατατομής αναφοράς

Η σχεδίαση της κοπτικής ακμής, σύμφωνα με τις δυνατότητες του Inventor, γίνεται είτε με την αντιγραφή της κατατομής από ένα αρχείο CAD, είτε με τη δημιουργία ενός κώδικα ο οποίος θα σχεδιάζει αυτόματα την κατατομή, με κάθε μια από αυτές να έχει τα δικά της πλεονεκτήματα. Επιλέχθηκε η δημιουργία ενός κώδικα ο οποίος θα σχεδιάζει την κοπτική κατατομή και αυτό γιατί η σχεδίαση ενός συνόλου ακμών είναι πολύ πιο γρήγορη ως διαδικασία από αυτήν της αντιγραφής και επικόλλησης από ένα δεύτερο αρχείο, ενώ ταυτόχρονα προφυλάσσει το μοντέλο από την εισαγωγή λανθασμένης κατατομής από το χρήστη.

Μέγεθος	Δεδομένα	Σχέση
h_w	m_n	$h_w \geq 2.25\ m_n$
s_w	m_n	$s_w = 0.5\ \pi\ m_n$
h_{kw}	m_n	$h_{kw} = 1{,}25\ m_n$
r_2	m_n	$r_2 = 0.2\ m_n$

Σχήμα 3.7 Βασικές σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της κατατομής κατά DIN-3972

Για να ορισθεί πλήρως η κατατομή του κοπτικού εργαλείου, πρέπει να εισαχθεί στον κώδικα σχεδιασμού της κατατομής το μέτρο της οδόντωσης. Από αυτό θα υπολογιστούν όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοντιού, όπως το ύψος του δοντιού (h_w), το πάχος του δοντιού στον αρχικό κύκλο (s_w), η ακτίνα καμπυλότητας στην κοπτική ακμή (r_2) καθώς και το ύψος του αρχικού κύκλου από τον κύκλο κεφαλής (h_{kw}). Οι βασικές σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη της κατατομής, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7.

Για το σχεδιασμό της κοπτικής κατατομής απαιτείται ο υπολογισμός τριών σημείων, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Η διαδικασία σχεδιασμού της κοπτικής κατατομής ξεκινά με τον υπολογισμό των συντεταγμένων αυτών των τριών σημείων, λαμβάνοντας ως βάση το σημείο Ο. Οι σχέσεις, με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων, παρουσιάζονται στο δεξιό μέρος του σχήματος 3.6. Το επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός των ευθυγράμμων τμημάτων τα οποία ενώνουν τα τρία σημεία. Τέλος, σχεδιάζονται τα δύο καμπύλα τμήματα του κοπτικού εργαλείου, τα οποία έχουν ακτίνα r_2 και είναι εφαπτόμενα στα δύο ευθύγραμμα τμήματα με τα οποία τέμνονται.

Στη συνέχεια και για κάθε ενεργό δόντι, πρέπει να δημιουργηθεί η επιφάνεια που διαγράφει η κοπτική ακμή κατά την κατεργασία. Λόγω της πολυπλοκότητας της κίνησης επιλέχθηκε να γίνει διακριτοποίησή της με χρήση κατάλληλου γωνιακού βήματος (dθ) στην κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Με βάση το βήμα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου υπολογίζεται και το αντίστοιχο βήμα περιστροφής του οδοντωτού τροχού (dφ), καθώς επίσης και η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως αποτέλεσμα της πρόωσης (df_a). Οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν τις δύο αυτές ιδιότητες παρουσιάζονται στις σχέσεις (3.7-3.8):

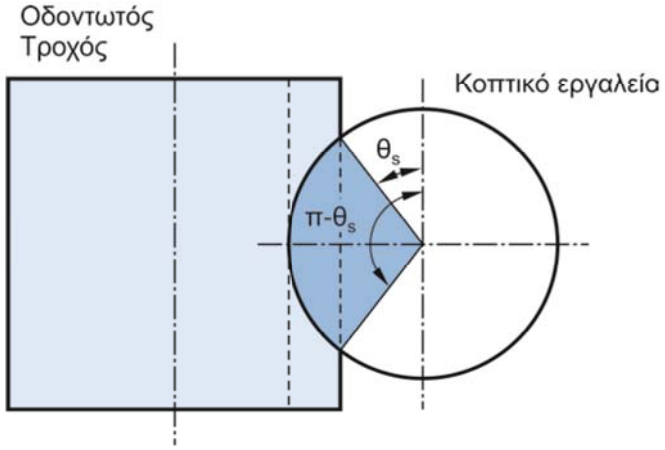
$$d\varphi = d\theta / z_2 \tag{3.7}$$

$$df_a = f_a \cdot d\theta / (z_2 \cdot 2\pi) \tag{3.8}$$

όπου:

- $d\varphi$: το γωνιακό βήμα του οδοντωτού τροχού [Rad]
- $d\theta$: το γωνιακό βήμα του κοπτικού εργαλείου [Rad]
- z_2: ο αριθμός των δοντιών του οδοντωτού τροχού
- f_a: αξονική πρόωση [mm/wrev]
- df_a: βήμα αξονικής πρόωσης [mm]

Για κάθε ενεργό δόντι ορίζεται μια παράμετρος θ (σχήμα 3.4) η οποία καθορίζει τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας ελευθερίας του κοπτικού δοντιού και του κατακόρυφου επιπέδου. Η παράμετρος αυτή στην πραγματική κατεργασία θα έπαιρνε τιμές στο εύρος [0, 2π], στην περίπτωση όμως της προσομοίωσης μπορεί να μειωθεί σε [θ_s, π-θ_s] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Υπολογισμός εύρους παραμέτρου θ

Η τροχιά του κοπτικού εργαλείου αναλύεται στις επιμέρους τρεις κινήσεις που την αποτελούν. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η μετακίνηση του κέντρου του κοπτικού εργαλείου στον κατακόρυφο άξονα ως αποτέλεσμα της αξονικής πρόωσης, η περιστροφή του γύρω από τον οδοντωτό τροχό και η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονα του. Οι πρώτες δύο κινήσεις περιγράφουν μια έλικα γύρω από τον οδοντωτό τροχό, η οποία έχει διάμετρο ίση με το άθροισμα των ακτινών κοπτικού εργαλείου και οδοντωτού τροχού μειωμένη κατά το βάθος κοπής, ενώ έχει αξονικό βήμα όσο η πρόωση της κατεργασίας. Η παραμετρική μορφή αυτής της κίνησης παρουσιάζεται στις σχέσεις (3.9-3.11).

$$x=(0.5\cdot(d_g+d_h)-t)\cdot\cos(\varphi) \tag{3.9}$$

$$y=(0.5\cdot(d_g+d_h)-t)\cdot\sin(\varphi) \tag{3.10}$$

$$z=f_a\cdot d\varphi/2\pi \tag{3.11}$$

όπου:

d_g: διάμετρος του οδοντωτού τροχού [mm]

d_h: διάμετρος του κοπτικού εργαλείου[mm]

t: βάθος κοπής [mm]

φ: παράμετρος περιστροφής του οδοντωτού τροχού [Rad]

f_a: αξονική πρόωση [mm/wrev]

dφ: το γωνιακό βήμα του οδοντωτού τροχού [Rad]

Η γωνία φ εκφράζεται ως μια σχέση που περιλαμβάνει την παράμετρο θ και τρεις συντελεστές οι οποίοι αυξάνουν ή μειώνουν τη γωνία φ για την ορθή εκτέλεση της προσομοίωσης. Οι συντελεστές αυτοί είναι:

- Συντελεστής δοντιού S_t. Θεωρώντας το δόντι 0 ως δόντι αναφοράς προκύπτει ότι τα δόντια με αρνητικό πρόσημο θα προπορεύονται στην κατεργασία, ενώ τα δόντια με θετικό πρόσημο θα ακολουθούν την κατεργασία του αυλακιού. Ο συντελεστής δοντιού μειώνει ή αυξάνει την τιμή της παραμέτρου φ, έτσι ώστε να κατεργάζονται τα δόντια το αυλάκι με την ορθή σειρά.

$$S_t = \frac{2\pi}{n_{st}} \cdot \frac{d\varphi}{d\theta} \cdot Tooth \qquad (3.12)$$

όπου:

$d\varphi$: το γωνιακό βήμα του οδοντωτού τροχού [Rad]
$d\theta$: το γωνιακό βήμα του κοπτικού εργαλείου [Rad]
n_{st}: ο αριθμός των στηλών του κοπτικού εργαλείου
Tooth: ο αριθμός του δοντιού που εξετάζεται

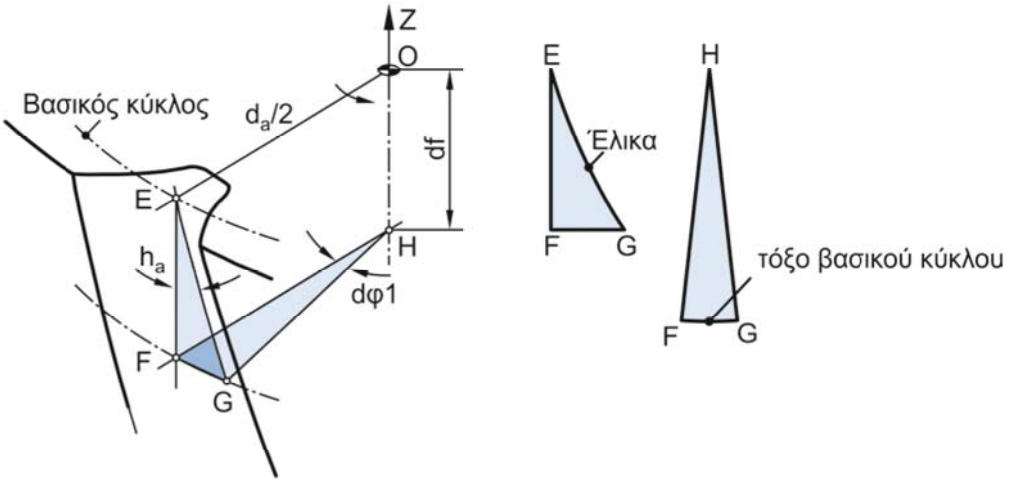
- Συντελεστής μέσου. Για να μπορεί ο άξονας X_2 του συστήματος συντεταγμένων να περνά από το μέσο του οδοντωτού τροχού, θα πρέπει να εισαχθεί μια περαιτέρω διόρθωση, η οποία μειώνει την παράμετρο θ ώστε να επιτευχθεί αυτός ο στόχος.

- Συντελεστής ελικοειδούς οδόντωσης $d\varphi 1$. Στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης πρέπει να εισαχθεί μια επιπλέον διόρθωση στην παράμετρο φ, η οποία επιταχύνει ή επιβραδύνει τη μεταβολή της παραμέτρου προκειμένου να προσομοιωθεί η κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος της έλικας του οδοντωτού τροχού. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή της ελικοειδούς οδόντωσης. Γνωρίζοντας το ποσό της μετακίνησης κατά μήκος του άξονα του οδοντωτού τροχού και με τη βοήθεια της γωνίας ελίκωσης, υπολογίζεται από το τρίγωνο EFG το μήκος του τόξου στο βασικό κύκλο του οδοντωτού τροχού, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται στη μεταβολή της γωνίας θ. Ο υπολογισμός του συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης 3.13

$$d_{\varphi 1} = 2 \cdot atan \frac{df \cdot \sin(h_a)}{m_n \cdot z_2} \qquad (3.13)$$

όπου:

df: αξονική απόσταση [mm]
h_a: γωνία ελίκωσης του οδοντωτού τροχού [Rad]
m_n: μέτρο οδόντωσης του οδοντωτού τροχού
z_2: ο αριθμός των δοντιών του οδοντωτού τροχού

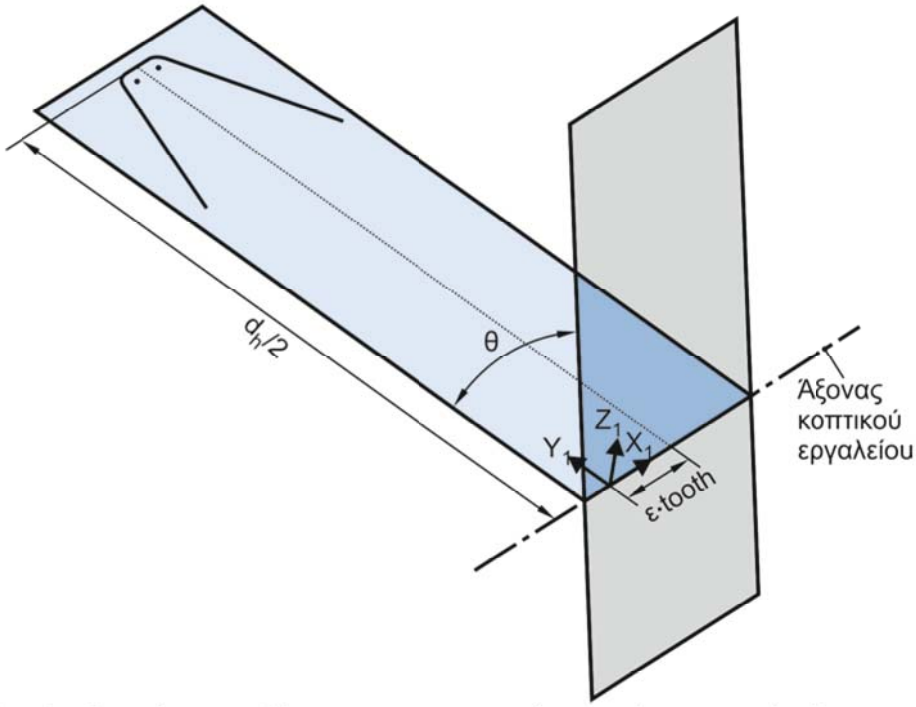


Σχήμα 3.9 Τρόπος υπολογισμού του συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης

Μετά την εύρεση του ορθού κέντρου του κοπτικού εργαλείου, για κάθε θέση του υπολογίζεται ο άξονας του κοπτικού εργαλείου σε εκείνη τη θέση, ο άξονας αυτός ορίζει τον άξονα X_1 και ορίζεται με βάση τη γωνία του άξονα από το οριζόντιο επίπεδο. Από τον άξονα του κοπτικού εργαλείου σε εκείνο το βήμα και τον άξονα που περνά από το κέντρο του κοπτικού εργαλείου και είναι παράλληλος στον άξονα $Z_{2,3}$ μπορεί να ορισθεί το κάθετο επίπεδο το οποίο περνά από τον άξονα του κοπτικού εργαλείου, με βάση το οποίο και με τη χρήση της παραμέτρου θ υπολογίζεται η επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου σε εκείνο το βήμα. Σε εκείνη την επιφάνεια σχεδιάζεται η κατατομή του κοπτικού εργαλείου λαμβάνοντας υπόψη το ότι η απόσταση της κεφαλής του κοπτικού εργαλείου από τον άξονα του πρέπει να είναι ίση με την ακτίνα του.

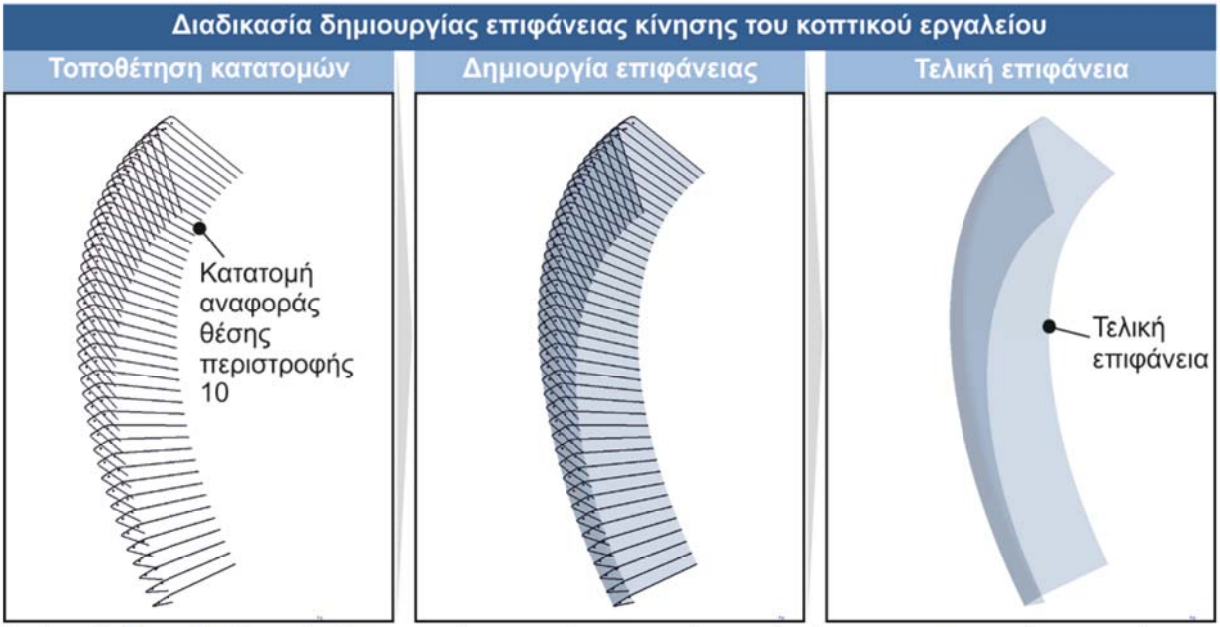
Για να δημιουργηθεί η τελική επιφάνεια που καλύπτει το δόντι και για να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στη δημιουργία της, εισάγεται σε κάθε επίπεδο της επιφάνειας αποβλίττου η κατατομή της κοπτικής ακμής, όπως αυτή υπολογίστηκε παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι, όχι μόνο η τροχιά θα περνά από τα σημεία τα οποία προβλέπεται να περάσει, αλλά θα περνά και με τη σωστή τοποθέτηση.

Από τη στιγμή που έχει υπολογισθεί το επίπεδο της επιφάνειας ελευθερίας μπορεί να σχεδιαστεί σε αυτήν η κατατομή της κοπτικής ακμής. Με βάση το γεγονός ότι το δόντι 0 έχει θεωρηθεί ότι θα είναι το δόντι το οποίο θα περνά από το μέσο του αυλακιού όταν οι άξονες X_2 και Y_1 είναι παράλληλοι και λόγω του ότι η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου πρέπει να είναι ίση με την απόσταση της κεφαλής της κατατομής από τον άξονα του κοπτικού εργαλείου, μπορεί να υπολογιστεί η σωστή τοποθέτηση της κατατομής πάνω σε αυτήν την επιφάνεια. Η λογική με την οποία γίνεται αυτή η τοποθέτηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Διαδικασία τοποθέτησης της κοπτικής ακμής στο επίπεδο της επιφάνειας αποβλίττου

Η διαδικασία τοποθέτησης της κοπτικής κατατομής επαναλαμβάνεται για όλα τα επίπεδα που υπολογίστηκαν και βρίσκονται μέσα στο εύρος [θ_s, π-θ_s], όπως παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.11 Διαδικασία δημιουργίας επιφάνειας από το σύνολο των κατατομών στο χώρο

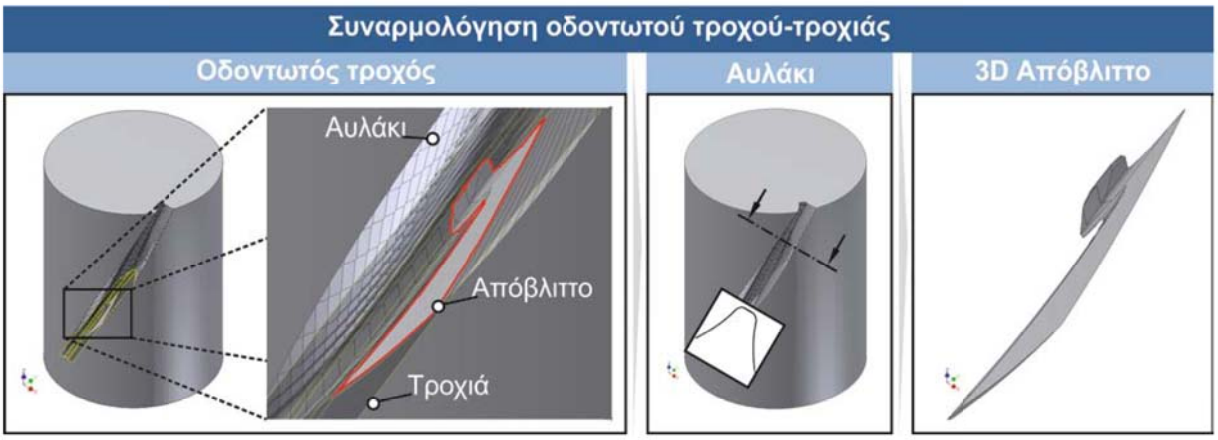
Με αυτήν τη διαδικασία προκύπτει ένα σύνολο κατατομών τοποθετημένων στο χώρο, κάθε μια από τις οποίες ορίζει μια θέση περιστροφής μιας θέσης κύλισης. Χρησιμοποιώντας αυτές τις κατατομές κατασκευάζεται μια συνεχής επιφάνεια, η οποία περιγράφει την κίνηση ενός δοντιού στη συγκεκριμένη θέση κύλισης. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ορθή επιλογή του βήματος με το οποίο αυξάνεται η γωνία θ, είναι κρίσιμος παράγοντας για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

3.4 Διαδικασία παραγωγής απαραμόρφωτων αποβλίττων

Η προσομοίωση συνεχίζεται με τη δημιουργία των απαραμόρφωτων αποβλίττων καθώς και όλων των ενδιάμεσων αυλακώσεων της παραγόμενης οδόντωσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία βήματα τα οποία επαναλαμβάνονται για όλα τα δόντια τα οποία συμμετέχουν στην κοπή:

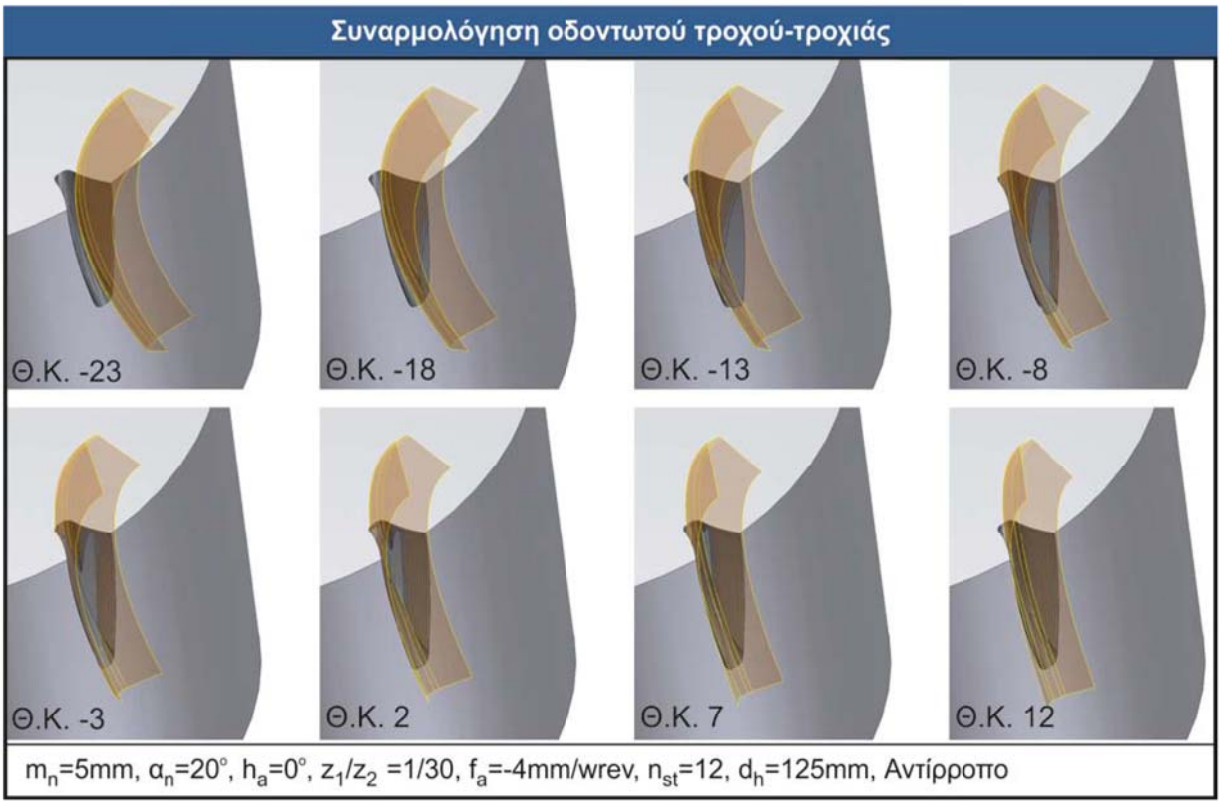
- η συναρμολόγηση της τροχιάς με τον οδοντωτό τροχό που παράχθηκε από το προηγούμενο βήμα.
- η δημιουργία της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλίττου.
- η δημιουργία της γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού μετά από αυτό το βήμα.

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Διαδικασία παραγωγής απαραμόρφωτων αποβλίττων

Για τη συναρμολόγηση των δυο τεμαχίων, του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία και της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, απαιτείται η σωστή σχετική τοποθέτηση τους. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία περιορίζεται στην ταύτιση των δύο συστημάτων συντεταγμένων των δύο επιμέρους αντικειμένων, μιας και η τοποθέτηση της τροχιάς έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια παραγωγής της. Μετά τη δημιουργία της συναρμολόγησης, η επιφάνεια που περιγράφει την κίνηση του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιείται για να χωρίσει τον όγκο του οδοντωτού τροχού σε δύο μέρη, τη γεωμετρία του οδοντωτού τροχού μετά από αυτή τη θέση κύλισης και τη γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Κάθε μία από τις επιφάνειες των ενεργών δοντιών κατεργάζεται με διαφορετικό τρόπο το αυλάκι παράγοντας μια μοναδική γεωμετρία απαραμόρφωτου αποβλίττου και συμβάλλοντας στη δημιουργία του τελικού αυλακιού. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο προχωρά η διαδικασία της προσομοίωσης. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οκτώ από τις θέσεις κύλισης οι οποίες απαιτούνται για την πλήρη κατεργασία ενός αυλακιού του οδοντωτού τροχού. Σε γενικές γραμμές η κατεργασία ξεκινά με το κοπτικό εργαλείο να κατεργάζεται περιοχές της παρειάς του οδοντωτού τροχού κοντά στην περιφέρεια του, ενώ σταδιακά εισέρχεται σε μεγαλύτερο βάθος. Καθώς προχωρά η κατεργασία το κοπτικό εργαλείο αρχίζει να κατεργάζεται την αντίθετη παρειά και σταδιακά σταματά την κατεργασία. Σε κάθε μία από τις θέσεις κύλισης μπορεί να διακριθεί ο τρόπος με τον οποίο η επιφάνεια της κίνησης του κοπτικού εργαλείου χωρίζει τον όγκο του οδοντωτού τροχού σε δύο μέρη, δημιουργώντας έτσι το απαραμόρφωτο απόβλιττο σε αυτή. Λόγω του ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται η αντίρροπη κατεργασία μπορεί να παρατηρηθεί ότι το απόβλιττο που προκύπτει ξεκινά από μικρή σχετικά διατομή στις πρώτες θέσεις περιστροφής και καταλήγει σε μεγάλο στις τελευταίες. Οι θέσεις κύλισης οι οποίες απαιτούνται σε κάθε μία από τις περιπτώσεις διαφέρει και εξαρτάται από τη πρόωση της κατεργασίας και τη διάμετρο του οδοντωτού τροχού και του κοπτικού εργαλείου. Η παρειά του κοπτικού εργαλείου η οποία εισέρχεται πρώτη στην κατεργασία ονομάζεται εισερχόμενη, σε αντίθεση με αυτήν που ακολουθεί και εξερχόμενη, μια και είναι αυτή με την οποία τερματίζεται η κατεργασία του αυλακιού.

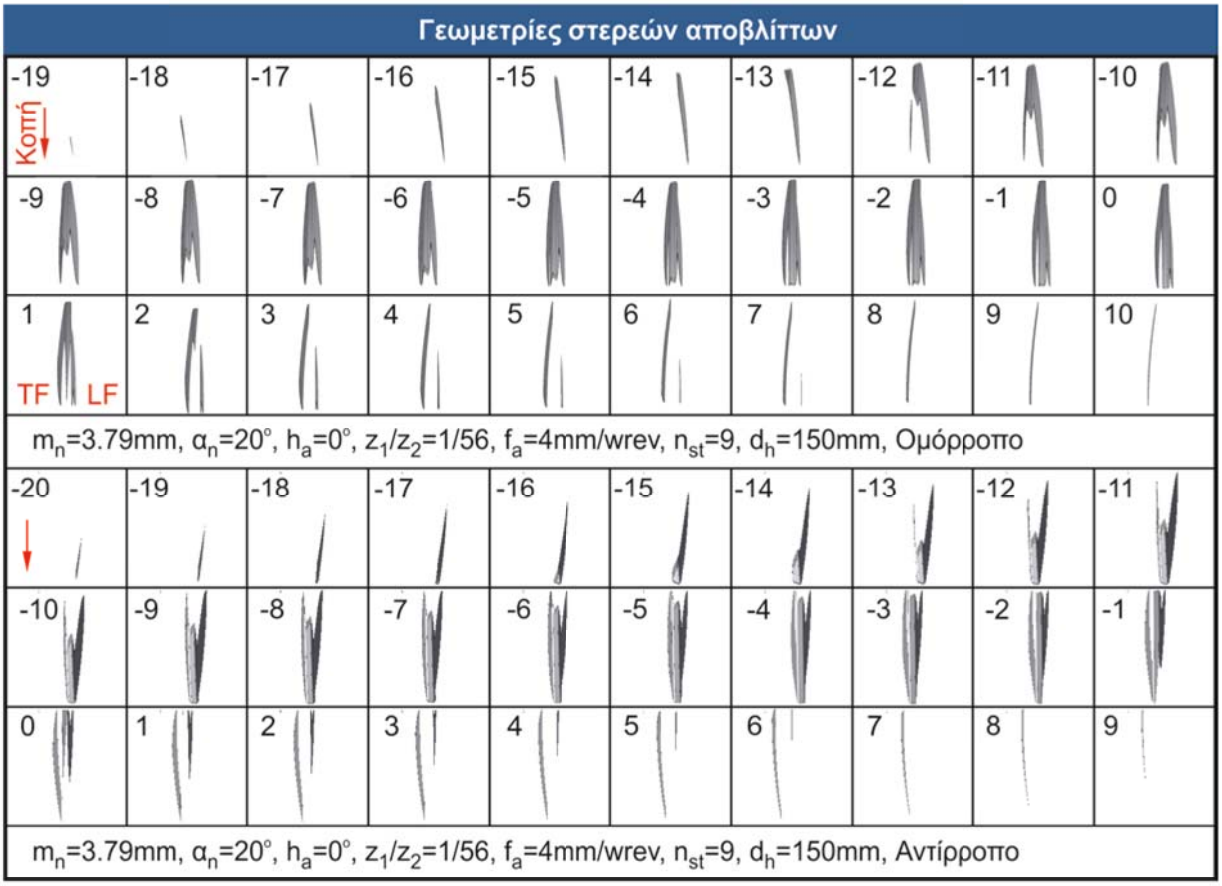


Σχήμα 3.13 Συναρμολόγηση οδοντωτού τροχού - τροχιάς σε διάφορες θέσεις κύλισης

Η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της κατεργασίας και τη στρατηγική της. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται τα απόβλιττα τα οποία παράγονται για την περίπτωση της ομόρροπης και της αντίρροπης κατεργασίας μιας ευθείας οδόντωσης.

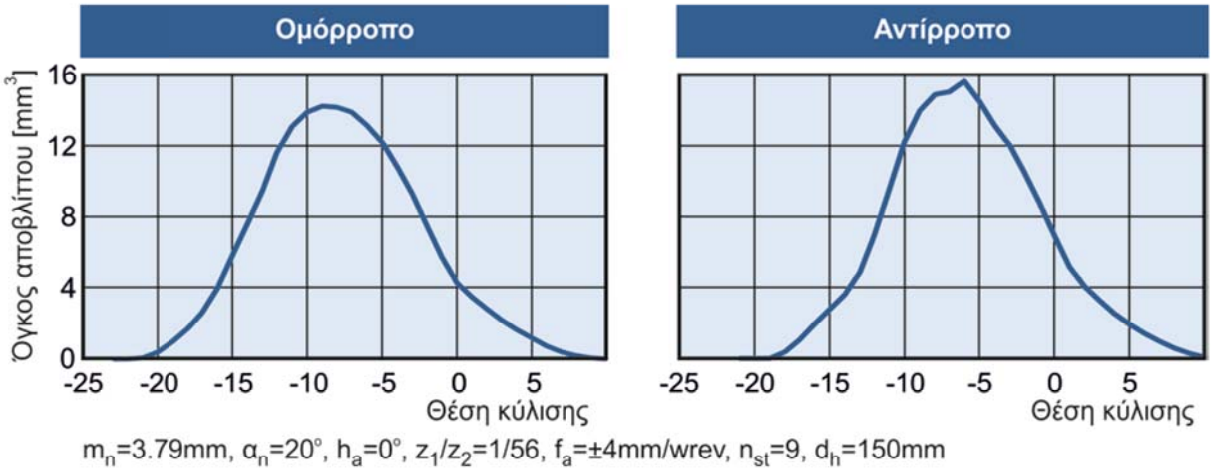
Η πορεία της κοπής αναλύεται με τη χρήση της μορφής των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Από τα απόβλιττα τα οποία προκύπτουν από την ομόρροπη στρατηγική κατεργασίας παρατηρείται ότι αυτή ξεκινά στη θέση κύλισης -19 με την εισερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου, όπως φαίνεται στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος 3.14. Στη θέση κύλισης -14 η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου αρχίζει την κατεργασία όπως φαίνεται και στο πάνω μέρος του σχήματος 3.14. Η κατεργασία συνεχίζεται τόσο στην εισερχόμενη όσο και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Η εξερχόμενη παρειά ξεκινά τη κατεργασία του οδοντωτού τροχού στη θέση κύλισης -12 με ένα ξεχωριστό υποαπόβλιττο, το οποίο ενώνεται με το κύριο απόβλιττο στη θέση κύλισης -11. Η κατεργασία συνεχίζεται με τα απόβλιττα να μεγαλώνουν σε μέγεθος μέχρι τη θέση κύλισης -6 όπου ο όγκος του αποβλίττου φτάνει τη μέγιστη τιμή του. Από τη θέση κύλισης -11 μέχρι και την θέση κύλισης 1 τα απόβλιττα έχουν την ίδια μορφή με το πάχος τους να είναι μεγαλύτερο κοντά στην κεφαλή. Όπως παρατηρείται στη τρίτη σειρά των αποβλίττων της ομόρροπης κατεργασίας το απόβλιττο χωρίζεται σε δύο επιμέρους υποαπόβλιττα στη θέση κύλισης 2. Το μεγαλύτερο από τα δύο είναι αυτό που παράγεται από την εξερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου. Η κατεργασία στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου σταματά στη θέση κύλισης 3 και ακολουθείται από την εισερχόμενη παρειά στη θέση κύλισης 7. Τέλος η κατεργασία ολοκληρώνεται με τη θέση κύλισης 10.

Στην περίπτωση της αντίρροπης στρατηγικής απαιτείται ο ίδιος αριθμός θέσεων κύλισης για την πλήρη κατεργασία του αυλακιού του οδοντωτού τροχού. Η μορφή των αποβλίττων της κατεργασίας παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος 3.14.



Σχήμα 3.14 Μορφή απαραμόρφωτων αποβλίττων για την κατεργασία ευθείας οδόντωσης

Παρά το ότι η κατεργασία ακολουθεί τα ίδια βήματα, τα απόβλιττα τα οποία παράγονται έχουν αρκετές μορφολογικές διαφορές. Τα απόβλιττα της ομόρροπης κατεργασίας κατά κανόνα ξεκινούν από μεγάλη διατομή και καταλήγουν σε μικρότερη, ενώ τα απόβλιττα της αντίρροπης ακολουθούν την αντίστροφη πορεία, όπως παρατηρείται και στις κλασσικές κατεργασίες κοπής. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται ο όγκος των αποβλίττων στις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω.

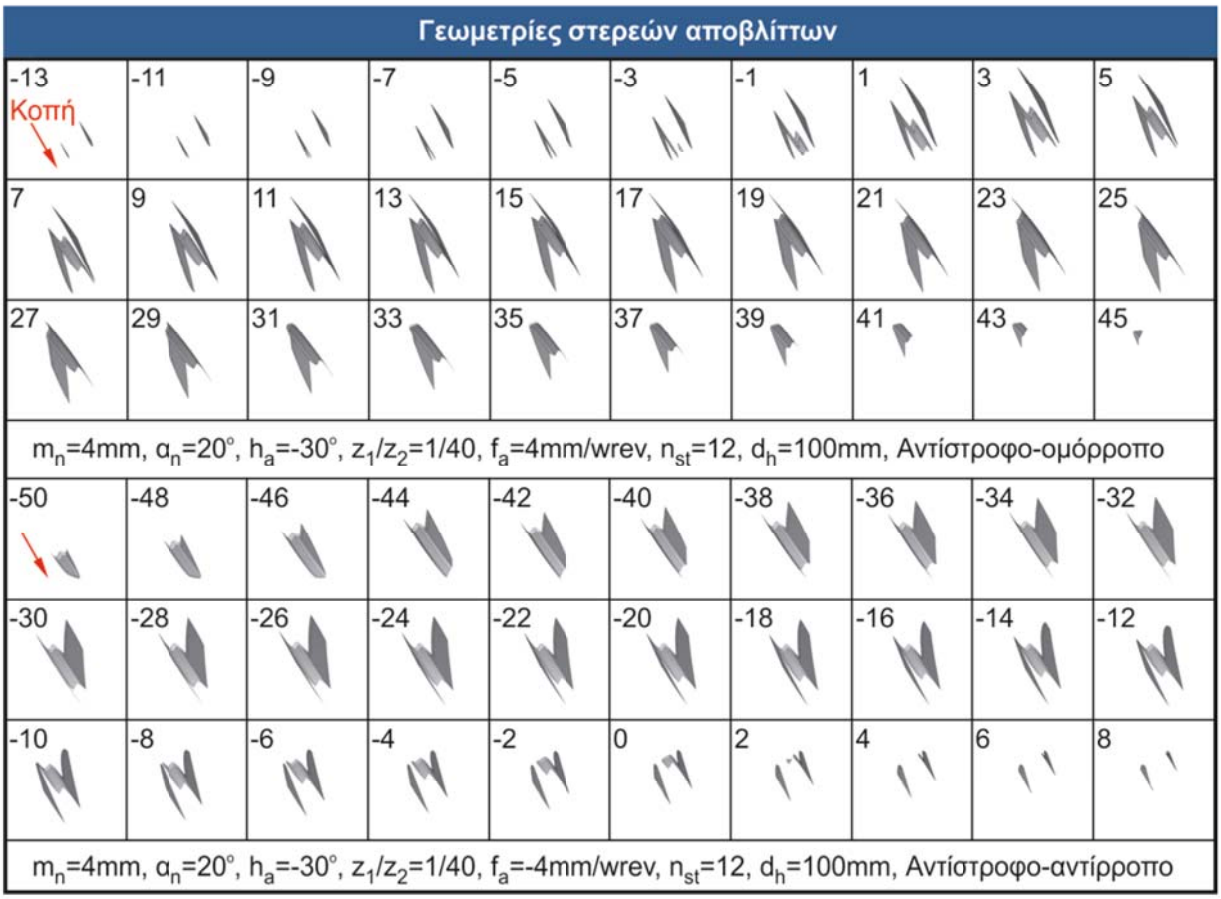


Σχήμα 3.15 Όγκος αποβλίττων συναρτήσει της θέσης κύλισης για αντίρροπη και ομόρροπη κατεργασία

Η κατεργασία ελικοειδών οδοντώσεων μπορεί να γίνει με τέσσερεις διαφορετικές στρατηγικές, οι οποίες κατεργάζονται με διαφορετικό τρόπο το αυλάκι. Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων για τη αντίστροφη κατεργασία ελικοειδούς οδοντωτού τροχού, τόσο με αντίρροπο, όσο και με ομόρροπο φραιζάρισμα. Στη περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης εύκολα παρατηρείται ότι η πορεία της κοπής ακολουθεί τελείως διαφορετική πορεία σε σχέση με την περίπτωση της ευθείας οδόντωσης.

Στο πάνω μέρος του σχήματος 3.16 παρουσιάζονται οι 30 από τις 65 θέσεις κύλισης οι οποίες απαιτούνται για την πλήρη κατεργασία του αυλακιού του οδοντωτού τροχού με τη στρατηγική του ομόρροπου-αντίστροφου φραιζαρίσματος. Αναλυτικότερα, η κατεργασία με αυτήν τη στρατηγική ξεκινά στη θέση κύλισης -17 με τις δύο παρειές του κοπτικού εργαλείου να αρχίζουν την κατεργασία του αυλακιού κατεργάζοντας ένα απόβλιττο όμοιο με αυτό της θέσης κύλισης -13 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16 αλλά έχει μικρότερες διαστάσεις. Τα απόβλιττα μεγαλώνουν σε διαστάσεις μέχρι τη θέση κύλισης -3, όπου η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου εισέρχεται στην κατεργασία. Καθώς η κατεργασία προχωρά και τα δύο υποαπόβλιττα που υπήρχαν από την αρχή της κατεργασίας ενώνονται σε ένα ενιαίο απόβλιττο στη θέση κύλισης 9. Οι διαστάσεις του αποβλίττου μεγαλώνουν μέχρι τη θέση κύλισης 21, όπου παρατηρείται και ο μέγιστος όγκος του αποβλίττου. Μεταξύ των θέσεων κύλισης 21 και 47, θέση η οποία δεν παρουσιάζεται μια και το απόβλιττο είναι όμοιο με αυτό της θέσης κύλισης 45 αλλά πολύ μικρότερο, το απόβλιττο σταδιακά μικραίνει σε διαστάσεις, με την εισερχόμενη παρειά να είναι η πρώτη η οποία σταματά την κατεργασία, ακολουθούμενη από την εξερχόμενη και τέλος την κεφαλή του κοπτικού εργαλείου.

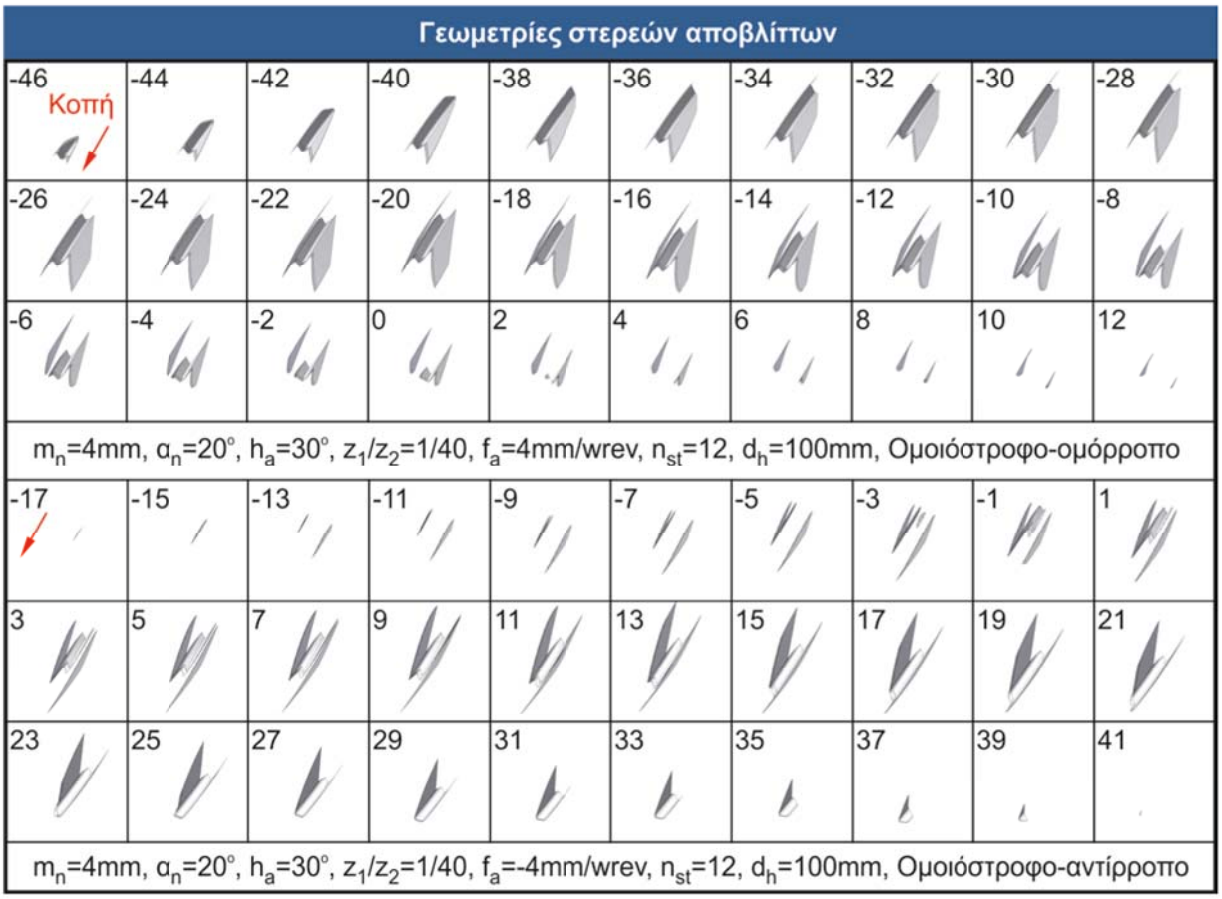
Στην αντίρροπη, αντίστροφη-ομόρροπη στρατηγική η πορεία της κοπής παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος 3.16 όπου παρουσιάζονται 30 από τις 70 θέσεις κύλισης οι οποίες απαιτούνται για τη κατεργασία του αυλακιού με αυτήν τη στρατηγική. Η κατεργασία ξεκινά με τη θέση κύλισης -53, η οποία δεν παρουσιάζεται αλλά είναι όμοια με αυτή της θέσης κύλισης -50, και ακολουθεί την αντίστροφη πορεία σε σχέση με αυτή της ομόρροπης κατεργασίας, έτσι σταδιακά εισέρχονται οι δύο παρειές στην κοπή, το απόβλιττο μεγαλώνει σε διαστάσεις μέχρι τη θέση κύλισης -34, όπου και παρατηρείται ο μεγαλύτερος όγκος του αποβλίττου. Η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου συνεχίζει την κατεργασία μέχρι και τη θέση κύλισης 2, ενώ η κατεργασία στις παρειές του κοπτικού εργαλείου σταματά λίγο αργότερα με τη θέση κύλισης 16, με εικόνα όμοια με αυτήν της θέσης κύλισης 8.



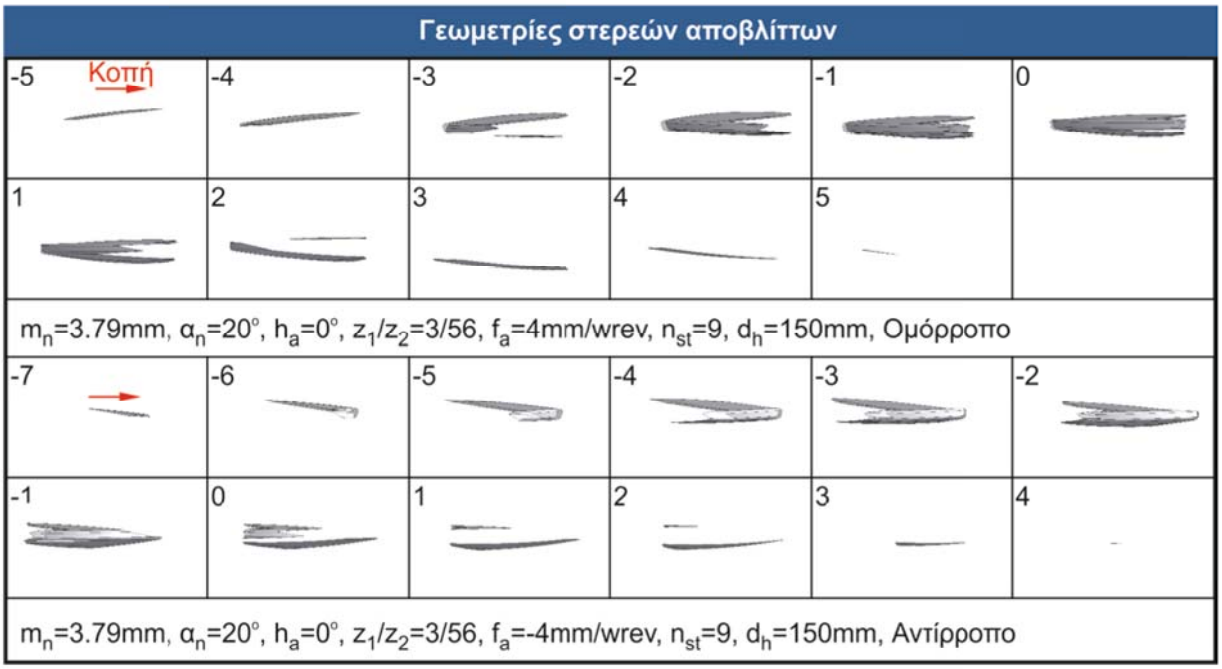
Σχήμα 3.16 Γεωμετρία απαραμόρφωτων αποβλίττων για την αντίστροφή κατεργασία ελικοειδούς οδοντωτού τροχού

Αντίστοιχα αποτελέσματα μπορούν να παρατηρηθούν και για τη περίπτωση της ομοιόστροφης κατεργασίας, με αντίρροπη ή ομόρροπη στρατηγική. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτές τις παραλλαγές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.17.

Στην περίπτωση που η κατεργασία γίνεται με κοπτικό εργαλείο με περισσότερες αρχές, ο οδοντωτός τροχός περιστρέφεται κατά γωνία που αντιστοιχεί με τόσα δόντια όσα και οι αρχές του κοπτικού εργαλείου ανά περιστροφή του. Έτσι για ένα κοπτικό εργαλείο με δύο αρχές, σε κάθε περιστροφή του, ο οδοντωτός τροχός περιστρέφεται κατά δύο δόντια. Όπως είναι προφανές, η αύξηση του αριθμού των αρχών έχει άμεσο αντίκτυπο στη κατεργασία και έτσι λιγότερες θέσεις κύλισης απαιτούνται για τη κατεργασία του αυλακιού, ενώ τα απόβλιττα τα οποία παράγονται είναι μεγαλύτερα και πιο παχιά. Τα απόβλιττα της κατεργασίας ενός οδοντωτού τροχού με ένα κοπτικό εργαλείο με τρείς αρχές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.18, τόσο για την αντίρροπη όσο και για την ομόρροπη κατεργασία.

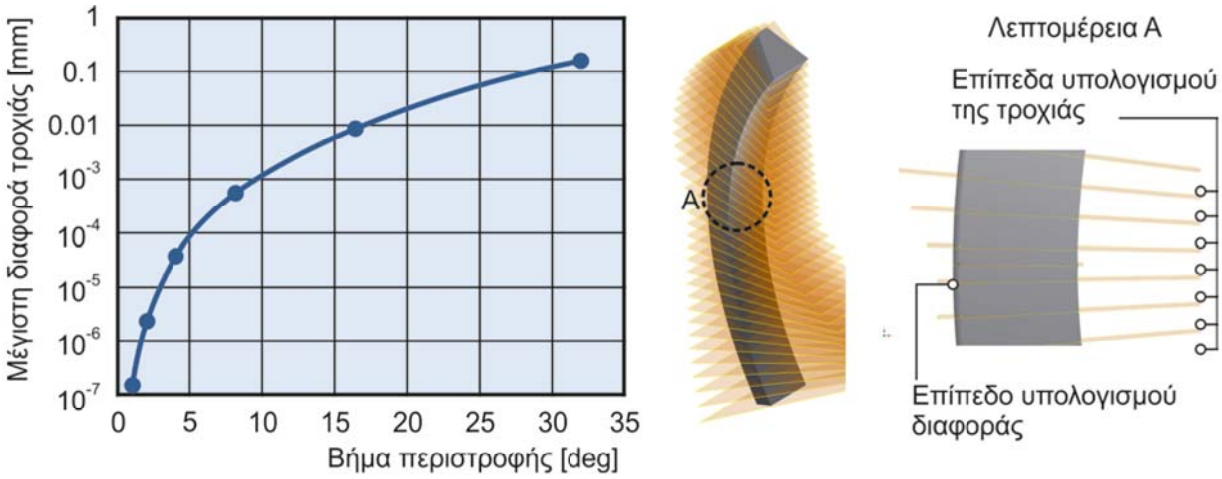


Σχήμα 3.17 Γεωμετρία απαραμόρφωτων αποβλίττων για την ομοιόστροφη κατεργασία ελικοειδούς οδοντωτού τροχού



Σχήμα 3.18 Γεωμετρία απαραμόρφωτων αποβλίττων για κατεργασία με τρείς αρχές

Η ακρίβεια της διαδικασίας υπολογισμού των στερεών αποβλίττων και του τελικού αυλακιού της οδόντωσης εξαρτάται σε μεγάλο μέρος από τη διακριτοποίηση η οποία χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των κινήσεων του κοπτικού εργαλείου. Η επιλογή του κατάλληλου βήματος περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι καθοριστική για τη ταχύτητα του αλγορίθμου και την ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Για την εύρεση του βήματος με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Για κάθε μια υπολογίστηκε η μέγιστη απόκλιση της κατατομής, όπως αυτή υπολογίζεται σε σχέση με την κατατομή αναφοράς. Ο κύριος τύπος σφάλματος ο οποίος παρατηρήθηκε ήταν η λάθος τοποθέτηση της κατατομής στο επίπεδο της επιφάνειας του αποβλίττου η οποία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.19, φτάνει τα 0,16mm όταν το βήμα της διακριτοποίησης είναι 32 μοίρες. Εκτός αυτού, υπάρχει ελάχιστη παραμόρφωση της κατατομής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την κατατομή αναφοράς, η οποία αγγίζει τα 2μm στη διακριτοποίηση των 32 μοιρών και μειώνεται εκθετικά με την μείωση του βήματος. Όπως είναι προφανές, οποιαδήποτε διακριτοποίηση με βήμα μικρότερο των τεσσάρων μοιρών παράγει τροχιά υψηλής ακρίβειας. Η ακρίβεια της παραγόμενης τροχιάς οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη διαδικασία παραγωγής της επιφάνειας κίνησης του κοπτικού εργαλείου η οποία ακολουθήθηκε, εισάγοντας σε κάθε θέση περιστροφής την κατατομή και όχι μόνο τη τροχιά σαν τρισδιάστατη καμπύλη.

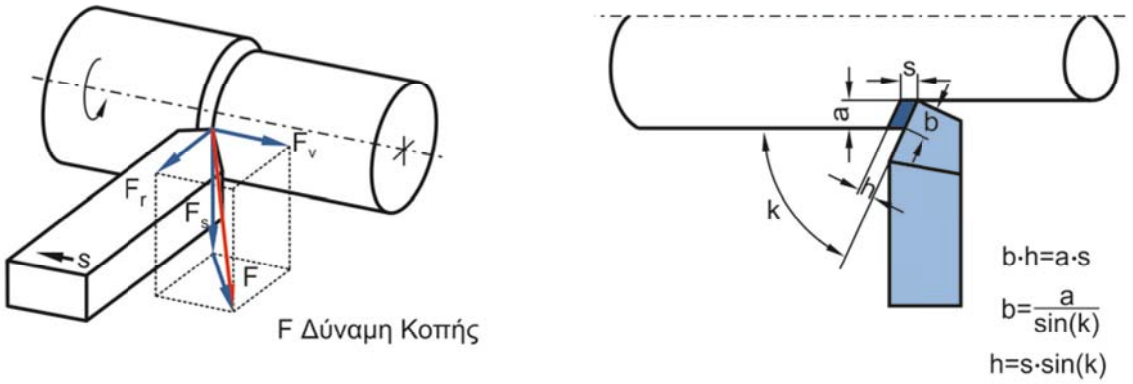


Σχήμα 3.19 Ακρίβεια της παραγόμενης τροχιάς συναρτήσει της διακριτοποίησης περιστροφής του κοπτικού εργαλείου

3.5 Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

Μετά τη δημιουργία της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων χρησιμοποιείται η σχέση των Kienzle και Victor [12] προκειμένου να υπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής στην περίπτωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση.

Οι Kienzle και Victor ανέπτυξαν μια εκθετική σχέση για την πρόβλεψη των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής σε κατεργασία με τόρνο (Σχήμα 3.20). Με βάση τη σχέση αυτή, οι δυνάμεις κοπής στο σύστημα της κόψης εξαρτώνται εκθετικά από το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου και γραμμικά από το πλάτος του. Οι τρεις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής με βάση αυτό το μοντέλο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:



Σχήμα 3.20 Μοντέλο δυνάμεων κοπής κατά Kienzle-Victor

$$F_s=b\cdot K_{s1,1}\cdot h^{1-z} \quad (3.14)$$

$$F_r=b\cdot K_{R1,1}\cdot h^{1-y} \quad (3.15)$$

$$F_v=b\cdot K_{V1,1}\cdot h^{1-x} \quad (3.16)$$

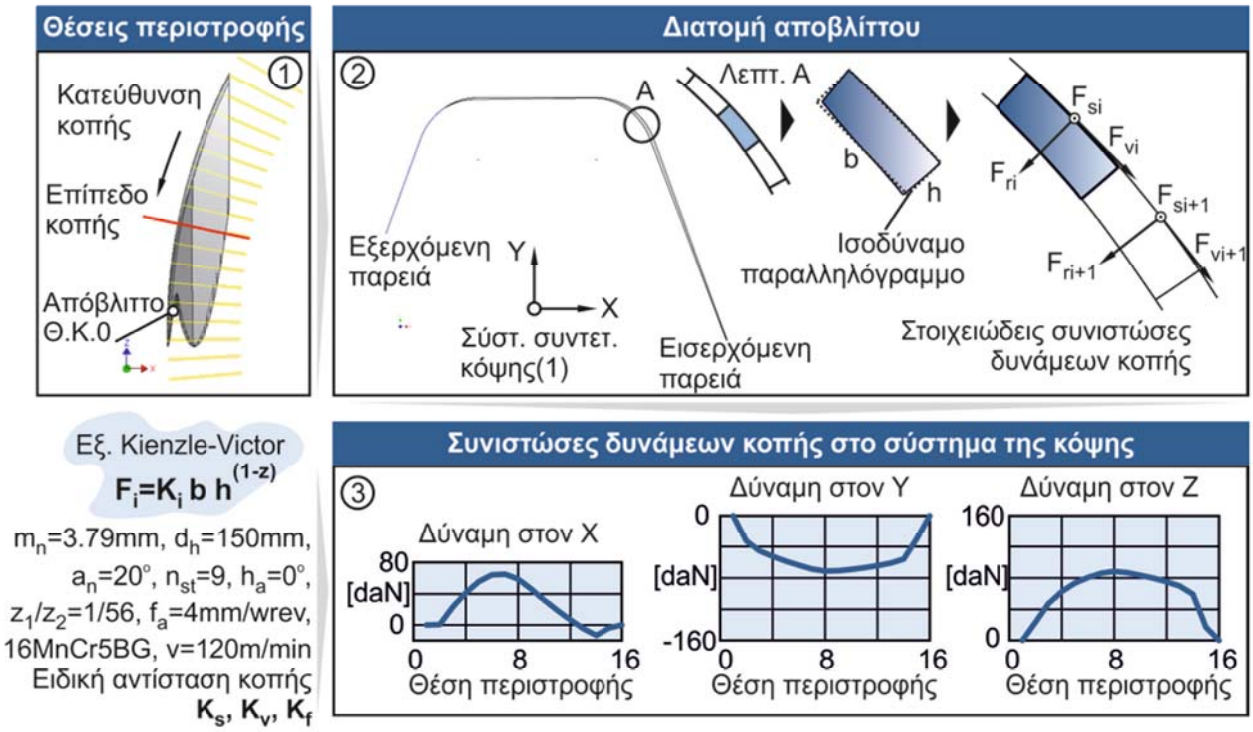
όπου :

F_S	συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην ταχύτητα κοπής [N]
F_R	συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην κοπτική ακμή [N]
F_V	συνιστώσα δύναμης κάθετη στις F_s και F_r [N]
b	πλάτος αποβλίττου [mm]
h	πάχος αποβλίττου [mm]
$K_{S1,1}$, $K_{R1,1}$, $K_{V1,1}$	ειδική αντίσταση κοπής [N/mm^2]
z,x,y	σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής ορίζονται ως η δύναμη η οποία απαιτείται για την κοπή απαραμόρφωτου αποβλίττου 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.

Με τις εξισώσεις των Kienzle και Victor εύκολα υπολογίζονται οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία με τόρνο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι υπάρχει μία κοπτική ακμή, η οποία κατεργάζεται την ίδια διατομή του αποβλίττου η οποία κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι σταθερή και μπορεί να περιγραφεί από ένα παραλληλόγραμμο με πλάτος b και ύψος h.

Αντίθετα, στην περίπτωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση, υπάρχει μια συλλογή από κοπτικές ακμές, κάθε μια από τις οποίες κατεργάζεται διαφορετικό απόβλιττο κατά τη διάρκεια της κοπής. Επιπρόσθετα, λόγω της κινηματικής της κατεργασίας, το απόβλιττο μεταβάλλεται από τη μία θέση περιστροφής στην επόμενη, ενώ η τομή του αποβλίττου σε οποιαδήποτε θέση περιστροφής είναι αρκετά περίπλοκη. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλισης ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21 Διάγραμμα ροής υπολογισμού δυνάμεων κοπής

Για κάθε θέση κύλισης η οποία απαιτείται για την κατεργασία ενός οδοντωτού τροχού εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

- Δημιουργία τομών του αποβλίττου στα επίπεδα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου όπως παρουσιάζεται στο βήμα 1 του σχήματος 3.21. Τα επίπεδα τα οποία χρησιμοποιούνται είναι αυτά τα οποία δημιουργήθηκαν για τη δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου. Με αυτό το τρόπο δεν υπάρχει έστω και η παραμικρή απόκλιση όσο αφορά τη κατατομή του κοπτικού εργαλείου και τη μορφή του αποβλίττου.
- Σε κάθε τομή του αποβλίττου του προηγούμενου βήματος, γίνεται διακριτοποίηση της επιφάνειας σε στοιχειώδη τμήματα, προκειμένου να εφαρμοσθούν οι εξισώσεις των Kienzle-Victor, όπως παρουσιάζεται στο βήμα 2 του σχήματος 3.21. Το στοιχειώδες τμήμα που παράγεται έχει τη μία πλευρά να ταυτίζεται με τη κοπτική ακμή και τις άλλες δύο να είναι κάθετες σε αυτή. Το πλάτος του στοιχειώδους τμήματος κατά μήκος της κοπτικής ακμής είναι σταθερό, εκτός από το τέλος του εκάστοτε υποαποβλίττου και αποτελεί δεδομένο εισόδου του μοντέλου. Ο χρήστης ορίζει το πλάτος του στοιχειώδους αποβλίττου ως υποπολλαπλάσιο του μήκους του τόξου της ακτίνας καμπυλότητας της κατατομής.
- Σε κάθε στοιχειώδες απόβλιττο βρίσκεται το ισοδύναμο πλάτος και πάχος του.
- Με βάση τα ισοδύναμα μεγέθη υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής όλων των στοιχειωδών αποβλίττων.

Κάθε στοιχειώδες τμήμα της διατομής του αποβλίττου είναι ένα τετράπλευρο το οποίο στα ευθεία τμήματα του κοπτικού εργαλείου είναι τραπέζιο (περιοχή A –Σχήμα 3.22), ενώ στα καμπύλα τμήματα του κοπτικού εργαλεία έχει γενική μορφή (περιοχή B –Σχήμα 3.22).

Ο υπολογισμός του ισοδύναμου πλάτους και πάχους του αποβλίττου στην πρώτη περίπτωση είναι απλός, μια και το στοιχειώδες τμήμα είναι ένα τραπέζιο με τις δύο βάσεις του να είναι κάθετες στη μια από τις άλλες δύο πλευρές, όπως παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.22. Έτσι, για να υπολογισθούν τα ισοδύναμα μεγέθη του στοιχειώδους αποβλίττου, αρκεί να υπολογιστεί το μέσο πάχος του αποβλίττου. Έτσι τα ισοδύναμα μεγέθη για αυτή τη περίπτωση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$h_{eq}=\frac{h_1+h_2}{2} \tag{3.17}$$

$$b_{eq}=b \tag{3.18}$$

όπου :

h_{eq}	ισοδύναμο πάχος του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [mm]
h_1, h_2	πάχος του αποβλίττου στις πλευρές του στοιχειώδους τμήματος [mm]
b_{eq}	ισοδύναμο πλάτος του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [mm]
b	πλάτος του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [mm]

Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση ο υπολογισμός των ισοδύναμων μεγεθών είναι πιο σύνθετος. Το στοιχειώδες τμήμα αποτελείται από ένα τόξο κύκλου, δύο ευθείες κάθετες στο τόξο και μια καμπύλη B-Spline. Το εμβαδό του στοιχειώδους τμήματος χωρίζεται σε δύο μέρη όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22. Σε κάθε ένα από αυτά τα μέρη υπολογίζονται τα ισοδύναμα μεγέθη τα οποία στη συνέχεια σταθμίζονται για να προκύψουν τα τελικά ισοδύναμα μεγέθη. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$h_{av1}=\frac{h_1+h_2}{2} \tag{3.19}$$

$$b_{av1}=\frac{(b_1+b_2)\cdot\cos\frac{\varphi}{2}}{2} \tag{3.20}$$

$$h_{av2}=0.1\cdot m_n\cdot\left(1-\cos\frac{\varphi}{2}\right) \tag{3.21}$$

$$b_{av2}=\frac{(0.2m_n)^2\cdot\left(\frac{\varphi}{2}-\cos\frac{\varphi}{2}\ \sin\frac{\varphi}{2}\right)}{h_{av2}} \tag{3.22}$$

$$h_{eq}=\frac{b_{av1}h_{av1}^2+b_{av2}h_{av2}^2}{b_{av1}h_{av1}+b_{av2}h_{av2}} \tag{3.23}$$

$$b_{eq}=\frac{b_{av1}^2h_{av1}+b_{av2}^2h_{av2}}{b_{av1}h_{av1}+b_{av2}h_{av2}} \tag{3.24}$$

όπου :

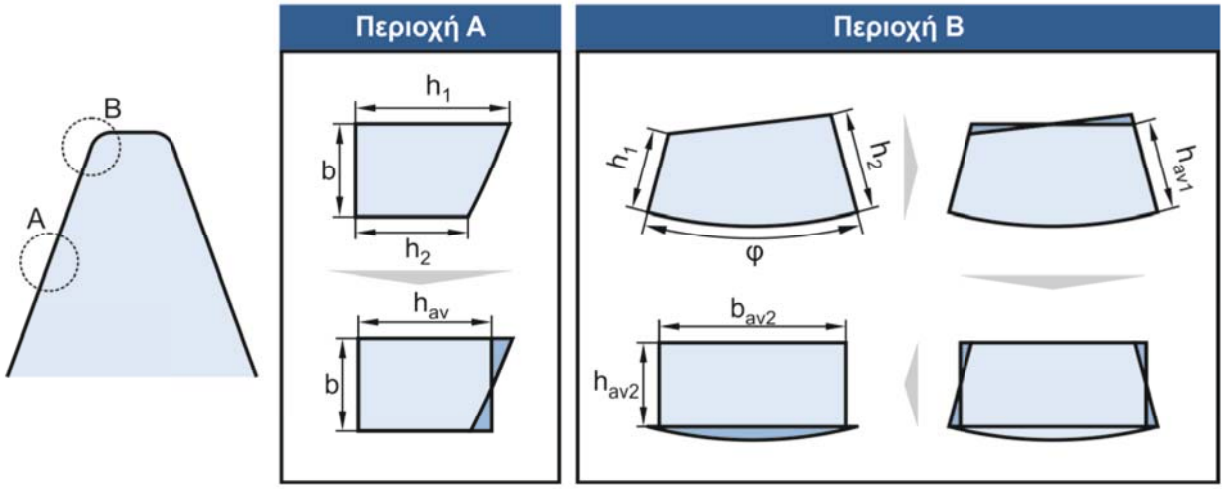
h_1, h_2	πάχος του αποβλίττου στις πλευρές του στοιχειώδους τμήματος [mm]
h_{av1}, h_{av2}	πάχος του αποβλίττου στο άνω και στο κάτω μέρος του στοιχειώδους τμήματος [mm]
b_1, b_2	πλάτος του αποβλίττου στις πλευρές του στοιχειώδους τμήματος [mm]

b_{av1}, b_{av2} πλάτος του αποβλίττου στο άνω και στο κάτω μέρος του στοιχειώδους τμήματος [mm]

φ η γωνία μεταξύ των δύο πλευρών του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [Rad]

h_{eq} ισοδύναμο πάχος του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [mm]

b_{eq} ισοδύναμο πλάτος του στοιχειώδους τμήματος του αποβλίττου [mm]



Σχήμα 3.22 Υπολογισμός ισοδύναμων μεγεθών των στοιχειωδών αποβλίττων

Αφού υπολογισθούν τα ισοδύναμα πάχη και πλάτη για όλα τα στοιχειώδη τμήματα μίας θέσης περιστροφής, εφαρμόζονται σε κάθε ένα από τα στοιχειώδη τμήματα οι σχέσεις Kienzle-Victor. Οι συντελεστές του υλικού για όλες τις περιπτώσεις που εκτελέστηκαν λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [46]. Το σημείο δράσης των δυνάμεων κοπής βρίσκεται στο μέσο του μήκους της κοπτικής ακμής του στοιχειώδους αποβλίττου που εξετάζεται. Οι δυο συνιστώσες των δυνάμεων οι οποίες βρίσκονται στο επίπεδο της κοπτικής ακμής, μετασχηματίζονται με τη βοήθεια των πινάκων μετασχηματισμού δύο διαστάσεων στο σύστημα συντεταγμένων της κοπτικής ακμής όπου και αθροίζονται. Η συνιστώσα F_s, η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο της κοπτικής ακμής, προκύπτει ως άθροισμα των στοιχειωδών δυνάμεων. Με αυτήν τη λογική οι δυνάμεις κοπής προκύπτουν από τις σχέσεις ((3.25 - (3.26) όπου κ_i η γωνία κλίσης της κοπτικής ακμής στο σημείο εφαρμογής της δύναμης στο στοιχειώδες απόβλιττο i.

$$\begin{bmatrix} F_{X1} \\ F_{Y1} \end{bmatrix} = \sum_{\forall i} \begin{bmatrix} \cos\kappa_i & -\sin\kappa_i \\ \sin\kappa_i & \cos\kappa_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Vi} \\ F_{Ri} \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

$$F_{Z1} = \sum_{\forall i} F_{Si} \tag{3.26}$$

οπού:

F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1}: οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στο σύστημα συντεταγμένων της κόψης (1)

F_{Vi}, F_{Ri}, F_{Si}: οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στο σύστημα συντεταγμένων της κόψης στο στοιχειώδες απόβλιττο i

κ_i η γωνία κλίσης της κοπτικής ακμής στο σημείο εφαρμογής της δύναμης στο στοιχειώδες απόβλιττο i

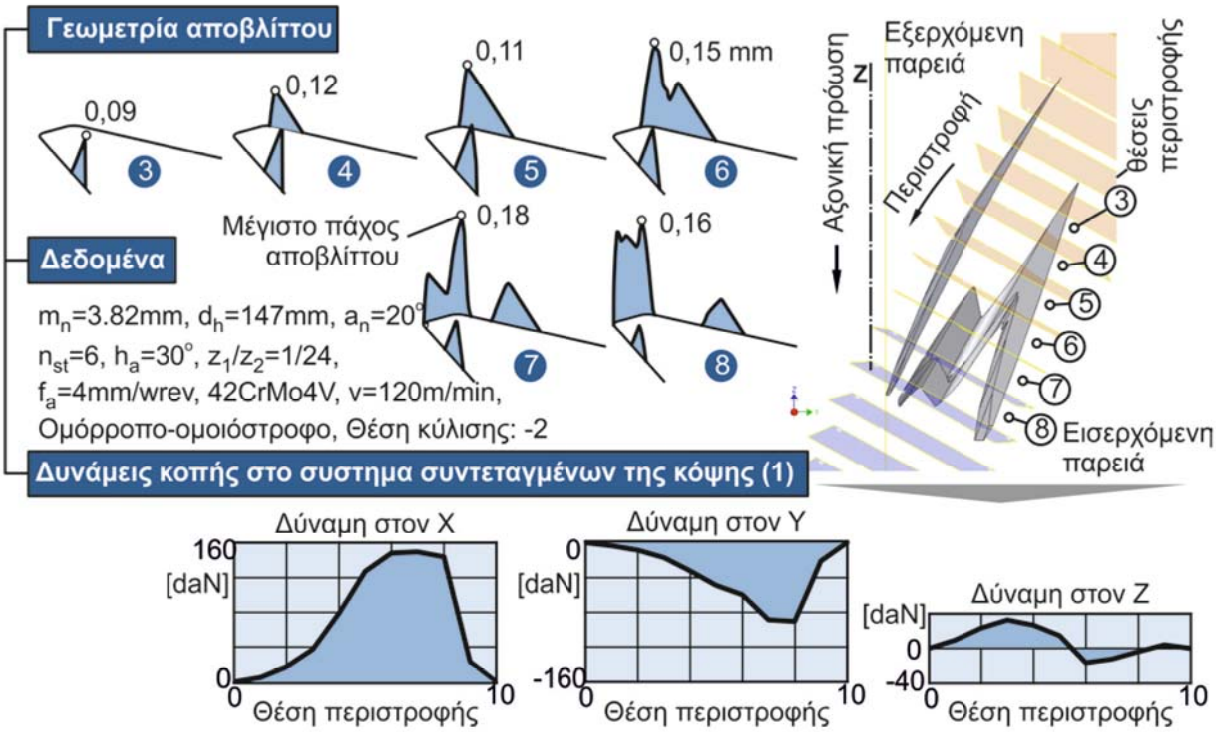
A/A	h_1 [μm]	h_2 [μm]	h_{av} [μm]	b [μm]	b_{av} [μm]	k_i [Deg]	F_s [daN]	F_v [daN]	F_r [daN]	F_X [daN]	F_Y [daN]	F_Z [daN]
1	0.00	5.25	2.63	9.31	9.31	104	0.014	0.052	0.039	0.050	-0.060	0.014
2	5.25	48.19	27.63	92.55	90.92	114.5	0.881	1.032	0.858	1.209	-1.295	0.881
3	48.19	55.31	52.63	92.55	89.39	107.5	1.433	1.229	1.056	1.376	-1.490	1.433
4	55.31	50.06	53.56	92.55	89.33	100.5	1.451	1.235	1.061	1.269	-1.408	1.451
5	50.06	44.09	47.96	92.55	89.68	93.5	1.337	1.200	1.025	1.097	-1.260	1.337
6	44.09	41.65	42.87	92.61	92.61	90	1.265	1.198	1.018	1.018	-1.198	1.265
7	41.65	40.62	41.13	92.61	92.61	90	1.225	1.183	1.004	1.004	-1.183	1.225
8	40.62	39.59	40.11	92.61	92.61	90	1.201	1.174	0.995	0.995	-1.174	1.201
9	39.59	38.56	39.08	92.61	92.61	90	1.177	1.165	0.986	0.986	-1.165	1.177
10	38.56	37.54	38.05	92.61	92.61	90	1.152	1.156	0.977	0.977	-1.156	1.152
11	37.54	36.51	37.02	92.61	92.61	90	1.128	1.147	0.968	0.968	-1.147	1.128
12	36.51	35.48	36.00	92.61	92.61	90	1.104	1.137	0.958	0.958	-1.137	1.104
13	35.48	34.46	34.97	92.61	92.61	90	1.079	1.127	0.949	0.949	-1.127	1.079
14	34.46	33.43	33.94	92.61	92.61	90	1.054	1.118	0.939	0.939	-1.118	1.054
15	33.43	32.40	32.92	92.61	92.61	90	1.029	1.107	0.929	0.929	-1.107	1.029
16	32.40	31.38	31.89	92.61	92.61	90	1.004	1.097	0.919	0.919	-1.097	1.004
17	31.38	30.35	30.86	92.61	92.61	90	0.979	1.086	0.908	0.908	-1.086	0.979
18	30.35	29.32	29.83	92.61	92.61	90	0.953	1.075	0.898	0.898	-1.075	0.953
19	29.32	28.29	28.81	92.61	92.61	90	0.928	1.064	0.887	0.887	-1.064	0.928
20	28.29	27.27	27.78	92.61	92.61	90	0.902	1.053	0.876	0.876	-1.053	0.902
21	27.27	26.67	26.97	54.08	54.08	90.0	0.514	0.609	0.506	0.506	-0.609	0.514
22	26.67	21.42	24.95	92.55	91.08	86.5	0.816	1.003	0.830	0.767	-0.950	0.816
23	21.42	14.39	18.83	92.55	91.46	79.5	0.657	0.926	0.755	0.574	-0.773	0.657
24	14.39	7.12	11.69	92.55	91.89	72.5	0.455	0.807	0.643	0.370	-0.576	0.455

m_n=3.79mm, d_h=150mm, a_n=20°, n_{st}=9, h_a=0°,z_1/z_2=1/56, f_a=4mm/wrev,16MnCr5BG, v=120m/min

Σχήμα 3.23 Αποτελέσματα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

Στο Σχήμα 3.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ισοδύναμων μεγεθών και των δυνάμεων κοπής για μια θέση περιστροφής. Στις τρείς πρώτες στήλες του πίνακα παρουσιάζονται τα μεγέθη που αφορούν το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, ενώ οι επόμενες δύο στήλες περιέχουν δεδομένα που αφορούν το πλάτος του αποβλίττου. Η έκτη στήλη περιέχει τη γωνία που σχηματίζει η κοπτική ακμή με το κατακόρυφο επίπεδο, ενώ οι επόμενες τρείς στήλες αφορούν τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής, σύμφωνα με τις εξισώσεις των Kienzle και Victor. Οι τελευταίες τρείς στήλες περιέχουν τα δεδομένα των δυνάμεων κοπής μετασχηματισμένα στο σύστημα της κόψης.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία, υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής για κάθε θέση περιστροφής, κάθε θέσης κύλισης. Με το τέλος της παραπάνω διαδικασίας εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με την εξέλιξη του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου σε κάθε θέση περιστροφής μιας θέσης κύλισης, καθώς επίσης και η εξέλιξη των δυνάμεων κοπής στο σύστημα της κοπτικής ακμής. Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζεται αντίστοιχα η εξέλιξη των παραπάνω μεγεθών για τη θέση κύλισης -2. Στο άνω μέρος του σχήματος παρουσιάζεται το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου σε έξι διαδοχικές θέσεις περιστροφής, με το απαραμόρφωτο απόβλιττο σε τρισδιάστατη μορφή να παρουσιάζεται στο δεξιό μέρος του σχήματος. Τέλος, οι προκύπτουσες δυνάμεις κοπής στο σύστημα της κόψης παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του σχήματος.



Σχήμα 3.24 Παράδειγμα υπολογισμού δυνάμεων κοπής

Με βάση την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκαν οι δυνάμεις κοπής σε κάθε θέση περιστροφής κάθε μιας θέσης κύλισης. Για να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής πρέπει αυτές να μετασχηματισθούν στα υπόλοιπα δύο συστήματα συντεταγμένων και να αθροιστούν προκειμένου να προκύψουν οι συνολικές δυνάμεις κοπής. Η διαδικασία μετασχηματισμού γίνεται με τη βοήθεια των πινάκων μετασχηματισμού για τρεις διαστάσεις και παρουσιάζεται στη σχέση 3.27. Οι γωνίες που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από την απ' ευθείας μέτρησή τους από το μοντέλο προσομοίωσης HOB3D. Η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια αποβλίττου της κάθε θέσης περιστροφής με το κατακόρυφο επίπεδο χρησιμοποιείται, όχι μόνο για το μετασχηματισμό των δυνάμεων κοπής από το σύστημα συντεταγμένων της κόψης στα άλλα δύο, αλλά και για την ορθή κατάταξη και άθροισή τους για τον υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων κοπής.

$$\begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = R_z(\omega_{1\to i}) \cdot R_y(\varphi_{1\to i}) \cdot R_x(\theta_{1\to i}) \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \end{bmatrix} \forall i \in (2,3)$$

όπου:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \qquad (3.27)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η διαδικασία που ακολουθείται για την άθροιση των δυνάμεων κοπής κάθε θέσης περιστροφής για τον υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων κοπής περιλαμβάνει τρία επιμέρους βήματα. Το πρώτο από αυτά είναι ο υπολογισμός της γωνίας τοποθέτησης της θέσης περιστροφής κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Η γωνία αυτή προκύπτει από τη σχέση (3.28):

$$\varphi^{i}_{in,j}=\varphi^{i}_{j}+j\cdot\frac{2\pi}{n_{st}} \tag{3.28}$$

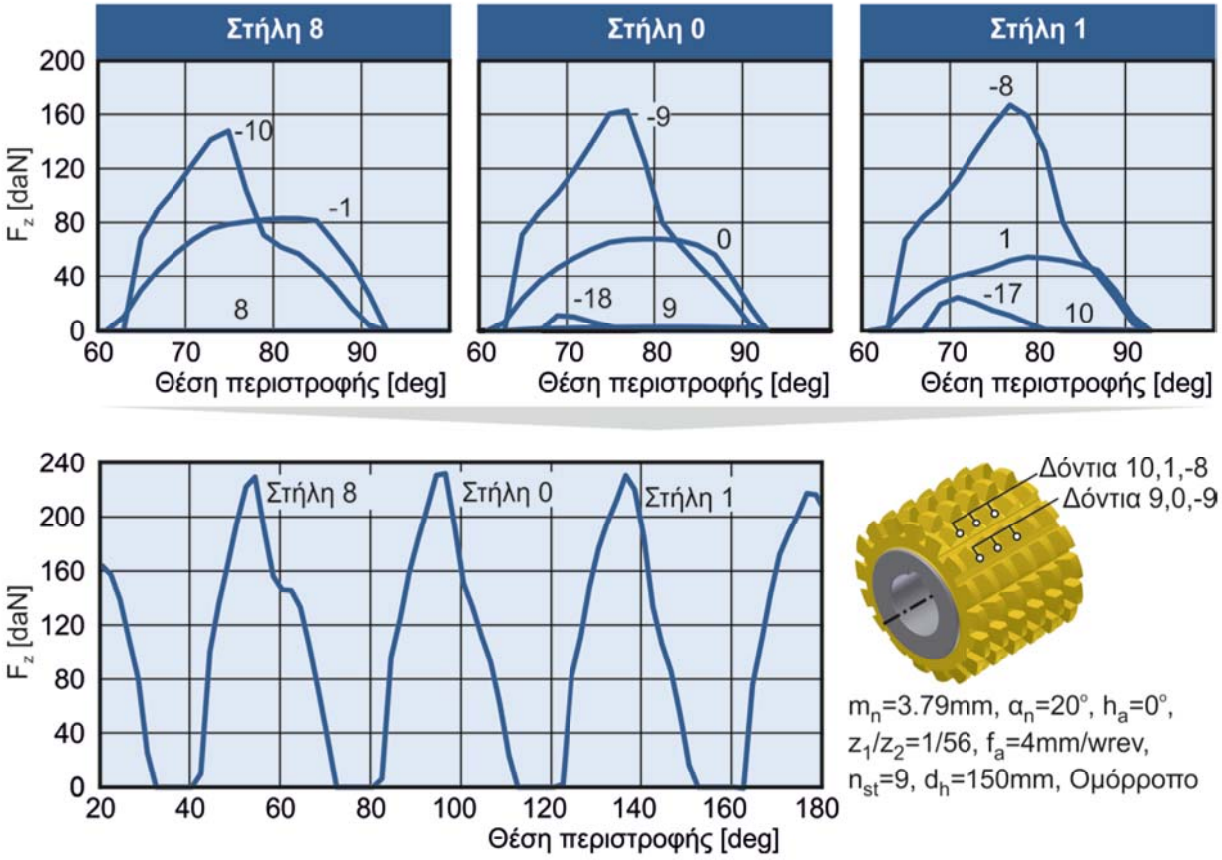
όπου :

n_{st} ο αριθμός των στηλών του κοπτικού εργαλείου

$\varphi^{i}_{in,j}$ η γωνία τοποθέτησης της θέσης περιστροφής i της θέσης κύλισης j

φ^{i}_{j} η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια αποβλίττου της θέσης περιστροφής i της θέσης κύλισης j με το κατακόρυφο επίπεδο

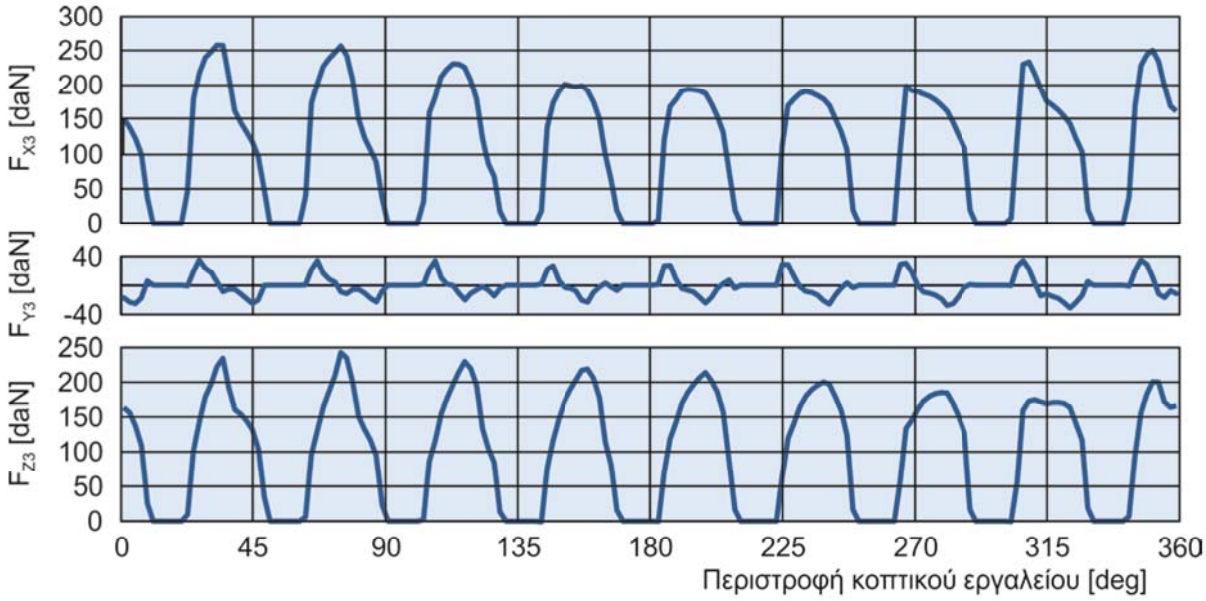
Με τον υπολογισμό της γωνίας τοποθέτησης με τη χρήση της σχέσης 3.29 αυτή μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από 2π, γι' αυτό η γωνία κανονικοποιείται στο διάστημα [0, 2π] και οι δυνάμεις κοπής αθροίζονται για κάθε τιμή της γωνίας τοποθέτησης ώστε να προκύψουν οι συνολικές δυνάμεις κοπής. Η διαδικασία άθροισης των δυνάμεων κοπής συνοψίζεται σε ένα παράδειγμα στο Σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.25 Παράδειγμα διαδικασίας υπολογισμού των συνολικών δυνάμεων κοπής

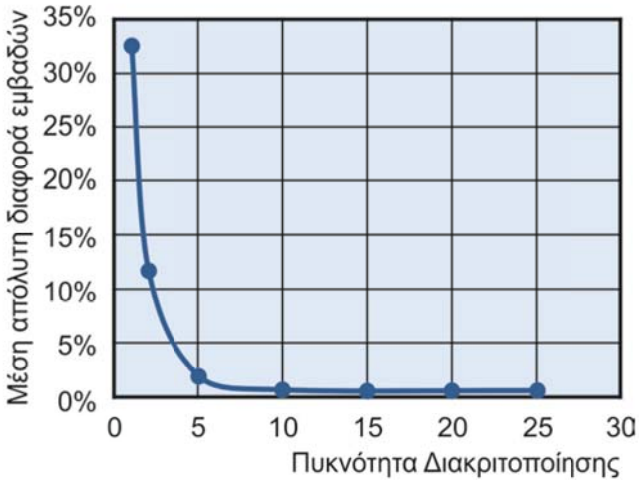
Στην πάνω σειρά του σχήματος παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής για έντεκα θέσεις κύλισης, από τις 30 που απαιτούνται για την κατεργασία του οδοντωτού τροχού του

παραδείγματος (Σχήμα 3.14). Λόγω του ότι το κοπτικό εργαλείο του παραδείγματος έχει 9 στήλες τα απόβλιττα ομαδοποιούνται σε ισάριθμες στήλες, έτσι θεωρώντας ότι η θέση κύλισης 0 ορίζει τη στήλη 0 σε αυτή θα υπάρχουν οι θέσεις κύλισης -9 και -18 καθώς και η 9. Αντίστοιχα στη στήλη 1 θα υπάρχουν οι θέσεις κύλισης -17, -8, 1 και 10. Η γωνία περιστροφής κάθε μιας από τις στήλες αυξάνεται με τη λογική της σχέσης (3.28) και κανονικοποιείται στο διάστημα [0, 2π]. Στη συνέχεια οι κανονικοποιημένες συνιστώσες των δυνάμεων κοπής αθροίζονται για να προκύψουν οι συνολικές δυνάμεις κοπής. Η διαδικασία παρουσιάζεται για τη συνιστώσα της δύναμης στον άξονα Z του σταθερού συστήματος συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού (3), αλλά είναι όμοια για όλες τις υπόλοιπες συνιστώσες των δυνάμεων κοπής. Μέτα τη διαδικασία κανονικοποίησης οι δυνάμεις κοπής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.26.



m_n=3.79mm, α_n=20°, h_a=0°,z_1/z_2=1/56, f_a=4mm/wrev, n_{st}=9, d_h=150mm, Ομόρροπο

Σχήμα 3.26 Συνολικές δυνάμεις κοπής στο σταθερού συστήματος συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού (3)



Σχήμα 3.27 Ακρίβεια του κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

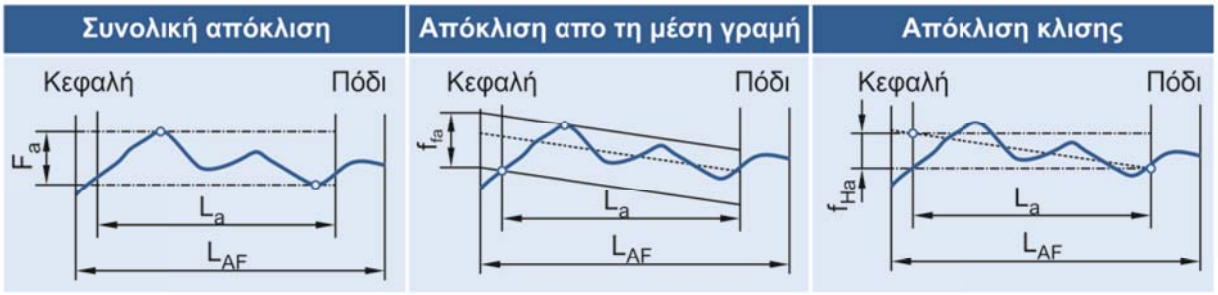
Η ακρίβεια των δυνάμεων κοπής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διακριτοποίηση η οποία χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των διαστάσεων των στοιχειωδών αποβλίττων. Έτσι, η επιλογή μιας αραιής διακριτοποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη γρήγορη εκτέλεση του κώδικα, ενώ τα αποτελέσματα που παράγει έχουν μειωμένη ακρίβεια. Στον αντίποδα, μια πυκνή διακριτοποίηση απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο αλλά μπορεί να υπολογίσει καλύτερα τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής λόγω του ότι μετρά μικρές αλλαγές στα πάχη του αποβλίττου, τις οποίες η αραιή διακριτοποίηση θα προσπερνούσε. Το μέτρο με βάση το οποίο μετρήθηκε η ακρίβεια της διακριτοποίησης ήταν η διαφορά του εμβαδού της διατομής του αποβλίττου στο επίπεδο τομής από το εμβαδό το οποίο

υπολογίζεται με τη χρήση του γινομένου ισοδύναμου πάχους και ισοδύναμου πλάτους. Με βάση τον υπολογισμό των δύο παραπάνω εμβαδών υπολογίζεται για κάθε θέση περιστροφής η απόλυτη τιμή της απόκλισης του υπολογισμένου εμβαδού ως ποσοστό του αντίστοιχου μετρημένου. Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζεται η μέση τιμή της απόλυτης ποσοστιαίας διαφοράς των εμβαδών όπως υπολογίστηκε για μία σειρά θέσεων περιστροφής. Η πυκνότητα της διακριτοποίησης ορίζει τον αριθμό των τμημάτων στα οποία θα χωρισθεί το τόξο στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή σε μια διακριτοποίηση με πυκνότητα δέκα το τόξο στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου χωρίζεται σε δέκα ίσα τμήματα. Όπως εύκολα παρατηρηται μια διακριτοποίηση με πυκνότητα μεγαλύτερη από δέκα δεν προσφέρει μεγάλη βελτίωση στα παραγόμενα αποτελέσματα, ενώ διακριτοποιήσεις με πυκνότητα μικρότερη του πέντε έχουν σχετικά υψηλό σφάλμα στον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής.

3.6 Υπολογισμός χαρακτηριστικών ποιότητας οδοντωτών τροχών

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των οδοντωτών τροχών είναι η ποιότητα της παρειάς και ιδιαίτερα της ενεργής επιφάνειας ενός οδοντωτού τροχού. Η παραδοσιακή διαδικασία μέτρησης της ποιότητας των επιφανειών, περιλαμβάνει τη μέτρηση της τραχύτητας των επιφανειών και τον υπολογισμό μεγεθών, όπως το μέσο ύψος τραχύτητας, το μέγιστο ύψος τραχύτητας κ.λ.π.. Η διαδικασία προσδιορισμού της ποιότητας των οδοντωτών τροχών περιλαμβάνει τον έλεγχο μίας σειράς παραμέτρων, όπως ο έλεγχος του βήματος της οδόντωσης, ο έλεγχος της κατατομής σε επίπεδα κάθετα και παράλληλα στην παρειά του οδοντωτού τροχού, κ.λ.π..

Στα πλαίσια του λογισμικού προσομοίωσης της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση αναπτύχθηκε κώδικας υπολογισμού της ποιότητας των οδοντωτών τροχών με βάση το πρότυπο ISO 1328-1 [47], το οποίο αξιολογεί την ποιότητα των επιφανειών των παρειών σε επίπεδο κάθετο και παράλληλο στην παρειά του οδοντωτού τροχού. Με βάση την προτυποποίηση της ποιότητας που ακολουθήθηκε, οι αποκλίσεις οι οποίες είναι δυνατόν να μετρηθούν σε μία οποιαδήποτε παρειά οδοντωτού τροχού, τόσο σε επίπεδο κάθετο όσο και σε παράλληλο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.28.

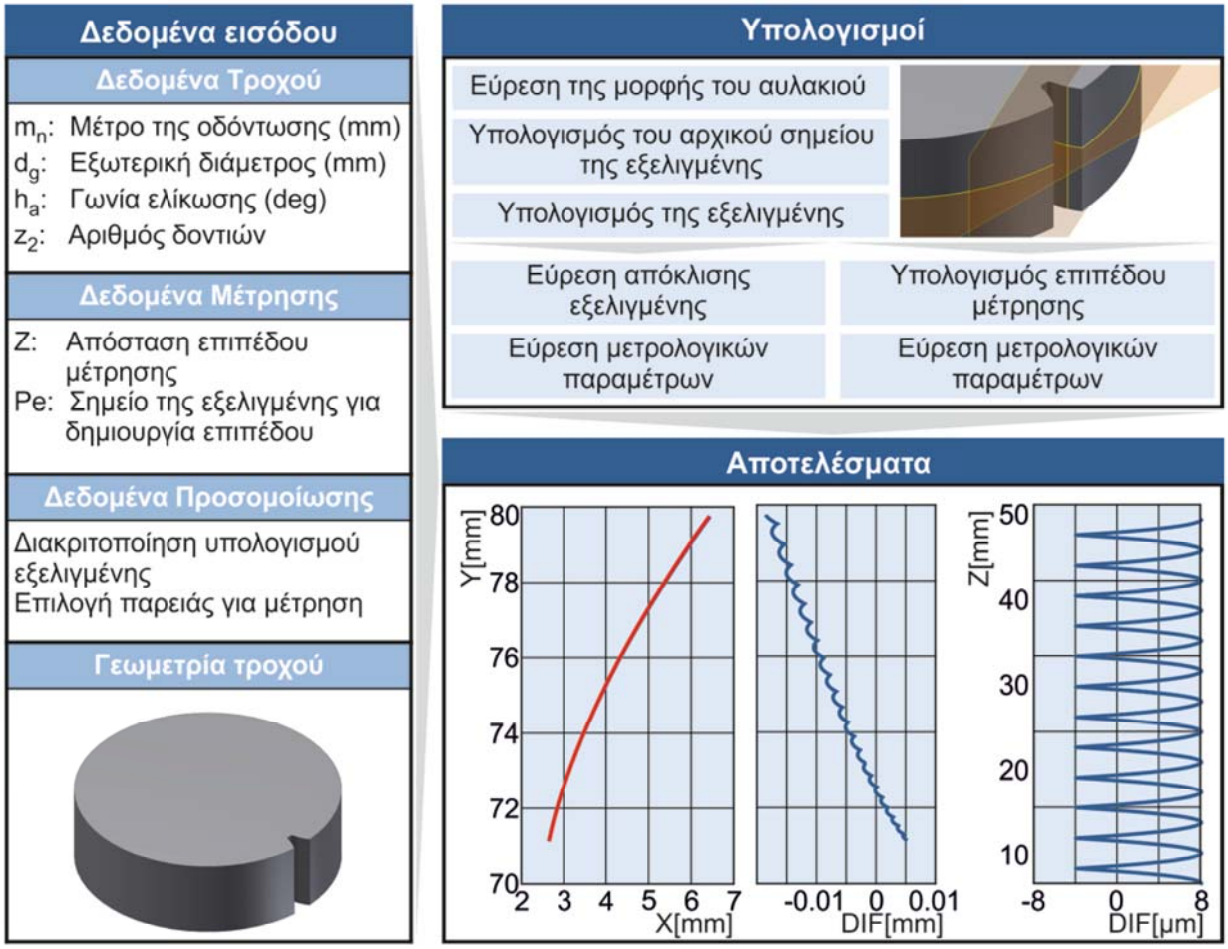


Σχήμα 3.28 Είδη αποκλίσεων οδοντωτών τροχών κατά ISO 1328-1

- Συνολική απόκλιση κατατομής (F_a, F_β), που είναι η απόσταση δύο καμπυλών παράλληλων στην πρότυπη κατατομή, οι οποίες περικλείουν όλες τις μετρήσεις στο μήκος αξιολόγησης (L_a).
- Απόκλιση κατατομής από τη μέση γραμμή (f_{fa}, $f_{f\beta}$), που είναι η απόσταση δύο καμπυλών παράλληλων στη μέση γραμμή των μετρήσεων και η οποία περικλείει όλες της μετρήσεις στο μήκος αξιολόγησης.

- Απόκλιση κλίσης (f_{Ha}, $f_{H\beta}$), που είναι η απόσταση μεταξύ δύο καμπυλών παράλληλων στη πρότυπη κατατομή, οι οποίες τέμνουν τη μέση γραμμή στα άκρα του μήκους αξιολόγησης.

Η διαδικασία της προσομοίωσης με τη χρήση του κώδικα αξιολόγησης της ποιότητας των οδοντωτών τροχών που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.29. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η διαδικασία ξεκινά με την εισαγωγή των βασικών μεγεθών του οδοντωτού τροχού που θα εξετασθεί, όπως το μέτρο της οδόντωσης του τροχού και ο αριθμός των δοντιών του. Επιπλέον δεδομένα εισόδου αφορούν τη μέτρηση και μεγέθη σχετικά με τον υπολογισμό της εξελιγμένης. Επιπρόσθετα, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει την παρειά στην οποία θα γίνει η μέτρηση της ποιότητας, κάθετα και παράλληλα στην παρειά. Στην αξιολόγηση της ποιότητας του οδοντωτού τροχού λαμβάνονται μετρήσεις μόνο κατά μήκος της εξελιγμένης και όχι κατά μήκος του ποδιού του οδοντωτού τροχού, μια και η μορφή της εξελιγμένης είναι αυτή που καθορίζει την ποιότητα του.

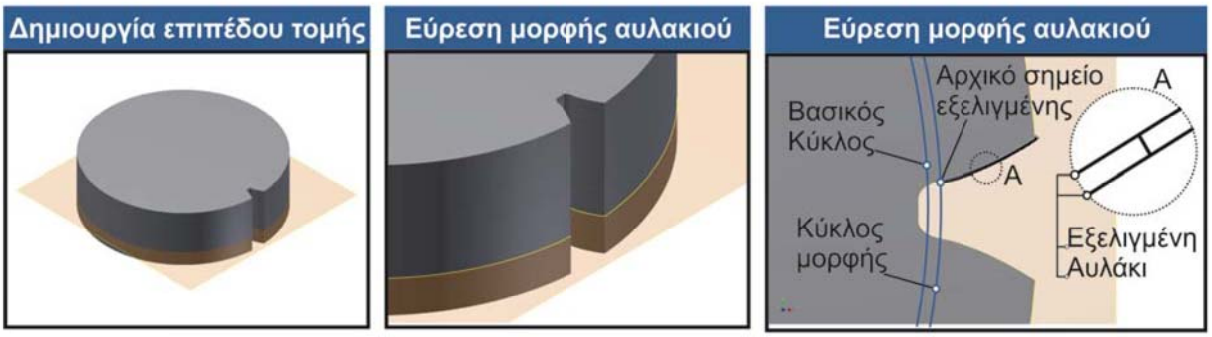


Σχήμα 3.29 Διάγραμμα ροής προγράμματος υπολογισμού της ποιότητας των οδοντωτών τροχών

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων ακολουθεί ο υπολογισμός της κατατομής της οδόντωσης σύμφωνα με τις γνωστές εξισώσεις της εξελιγμένης καμπύλης. Η σχεδίαση της καμπύλης γίνεται από το αρχικό της σημείο της, το οποίο δίνεται με βάση αναλυτικές σχέσεις, μέχρι την εξωτερική διάμετρο του οδοντωτού τροχού. Το αρχικό σημείο της εξελιγμένης βρίσκεται στον κύκλο μορφής του οδοντωτού τροχού, οι συντεταγμένες του προκύπτουν από μια σειρά

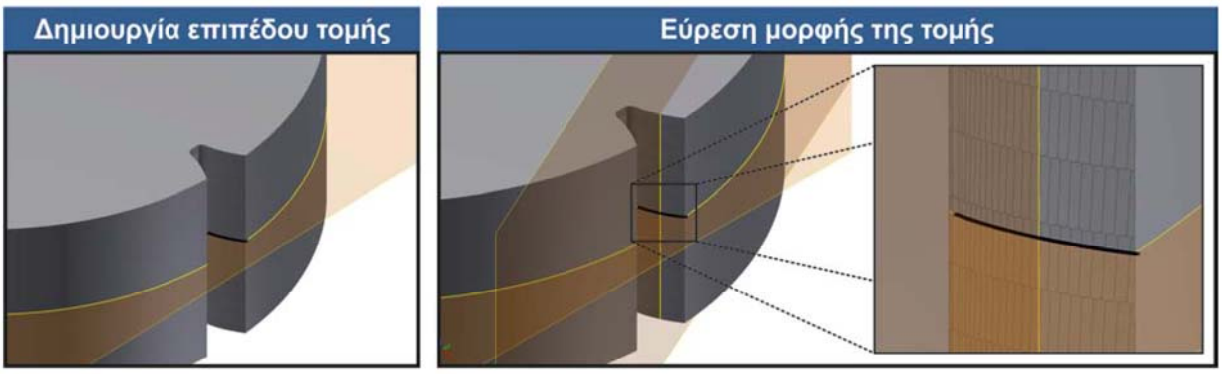
εξισώσεων και αποτελεί το σημείο έναρξης της εξελιγμένης. Μετά τον υπολογισμό της εξελιγμένης, αυτή σχεδιάζεται στο περιβάλλον του Inventor ως μία ενιαία B-Spline. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από μία σειρά σημείων τα οποία υπολογίστηκαν από τις αναλυτικές σχέσεις της εξελιγμένης καμπύλης και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της παρειάς, τόσο ως προς το κάθετο, όσο και ως προς το παράλληλο επίπεδο σε αυτή.

Η διαδικασία ελέγχου της εξελιγμένης του οδοντωτού τροχού γίνεται μετρώντας την απόσταση μεταξύ της πρότυπης εξελιγμένης, και αυτής που μετράται πάνω στο επίπεδο της μέτρησης. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η διαφορά των δύο κατατομών, η οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών ποιότητας του οδοντωτού τροχού. Η διαδικασία μέτρησης της διαφοράς μεταξύ της υπολογισμένης και της θεωρητικής εξελιγμένης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30 Διαδικασία μέτρησης της διαφοράς μεταξύ της υπολογισμένης και της θεωρητικής εξελιγμένης

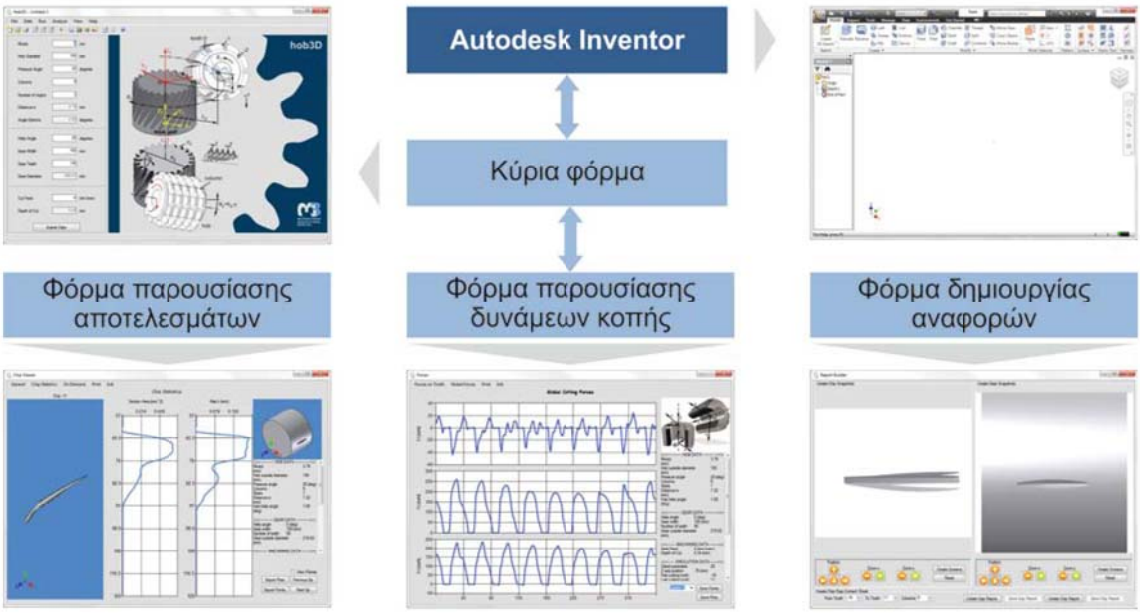
Στη διαδικασία υπολογισμού της ποιότητας του οδοντωτού τροχού σε επίπεδο κάθετο στην παρειά του, η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία του επιπέδου στο οποίο θα γίνει η μέτρηση. Λόγω του ότι η μοντελοποίηση της εξελιγμένης έγινε με τη χρήση μιας καμπύλης B-Spline, το σημείο από το οποίο θα περάσει το επίπεδο της τομής δίνεται από μια παράμετρο που λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0, 1], με το 0 να δίνει το σημείο έναρξης της εξελιγμένης και το 1 την κεφαλή του οδοντωτού τροχού. Η τομή του οδοντωτού τροχού σε αυτό το επίπεδο συγκρίνεται σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο προκειμένου να υπολογιστούν οι παράμετροι της ποιότητας του. Η διαδικασία υπολογισμού της τραχύτητας παράλληλα στην παρειά, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31 Διαδικασία μέτρησης της απόκλισης του οδοντωτού τροχού κάθετα στην παρειά

3.7 Το λογισμικό HOB3D

Το μοντέλο προσομοίωσης HOB3D συνοδεύεται από ένα πλήρως λειτουργικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη-μοντέλου. Με τη χρήση αυτού του περιβάλλοντος, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει νέα αρχεία δεδομένων προσομοίωσης, να ανακτήσει δεδομένα από προηγούμενες προσομοιώσεις, να παρουσιάσει τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης και να αναλύσει ήδη εκτελεσμένες προσομοιώσεις. Αναλυτικότερα, το περιβάλλον του μοντέλου αποτελείται από τέσσερεις φόρμες κάθε μια από τις οποίες είναι υπεύθυνη για ένα τμήμα εργασιών. Οι χρήστες του λογισμικού έχουν πρόσβαση στις φόρμες με βάση τη σειρά που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32. Αναλυτικότερα αφού ο χρήστης εισέλθει στο πρόγραμμα Autodesk Inventor, επιλέγει το αντίστοιχο πλήκτρο στην κορδέλα (Ribbon) του προγράμματος για να εισέλθει στην κύρια φόρμα του περιβάλλοντος του προγράμματος HOB3D. Από αυτή τη φόρμα ο χρήστης έχει πρόσβαση στις υπόλοιπες φόρμες του προγράμματος, όπως η φόρμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων, δυνάμεων κοπής, η φόρμα δημιουργίας αναφορών, η φόρμα υπολογισμού της ποιότητας οδοντωτών τροχών και η φόρμα προεπεξεργαστή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.32 Διάγραμμα χρήσης του περιβάλλοντος HOB3D

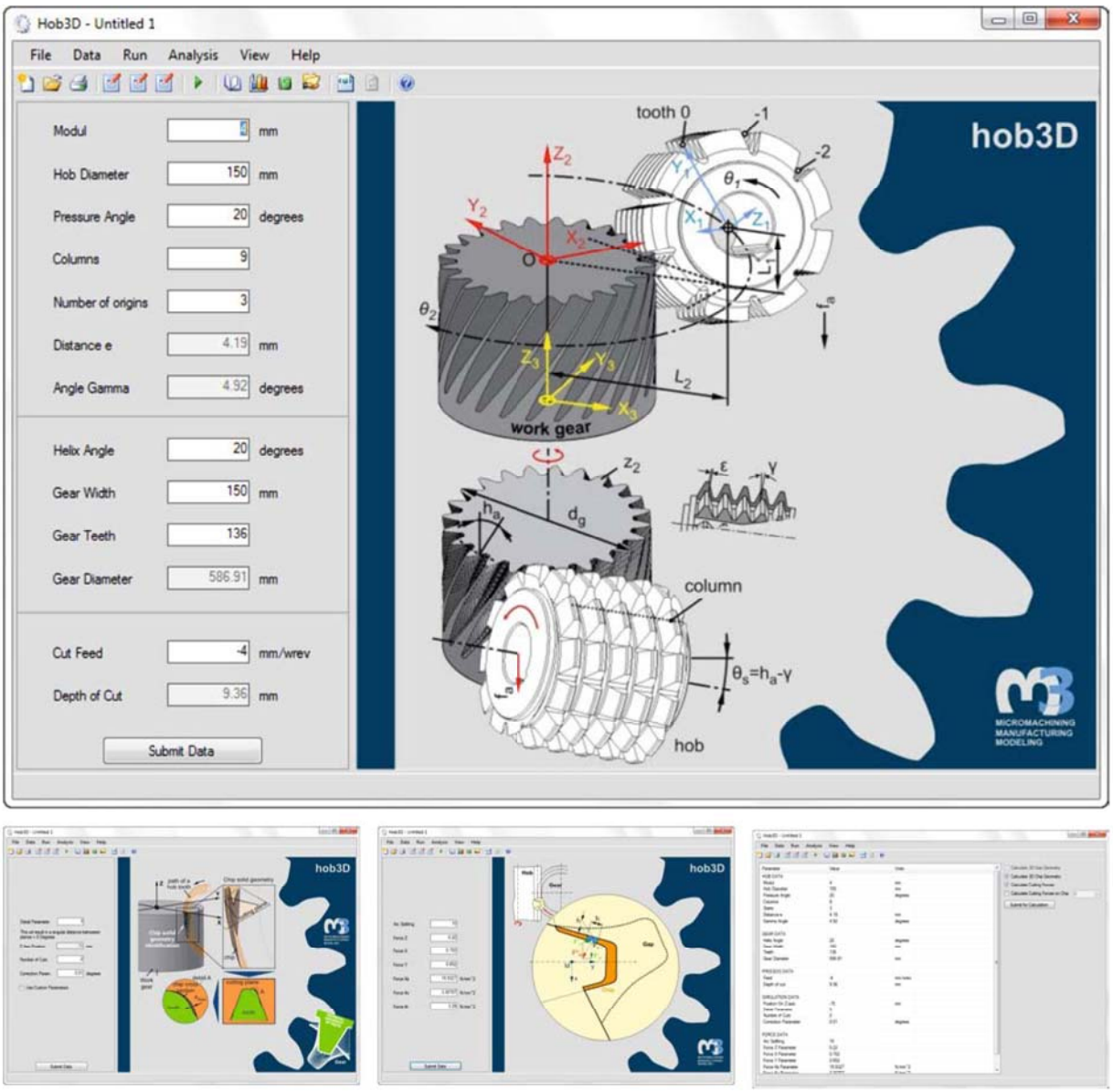
3.7.1 Κύρια φόρμα του προγράμματος

Η πρόσβαση στην κύρια φόρμα του προγράμματος γίνεται μέσα από το περιβάλλον του Inventor επιλέγοντας το αντίστοιχο στοιχείο στην κορδέλα των πρόσθετων εφαρμογών του προγράμματος. Με τη χρήση της κύριας φόρμας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν οι εξής λειτουργίες:

- Δημιουργία νέου αρχείου προσομοίωσης,
- Άνοιγμα εκτελεσμένης προσομοίωσης,
- Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης,
- Πρόσβαση στις φόρμες υπόλοιπες φόρμες του λογισμικού
- Εποπτεία της προόδου της προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 3.33 παρουσιάζονται τα τέσσερα παράθυρα τα οποία εμφανίζονται στην κύρια φόρμα κατά την εισαγωγή των δεδομένων της προσομοίωσης. Τα δεδομένα αυτά αφορούν

τις παραμέτρους του κοπτικού εργαλείου και του παραγόμενου οδοντωτού τροχού, τις παραμέτρους της προσομοίωσης καθώς και τους συντελεστές των δυνάμεων κοπής. Σε όλα τα δεδομένα δίνονται αρχικές τιμές με τις οποίες μπορεί να εκτελεστεί άμεσα μια προσομοίωση. Το πρόγραμμα διαθέτει έλεγχο της εγκυρότητας των τιμών έτσι ώστε να μην μπορεί να εκτελεστεί προσομοίωση με δεδομένα τα οποία δεν έχουν λογική, όπως αρνητικές τιμές ή/και δεκαδικές τιμές και χαρακτήρες.



Σχήμα 3.33 Φόρμα εισαγωγής των δεδομένων της προσομοίωσης

Αναλυτικότερα:

- Στο πρώτο παράθυρο ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα του κοπτικού εργαλείου, του οδοντωτού τροχού και των συνθηκών κατεργασίας. Για το κοπτικό εργαλείο τα δεδομένα αυτά είναι το μέτρο της οδόντωσης, η εξωτερική διάμετρος, η γωνία πίεσης και ο αριθμός των αρχών. Τα δεδομένα του οδοντωτού τροχού περιλαμβάνουν τη γωνία ελίκωσής του, το πλάτος του και τον αριθμό των δοντιών του. Τέλος, τα δεδομένα των συνθηκών κατεργασίας περιλαμβάνουν την αξονική

πρόωση και το βάθος κοπής. Αν η πρόωση είναι θετική τότε η κατεργασία εκτελείται με την ομόρροπη στρατηγική, ενώ στη περίπτωση της αρνητικής πρόωσης εκτελείται η κατεργασία με την αντίρροπη στρατηγική. Με βάση τις τιμές στις παραπάνω παραμέτρους, υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα η απόσταση ε, η γωνία ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου, η διάμετρος του παραγόμενου οδοντωτού τροχού και το βάθος κοπής. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να τροποποιηθούν από το χρήστη εφόσον το επιθυμεί.

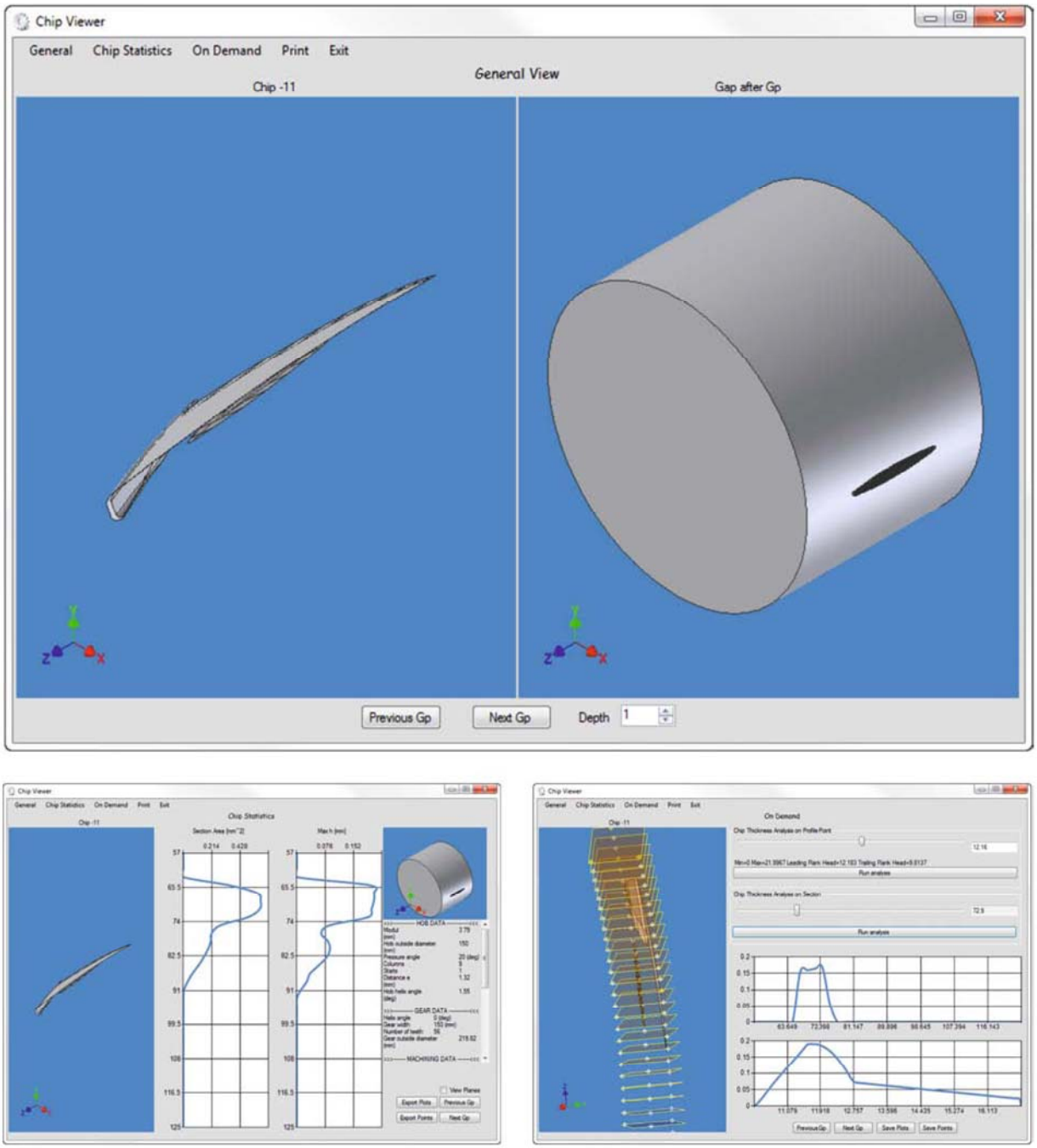
- Στο παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων της προσομοίωσης, ο χρήστης εισάγει το γωνιακό βήμα της προσομοίωσης, την αρχική απόσταση οδοντωτού τροχού - κοπτικού εργαλείου στο κατακόρυφο επίπεδο και τον αριθμό των περασμάτων που θα εκτελεστούν.
- Στο παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής εισάγονται δεδομένα για τη διακριτοποίηση που θα γίνει σε κάθε τομή του αποβλίττου σαν πολλαπλάσιο του μήκους του τόξου του κοπτικού εργαλείου, οι ειδικές αντιστάσεις κοπής και οι συντελεστές του κατεργαζόμενου υλικού.
- Στο τελευταίο παράθυρο παρουσιάζονται συνοπτικά τα δεδομένα της προσομοίωσης. Επιπλέον σε αυτό το παράθυρο είναι δυνατή η επιλογή μιας προσομοίωσης για εκτέλεση. Η προσομοίωση είναι δυνατό να αφορά τον υπολογισμό της γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού, τον υπολογισμό των στερεών απαραμόρφωτων αποβλίττων και τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, σε μία ή σε όλες τις θέσεις κύλισης.

3.7.2 Φόρμα παρουσίασης αποτελεσμάτων

Στη φόρμα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τόσο σε τρισδιάστατη μορφή όσο και σε μορφή γραφημάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου και το εμβαδό της διατομής του σε διαδοχικές θέσεις περιστροφής. Η φόρμα αυτή είναι προσβάσιμη μέσα από την κύρια φόρμα του προγράμματος και αποτελείται από τρία παράθυρα τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.34 και τα οποία είναι:

- Το πρώτο παράθυρο της φόρμας όπου παρουσιάζονται, στο μεν αριστερό μέρος η γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίττου σε μία θέση κύλισης, ενώ στο δε δεξιό το αυλάκι του οδοντωτού τροχού μετά από αυτή τη θέση κύλισης. Με τα κουμπιά στο κάτω μέρος του παραθύρου ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τη θέση κύλισης η οποία προβάλλεται. Τα δυο στερεά τα οποία προβάλλονται είναι δυνατόν να περιστραφούν και να μεγεθυνθούν κατά βούληση από το χρήστη.
- Το δεύτερο παράθυρο όπου παρουσιάζονται στατιστικά σχετικά με τα χαρακτηριστικά του αποβλίττου. Πιο συγκεκριμένα το αριστερό σχήμα παρουσιάζει την εξέλιξη του μέγιστου πάχους του αποβλίττου κατά τη διάρκεια της κοπής μιας θέσης κύλισης, ενώ το δεξιό παρουσιάζει την εξέλιξη του εμβαδού διατομής του αποβλίττου στο επίπεδο της επιφάνειας αποβλίττου κατά τη διάρκεια της κοπής. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να αποθηκευτούν ως εικόνες ή ως αρχεία κειμένου. Στο αριστερό μέρος του παραθύρου παρουσιάζεται η τρισδιάστατη μορφή του αποβλίττου, ενώ σε αυτήν μπορούν να παρουσιαστούν και τα επίπεδα στα οποία γίνεται η μέτρηση, τόσο του πάχους του αποβλίττου, όσο και της διατομής του.
- Τέλος, το τρίτο παράθυρο όπου είναι δυνατό να δημιουργηθούν διαγράμματα τα οποία περιγράφουν την εξέλιξη του πάχους του αποβλίττου σε μια θέση της κατατομής του κοπτικού εργαλείου σε όλες τις θέσης περιστροφής μιας θέσης κύλισης, ή την εξέλιξη του πάχους του αποβλίττου σε μια θέση κύλισης. Σε αυτό το

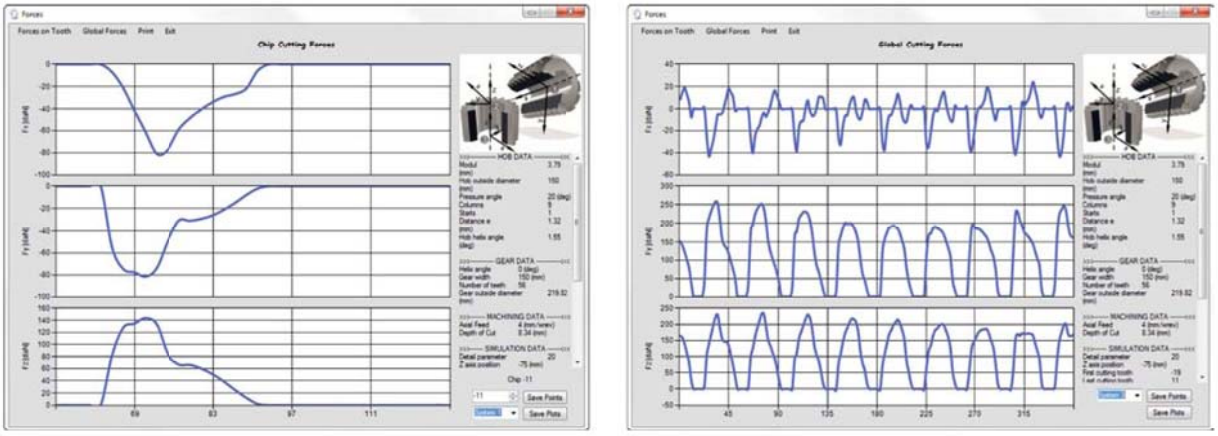
παράθυρο, όπως και στο προηγούμενο, τα διαγράμματα που δημιουργούνται είναι δυνατό να αποθηκευτούν ως εικόνες ή ως αρχεία κειμένου.



Σχήμα 3.34 Φόρμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

3.7.3 Φόρμα παρουσίασης των δυνάμεων κοπής

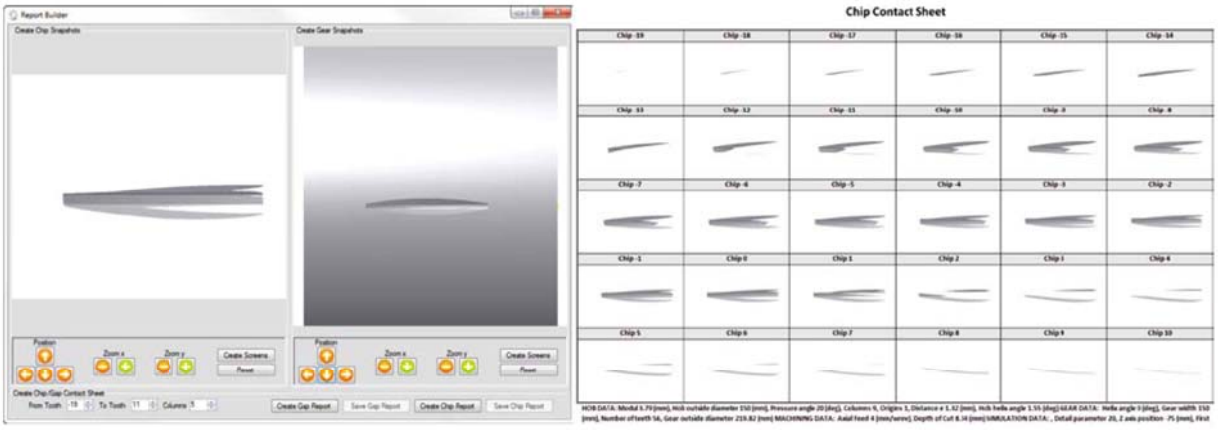
Η φόρμα αυτή δίνει τη δυνατότητα παρουσίασης των δυνάμεων κοπής, τόσο σε κάθε θέση κύλισης, όσο και συνολικά σε όλο το κοπτικό εργαλείο. Η φόρμα αυτή αποτελείται από δύο παράθυρα στα οποία παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής. Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν σε όποιο από τα τρία συστήματα συντεταγμένων επιθυμεί ο χρήστης και είναι δυνατό να αποθηκευτούν είτε σε αρχείο κειμένου, είτε σε μορφή εικόνας. Τα δύο αυτά παράθυρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.35.



Σχήμα 3.35 Φόρμα παρουσίασης των δυνάμεων κοπής

3.7.4 Φόρμα δημιουργίας αναφορών

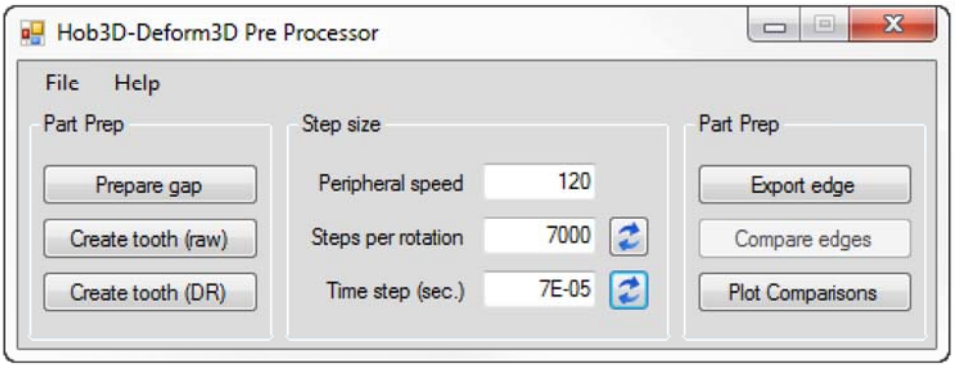
Η φόρμα αυτή σκοπό έχει τη δημιουργία αυτόματων αναφορών σχετικά με τις γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων και του αυλακιού του οδοντωτού τροχού. Για να δημιουργηθούν οι αναφορές αυτές, ο χρήστης επιλέγει το παράθυρο θέασης το οποίο επιθυμεί από τη φόρμα, που παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.36, τόσο για το απόβλιττο, όσο και για το αυλάκι και η φόρμα αυτόματα δημιουργεί τις εικόνες οι οποίες απαιτούνται για τη δημιουργία της αναφοράς. Η τελική αναφορά παρουσιάζεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 3.36.



Σχήμα 3.36 Φόρμα δημιουργίας αναφορών

3.7.5 Φόρμα προεπεξεργαστή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

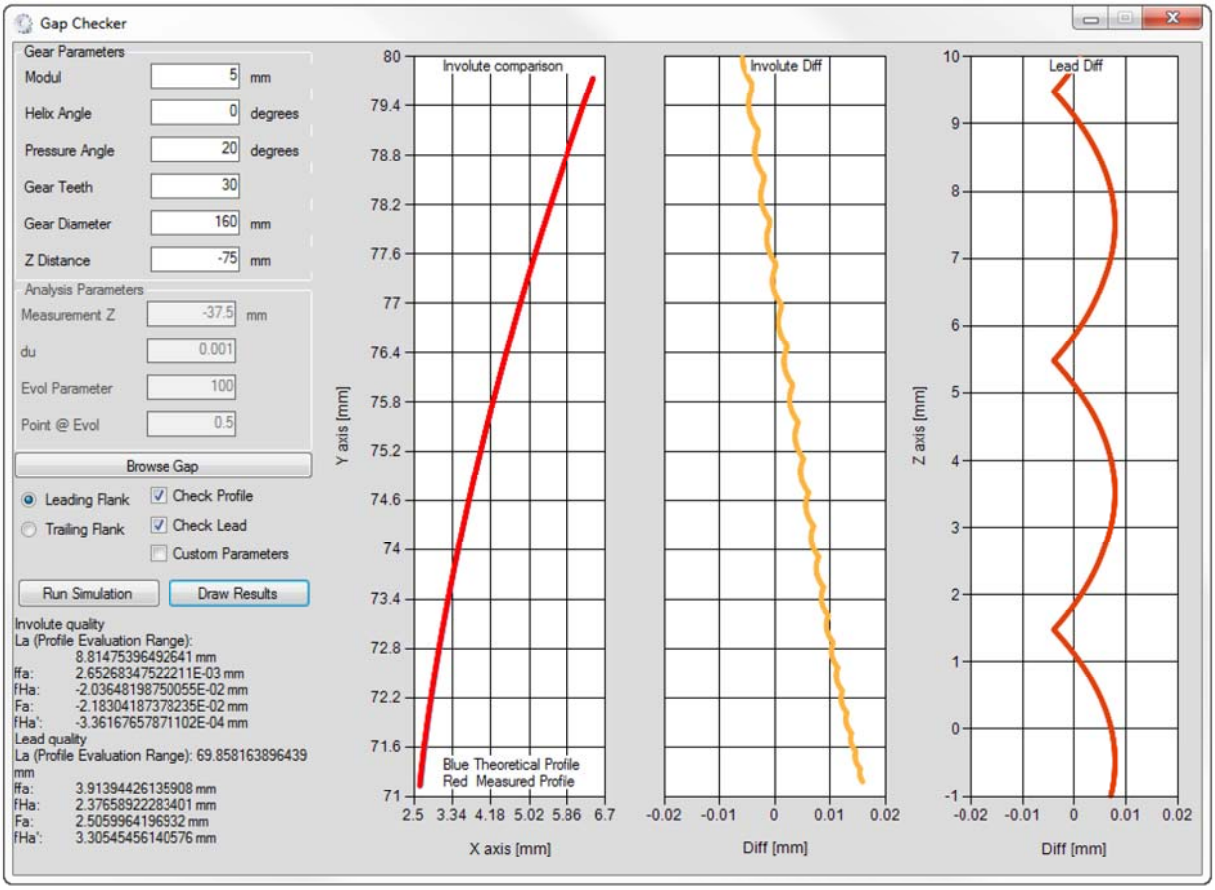
Με τη χρήση αυτής της φόρμας, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.37, ο χρήστης προετοιμάζει τα δεδομένα με σκοπό την ευκολότερη εισαγωγή τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της ροής του αποβλίττου μέσα στο αυλάκι του οδοντωτού τροχού. Ο χρήστης με τη βοήθεια αυτής της φόρμας είναι δυνατόν να εξάγει σε μορφή stl, τόσο τη γεωμετρία του αυλακιού, όσο και του κοπτικού εργαλείου, να υπολογίσει τον απαιτούμενο αριθμό βημάτων για συγκεκριμένο χρονικό βήμα προσομοίωσης και να εξάγει τις συντεταγμένες της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 3.37 Φόρμα προετοιμασίας των δεδομένων του προεπεξεργαστή

3.7.6 Φόρμα υπολογισμού της ποιότητας οδοντωτών τροχών

Με τη χρήση αυτής της φόρμας (Σχήμα 3.38) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει μετρήσεις της ποιότητας των οδοντωτών τροχών που δημιουργήθηκαν με το μοντέλο προσομοίωσης HOB3D. Στα αριστερά της φόρμας ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα δεδομένα του οδοντωτού τροχού που θα εξετασθεί και τις παραμέτρους της μέτρησης. Μετά το τέλος της προσομοίωσης, στα δεξιά της φόρμας παρουσιάζονται τρία διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν την πρότυπη και τη μετρημένη εξελιγμένη, τη διαφορά μεταξύ των δύο καθώς και την τραχυμέτρηση στο επίπεδο κάθετα στην παρειά του οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 3.38 Φόρμα υπολογισμού της ποιότητας των οδοντωτών τροχών.

4 Επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης HOB3D

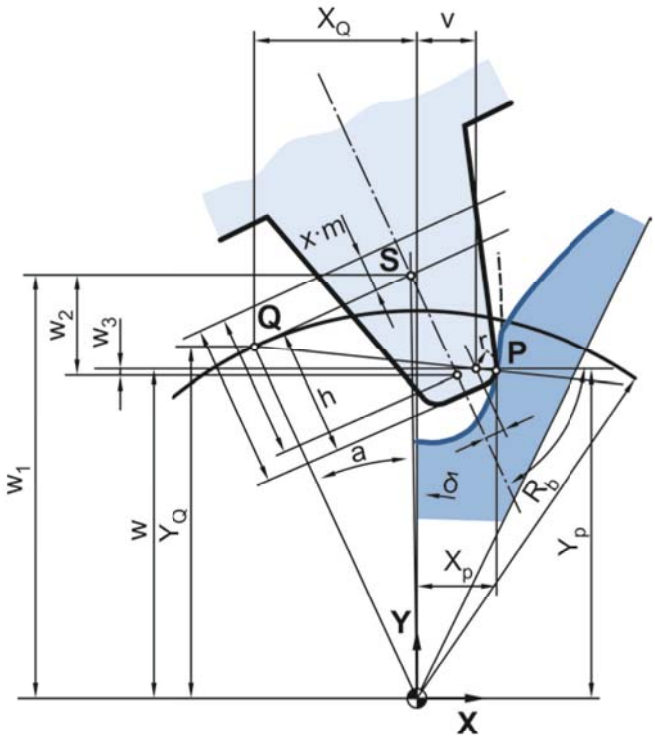
Για την επαλήθευση της ορθότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν, τόσο πειραματικά αποτελέσματα, όσο και αναλυτικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία. Η διαδικασία επαλήθευσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο έγινε ο έλεγχος της παραγόμενης οδόντωσης σε σχέση με τη θεωρητική μορφή του δοντιού του οδοντωτού τροχού καθώς και σε σχέση με μετρημένα πειραματικά δεδομένα, στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε έλεγχος των υπολογιζόμενων δυνάμεων κοπής σε σχέση με αντίστοιχες μετρημένες.

4.1 Επαλήθευση του αυλακιού της παραγόμενης οδόντωσης

Για την επαλήθευση της παραγόμενης οδόντωσης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της εξελιγμένης καμπύλης σε συνδυασμό με τους τύπους υπολογισμού της γεωμετρίας του ποδιού του δοντιού που παρουσιάστηκαν από τον Petri [48-51]. Η διαδικασία παραγωγής της μορφής της κατατομής αναφοράς γίνεται σε δύο βήματα:

- Στο πρώτο βήμα κατασκευάζεται η εξελιγμένη καμπύλη με βάση τις γνωστές σχέσεις από το σημείο αρχής της, στον κύκλο μορφής, μέχρι και τον κύκλο κεφαλής.
- Στο δεύτερο βήμα κατασκευάζεται η καμπύλη του ποδιού του δοντιού, από το σημείο αρχής της εξελιγμένης μέχρι τον κύκλο ποδιού.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται αυτές οι δυο καμπύλες καθώς και οι σχέσεις που τις περιγράφουν.



Σημείο έναρξης της εξελιγμένης

$$X_P=-R_b\cdot P_{s1}+P_{s2}+\frac{r}{\sqrt{1+P_3^2}}$$

$$Y_P=R_b\cdot P_{c1}-P_{c2}+\frac{r\cdot P_3}{\sqrt{1+P_3^2}}$$

όπου

$$P_{s1}=\sqrt{1+\tan^2 a}\cdot \sin\left[\frac{180}{\pi}(\tan a-a)\right]$$

$$P_{c1}=\sqrt{1+\tan^2 a}\cdot \cos\left[\frac{180}{\pi}(\tan a-a)\right]$$

$$P_{s2}=(y_r-x\cdot m_n)\cdot \sin a+x_r\cdot \cos a$$

$$P_{c2}=(y_r-x\cdot m_n)\cdot \cos a-x_r\cdot \sin a$$

$$P_3=\frac{R_b\cdot(\cos a-P_{c1})+P_{c2}}{R_b\cdot(\sin a-P_{s1})+P_{s2}}$$

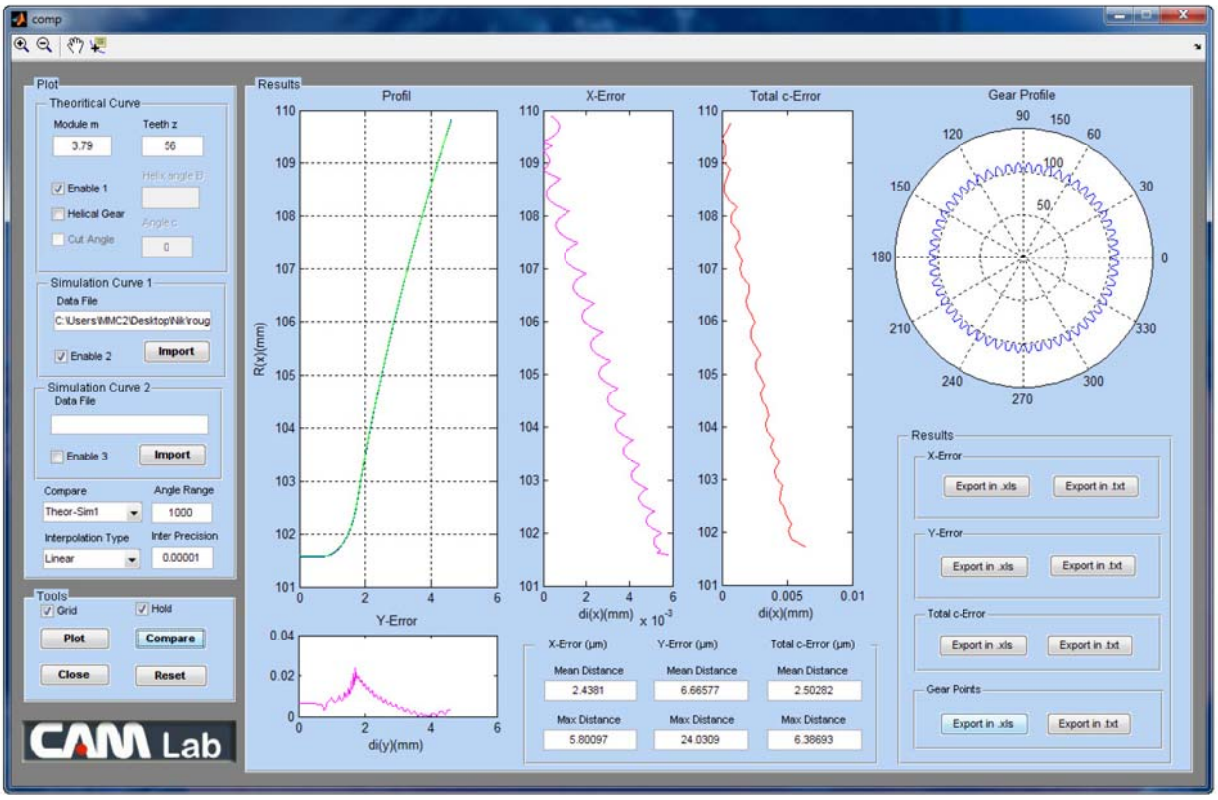
Εξελιγμένη

$$X_{inv}=R_b\cdot(\cos a+a\cdot \sin a)$$

$$Y_{inv}=R_b\cdot(\sin a+a\cdot \cos a)$$

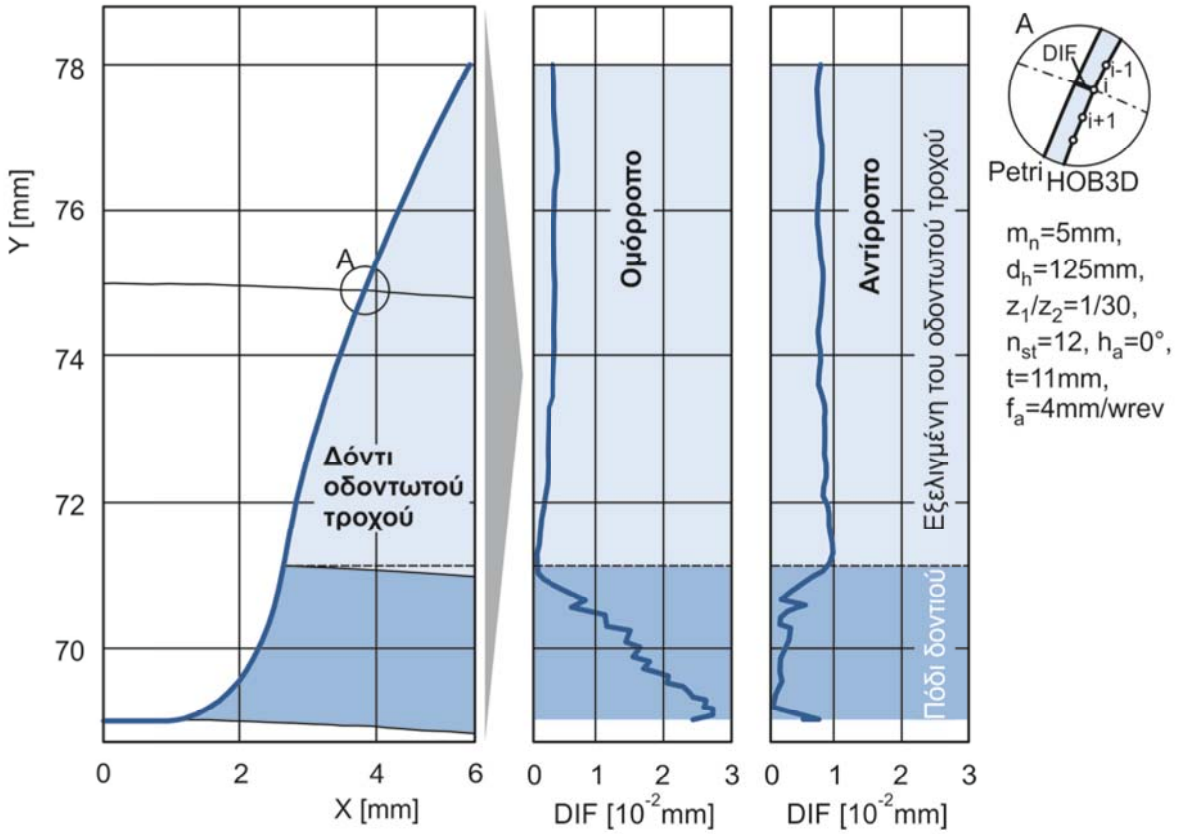
Σχήμα 4.1 Υπολογισμός της εξελιγμένης καμπύλης και του σημείου αρχής της

Η επαλήθευση της μορφής του αυλακιού του οδοντωτού τροχού έγινε με τη χρήση προγράμματος που αναπτύχθηκε και το οποίο χρησιμοποιεί αυτές τις σχέσεις. Η εφαρμογή αυτή παίρνει ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες του αυλακιού μιας οποιασδήποτε οδόντωσης και τις συγκρίνει με τις συντεταγμένες ενός πρότυπου αυλακιού με ίδιο μέτρο οδόντωσης και αριθμό δοντιών. Το περιβάλλον αυτής της εφαρμογής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Στα αριστερά του παραθύρου εισάγονται τα δεδομένα του οδοντωτού τροχού και επιλέγονται τα αρχεία προς σύγκριση σε μορφή αρχείου κειμένου. Στο δεξιό μέρος του σχήματος εμφανίζονται τρία διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τις δύο κατατομές προς σύγκριση, το αποτέλεσμα της σύγκρισης. Αναλυτικότερα το πρόγραμμα υπολογίζει τη θεωρητική κατατομή του αυλακιού και συγκρίνει τα σημεία της με αυτά της κατατομής προς έλεγχο, υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο τα σφάλματα στους άξονες X και Y. Για όλα τα σημεία της κατατομής προς έλεγχο υπολογίζεται ο κύκλος που ορίζει με βάση το σημείο 0 και υπολογίζεται η απόσταση των δύο κατατομών ως το μήκος του τόξου του κύκλου (c-error).



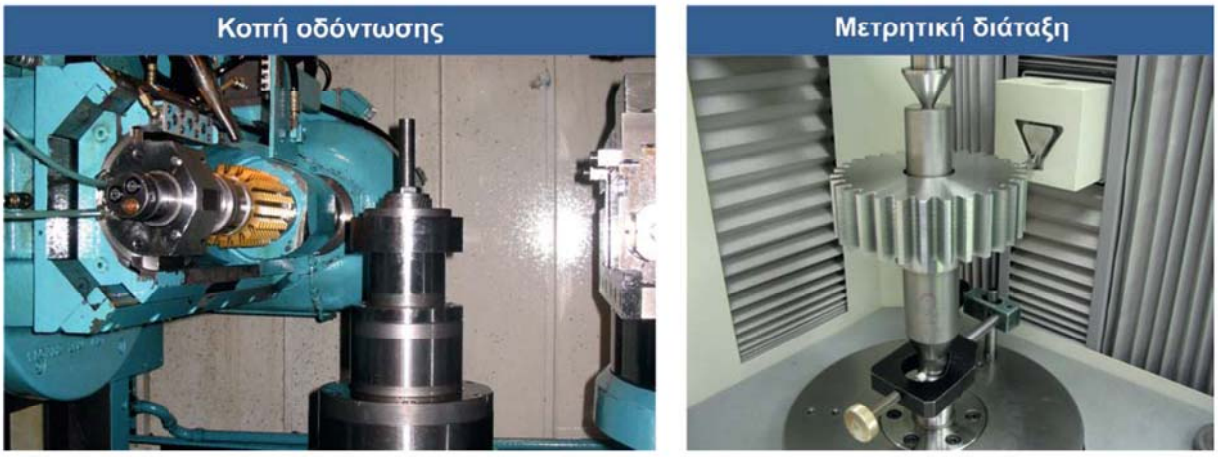
Σχήμα 4.2 Περιβάλλον προγράμματος ελέγχου της παραγόμενης οδόντωσης

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης ενός πρότυπου αυλακιού με ένα αυλάκι που παράγεται από το πρόγραμμα προσομοίωσης, τόσο για την εισερχόμενη όσο και για την εξερχόμενη παρειά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η κατατομή του αυλακιού που προκύπτει από την προσομοίωση διαφέρει ελάχιστα από το πρότυπο αυλάκι, τόσο για την ομόρροπη, όσο και για την αντίρροπη στρατηγική. Η διαφορά μεταξύ των δύο κατατομών στην περιοχή της εξελιγμένης του οδοντωτού τροχού στην περίπτωση της ομόρροπης στρατηγικής είναι της τάξης των 2.5 μm ενώ στην αντίρροπη στρατηγική ανεβαίνει στα 10μm. Το σφάλμα προσομοιωμένου και θεωρητικού αυλακιού, τόσο για την περίπτωση της ομόρροπης κατεργασίας όσο και για αυτή της αντίρροπης οφείλεται σε μία σειρά από παράγοντες που περιλαμβάνουν την κινηματική της κατεργασίας, τη μορφή του κοπτικού εργαλείου και τις συνθήκες της κατεργασίας.



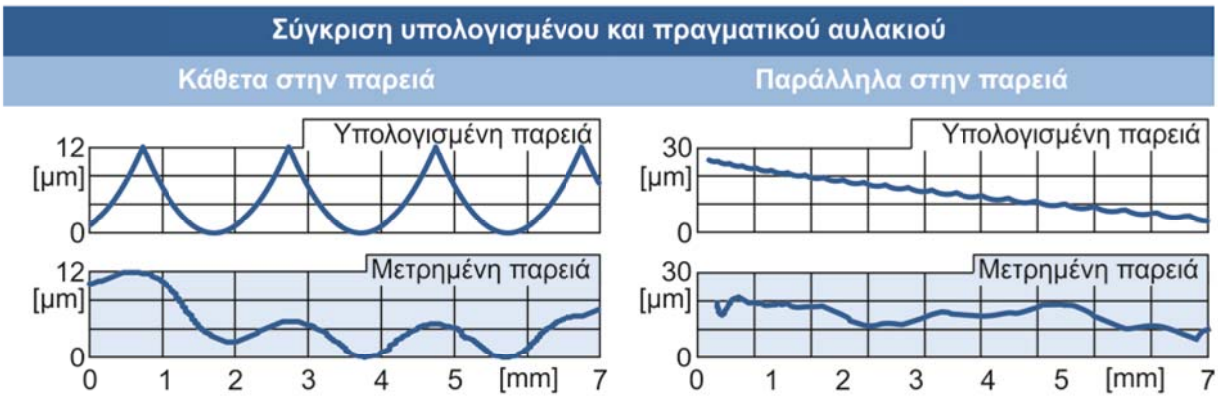
Σχήμα 4.3 Σύγκριση προσομοιωμένου και θεωρητικού αυλακιού

Εκτός από την επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση της θεωρητικής μορφής του αυλακιού, έγινε και επαλήθευση του κώδικα προσομοίωσης με τη χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων κοπής οδοντωτού τροχού. Τα πειράματα εκτελέστηκαν στην εργαλειομηχανή κοπής οδοντώσεων Pfauter του Πολυτεχνείου του Ιασίου. Η ποιότητα του οδοντωτού τροχού που κατασκευάστηκε αξιολογήθηκε με τη χρήση ειδικής μηχανής μέτρησης της ποιότητας οδοντωτών τροχών Sigma V3 της M&M. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων και τη μέτρηση της ποιότητας του οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Εξοπλισμός εκτέλεσης και μέτρησης των πειραμάτων επαλήθευσης

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης της υπολογισμένης και της μετρημένης παρειάς, τόσο κάθετα, όσο και παράλληλα σε αυτή.



m_n=5mm, α_n=20°, h_a=0°, z_1/z_2 =1/30, f_a=4mm/wrev, n_{st}=17, d_h=125mm, v =48m/min, Ομόρροπο φραιζάρισμα

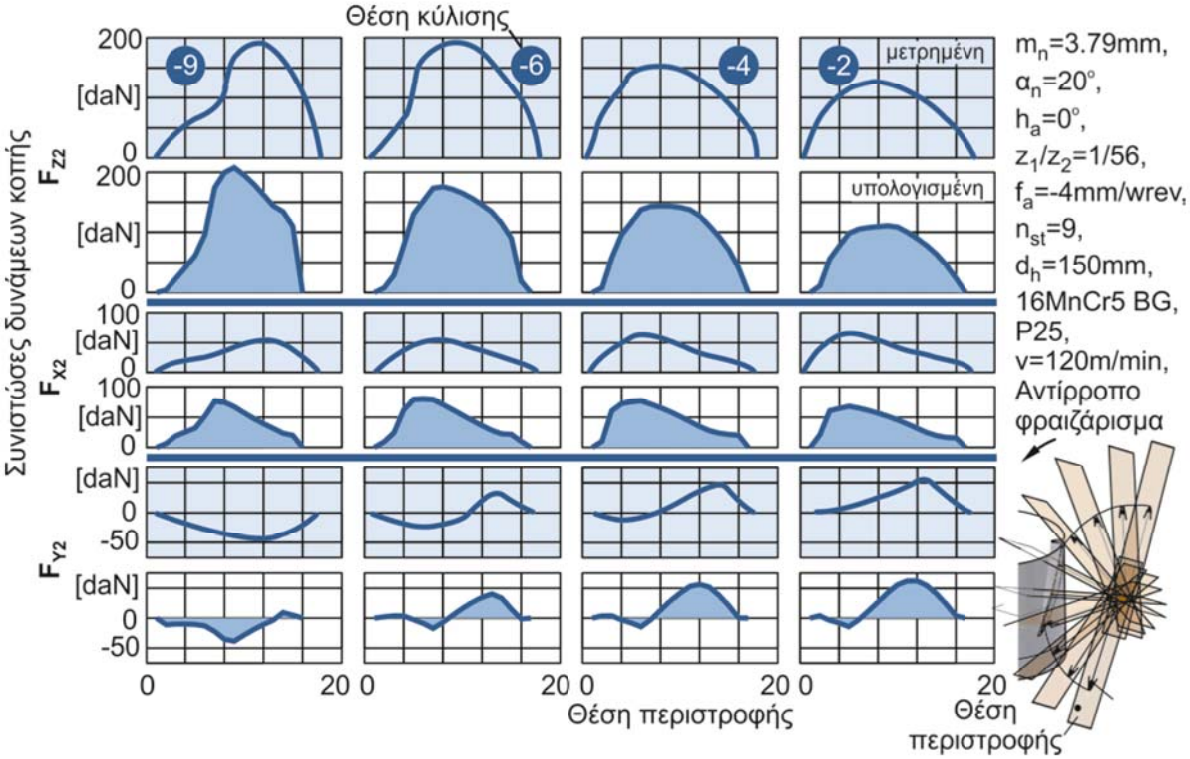
Σχήμα 4.5 Πειραματική επαλήθευση παραγόμενου οδοντωτού τροχού

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η υπολογισμένη αυλάκωση προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίστοιχη μετρημένη στο επίπεδο κάθετα στην παρειά. Ωστόσο, στο επίπεδο παράλληλα σε αυτήν, υπάρχει κάποια απόκλιση με την υπολογισμένη κατατομή να προσεγγίζει τη μέση τιμή του πραγματικού αυλακιού. Αυτό το γεγονός οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα κατά την ευθυγράμμιση, είτε του κοπτικού εργαλείου, είτε του τεμαχίου.

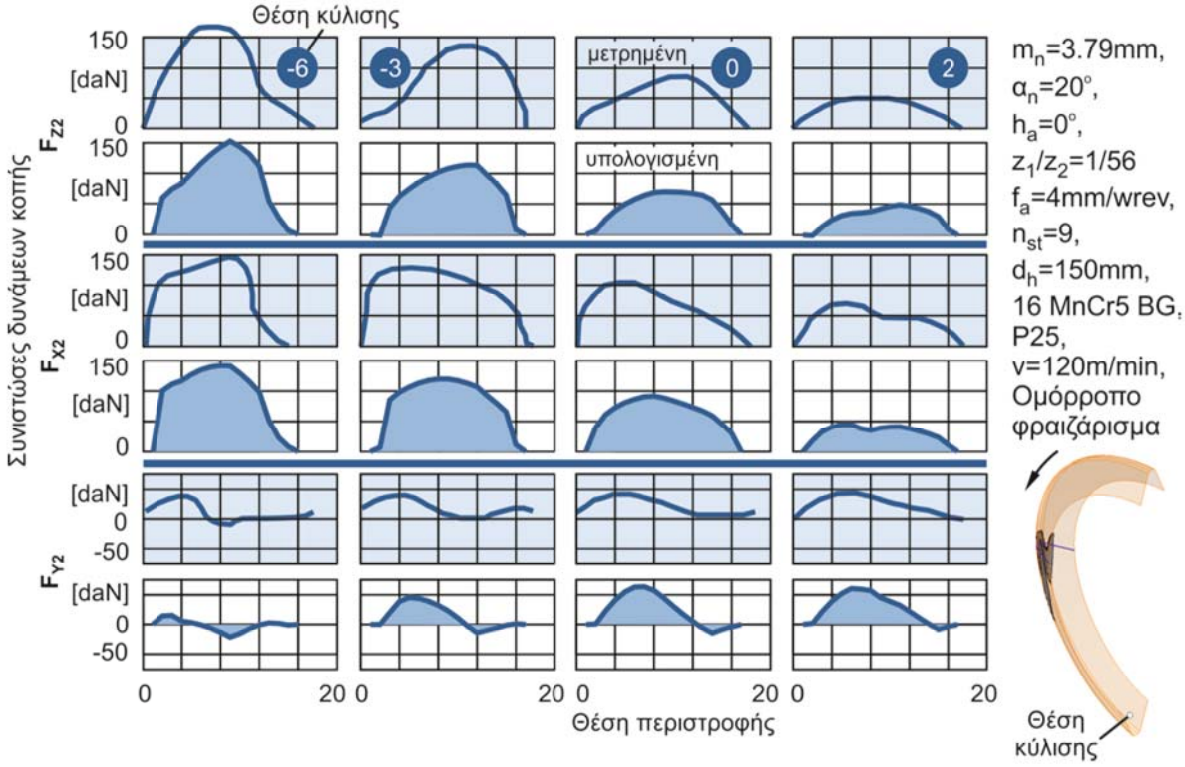
4.2 Επαλήθευση του κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

Ο κώδικας υπολογισμού των δυνάμεων κοπής επαληθεύτηκε με τη χρήση δύο διαφορετικών ομάδων πειραμάτων. Τα πρώτα αφορούσαν τις δυνάμεις κοπής για συγκεκριμένες θέσεις κύλισης, τόσο για ομόρροπο όσο και για αντίρροπο φραιζάρισμα, ενώ η δεύτερη ομάδα περιελάμβανε τις συνολικές δυνάμεις κοπής κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου.

Ο Μπουζάκης [11] στην εργασία του εκτέλεσε πειράματα κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση με ένα δόντι σε ανθρακούχο χάλυβα 16MnCr5 BG, μετρώντας τις δυνάμεις κοπής σε μια σειρά θέσεων κύλισης στο σύστημα συντεταγμένων του τεμαχίου. Τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα επαλήθευσης για τον κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής του HOB3D, τόσο όσον αφορά τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, όσο και τη διαδικασία μετασχηματισμού τους από το σύστημα συντεταγμένων της κόψης στο σύστημα συντεταγμένων του τεμαχίου (2). Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες από το HOB3D δυνάμεις κοπής σε τέσσερεις θέσεις κύλισης, για τα δεδομένα κατεργασίας τα οποία φαίνονται στο δεξιό μέρος του σχήματος. Οι δυνάμεις κοπής που παρουσιάζονται μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν στο περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού (2).



Σχήμα 4.6 Σύγκριση υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων κοπής στο αντίρροπο φραιζάρισμα μετρημένες στο περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού



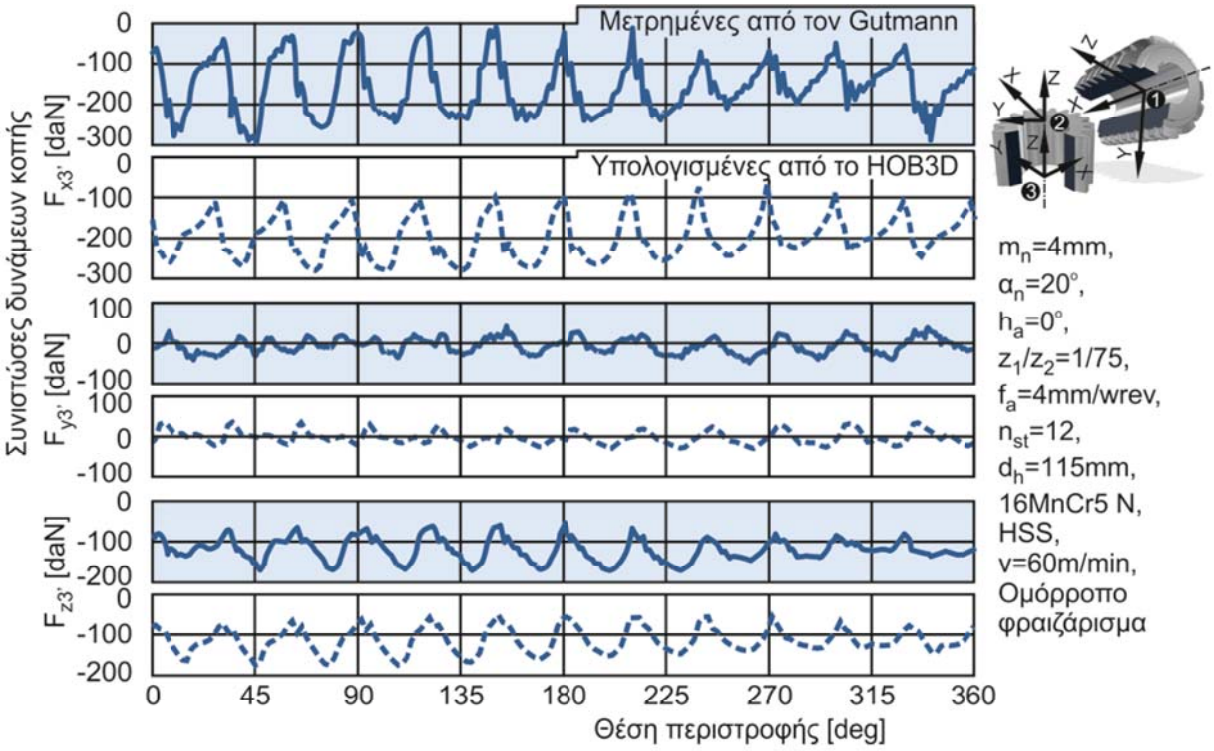
Σχήμα 4.7 Σύγκριση υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων κοπής στο ομόρροπο φραιζάρισμα μετρημένες στο περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού

Όπως είναι φανερό, το μοντέλο προβλέπει με ακρίβεια τόσο το μέγεθος όσο και τη μορφή των δυνάμεων κοπής, σε όλες τις θέσεις κύλισης. Αντίστοιχα με την περίπτωση του αντίρροπου φραιζαρίσματος, τα αποτελέσματα της ομόρροπης κατεργασίας, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7, δείχνουν επίσης την αξιοπιστία του μοντέλου όσον αφορά την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής. Ειδικά στις περιπτώσεις των θέσεων κύλισης -6 και 2, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σχεδόν ταυτόσημα με τα μετρημένα.

Ο Gutmann [15] μέτρησε τις συνολικές δυνάμεις κοπής κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, προκειμένου να επαληθεύσει το μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων κοπής που υλοποίησε. Τα αποτελέσματα του περιελάμβαναν τις τρεις συνιστώσες της δύναμης κοπής κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, οι οποίες μετρήθηκαν σε ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο έχει τον Z άξονα παράλληλο στον άξονα του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία, τον άξονα X να είναι παράλληλος με το μέσο του αυλακιού αλλά να δείχνει προς την αντίθετη κατεύθυνση και τον Y να είναι κάθετος στους προηγούμενους δύο. Το σύστημα αυτό παραμένει σταθερό κατά την περιστροφή του οδοντωτού τροχού.

Το HOB3D υποστηρίζει και αυτό ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων, το σύστημα συντεταγμένων του HOB3D έχει και αυτό τον Z άξονα παράλληλο στο άξονα του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία, τον άξονα X να δείχνει προς την το αυλάκι και τον Y να είναι κάθετος στους προηγούμενους δύο.

Συγκρίνοντας τα δύο αυτά συστήματα συντεταγμένων παρατηρείται ότι είναι ταυτόσημα εκτός από τις φορές των αξόνων X και Z. Έτσι ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων 3' το οποίο ακολουθεί τη θεώρηση του Gutmann. Η σύγκριση υπολογισμένων δυνάμεων κοπής από το HOB3D και των μετρημένων δυνάμεων κοπής από τον Gutmann στο σταθερό σύστημα συντεταγμένων του Gutmann παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Σύγκριση υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων κοπής

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, ο κώδικας υπολογισμού των δυνάμεων κοπής του HOB3D μπορεί να προβλέψει με αρκετά καλή ακρίβεια τόσο τη μορφή, όσο και το μέγεθος των δυνάμεων κοπής. Οι διαφορές μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων κοπής σε διάφορα σημεία των διαγραμμάτων οφείλονται σε παράγοντες οι οποίοι δε λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, όπως οι ταλαντώσεις στο σύστημα κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου, η σύγκρουση των υποαποβλίττων στο χώρο του αυλακιού, καθώς και σε ανομοιογένεια του κατεργαζόμενου υλικού.

5 Πρόσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι αρκετά διαδεδομένη, τόσο για βιομηχανική, όσο και για ακαδημαϊκή έρευνα. Τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται κατηγοριοποιούνται σε ειδικά προγράμματα σχεδιασμένα για την προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών και σε γενικής χρήσης κώδικες πεπερασμένων στοιχείων. Στη μεν πρώτη κατηγορία εντάσσονται προγράμματα όπως το DEFORM™ από την Scientific Forming Technologies Corporation και το AdvantEdge™ από την Third Wave Systems, ενώ στη δεύτερη, προγράμματα όπως το ABAQUS FEA™ από την Simula Dassault Systemes κ.λπ.. Όσον αφορά τις δυνατότητες κάθε ενός από τα προγράμματα ισχύουν τα εξής:

- Το Deform παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να προσομοιώσει με τη χρήση οδηγών, τις συνήθεις κατεργασίες υλικών, εισάγοντας τη γεωμετρία του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου σε μορφή stl, ενώ επίσης προσομοιώνει και σύνθετες κινηματικές με τη χρήση του προεπεξεργαστή που διαθέτει. Οι παράμετροι οι οποίες είναι δυνατόν να τροποποιηθούν αφορούν την κατεργασία, όπως πρόωση, περιφεριακή ταχύτητα, τριβή, μοντέλα φθοράς του κοπτικού εργαλείου, επικαλύψεις κ.λπ., και τον επιλύτη, όπως μέγεθος του πλέγματος, οριακές συνθήκες κ.λπ.. Η βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος είναι αρκετά εκτενής και υποστηρίζει τη δημιουργία νέων υλικών χρησιμοποιώντας δεδομένα τάσεων-παραμορφώσεων.

- Το AdvantEdge™ είναι λογισμικό το οποίο δημιουργήθηκε για να προσομοιώσει κατεργασίες αφαίρεσης υλικού σε αντίθεση με το Deform™ του οποίου στόχος ήταν η προσομοίωση κατεργασιών διαμόρφωσης και στη συνέχεια στράφηκε προς τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Το AdvantEdge™ είναι και αυτό εξοπλισμένο με οδηγούς για τη δημιουργία των δημοφιλέστερων κατεργασιών αφαίρεσης υλικού στις οποίες ο χρήστης απλά εισάγει τις παραμέτρους της κατεργασίας. Λόγω αυτού του γεγονότος ο χρήστης δεν μπορεί να εισάγει σύνθετες κινηματικές. Όσον αφορά τον έλεγχο της πυκνότητας του πλέγματος αυτός δεν υπάρχει, σε αντίθεση με το Deform™ όπου είναι δυνατό να ορισθούν περιοχές στις οποίες το πλέγμα θα είναι πιο πυκνό σε σχέση με άλλες. Τέλος η βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος είναι αρκετά πλούσια με πληθώρα υλικών για την αεροπορική βιομηχανία, ενώ υποστηρίζει και τη δημιουργία νέων υλικών.

- Τέλος το Abaqus, ως ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης, προσομοιώνει κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, με την προσαρμογή της διαδικασίας επίλυσης του επιλύτη. Το πρόγραμμα δε διαθέτει βιβλιοθήκη κοπτικών εργαλείων όπως τα δύο προηγούμενα προγράμματα, αλλά ούτε και βιβλιοθήκη υλικών. Ο χρήστης του προγράμματος μπορεί να ελέγξει με μεγάλη λεπτομέρεια τα πλέγματα τα οποία δημιουργούνται.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των λογισμικών που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

	Scientific Forming Technologies Corporation	THIRD WAVE SYSTEMS	SIMULIA
Ευκολία χρήσης και προετοιμασίας μιας προσομοίωσης	Ενσωματωμένοι οδηγοί για τις βασικές κατεργασίες. Υπάρχει διαθέσιμη βιβλιοθήκη κοπτικών εργαλείων	Εύκολη ανάπτυξη μιας προσομοίωσης. Υπάρχει βιβλιοθήκη εργαλείων	Απουσία βιβλιοθήκης εργαλείων. Ο έλεγχος του πλέγματος γίνεται με χειροκίνητο τρόπο
Προσομοίωση σύνθετων κινηματικών	Δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων κινηματικών	Δεν υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων κινηματικών	Δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων κινηματικών
Βιβλιοθήκη/ Μοντελοποίηση υλικών	Ενσωματωμένη βιβλιοθήκη	Ενσωματωμένη βιβλιοθήκη	Απουσία βιβλιοθήκης υλικών. Δυνατότητα ορισμού τους από το χρήστη
Προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση	Χρησιμοποιείται προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση με μερικό έλεγχο	Χρησιμοποιείται προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση χωρίς τη δυνατότητα ελέγχου	Δεν υπάρχει ιδιαίτερος έλεγχος της προσαρμόσιμης πλεγματοποίησης
Συνολικός έλεγχος της προσομοίωσης	Υπάρχει κάποιος βαθμός ελέγχου	Επιτρέπονται μικρές αλλαγές	Μεγάλος βαθμός ελέγχου όλων των παραμέτρων και του τρόπου λειτουργίας του επιλύτη

Σχήμα 5.1 Χαρακτηριστικά λογισμικών για τη προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων [52]

5.2 Διαδικασία προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Για την προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Deform. Επιλέχθηκε να ακολουθηθεί η λογική της προσομοίωσης του HOB3D και έτσι το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται γύρω από τον κατεργαζόμενο οδοντωτό τροχό και γύρω από τον άξονα του καθώς προχωρά η κατεργασία. Με αυτόν τον τρόπο, εκτός από το τελικό αυλάκι, μπορεί να συγκριθεί και η τροχιά του εκάστοτε δοντιού. Όσον αφορά τη διαδικασία προετοιμασίας μιας προσομοίωσης, πρέπει να εκτελεσθούν μια σειρά από βήματα, όπως η προετοιμασία του αυλακιού που θα υποστεί κατεργασία, η σωστή τοποθέτησή του, η δημιουργία του κοπτικού εργαλείου και η ορθή εισαγωγή της θέσης και της κινηματικής του, οι παράμετροι του υλικού και οι οριακές συνθήκες.

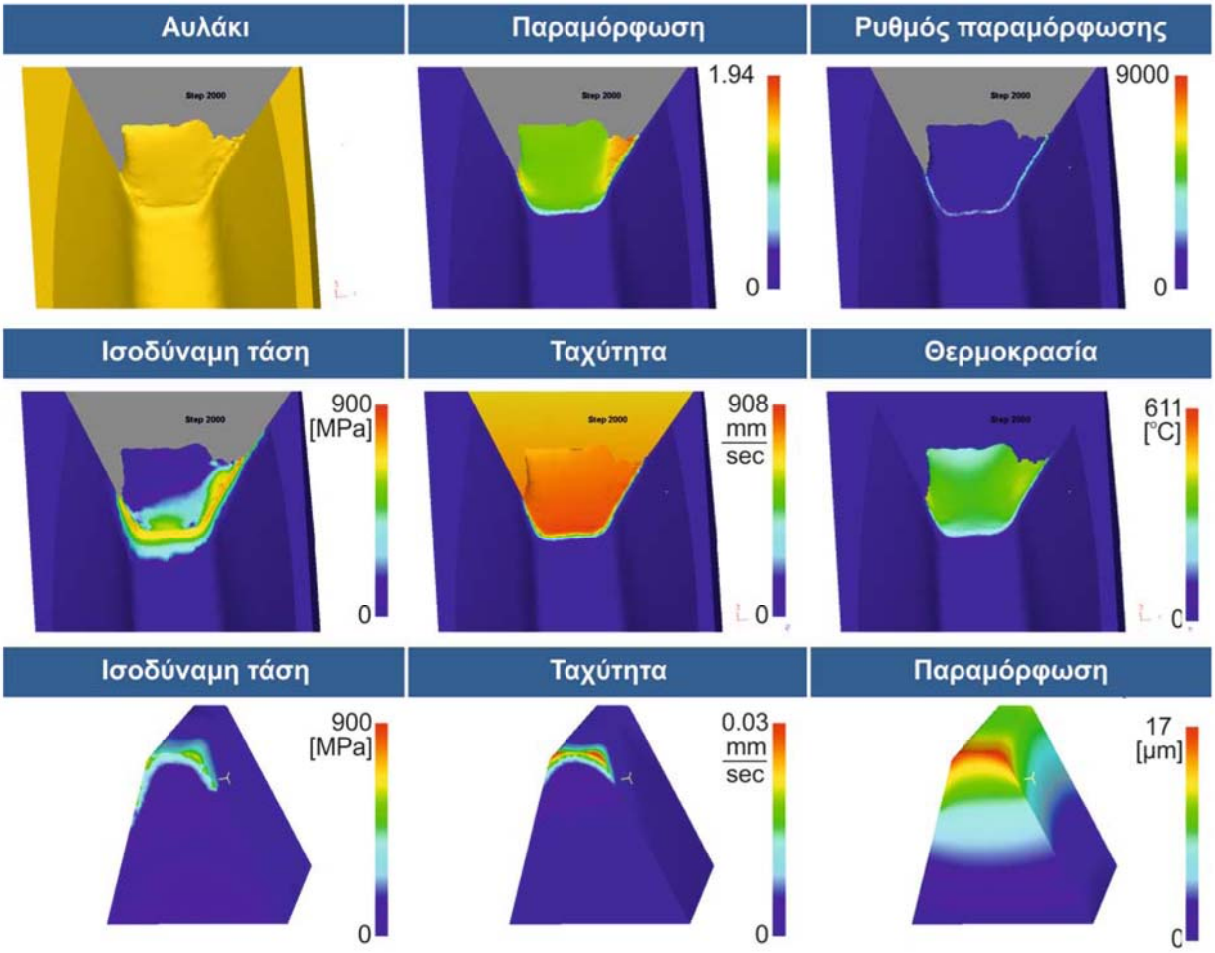
Όλα αυτά τα δεδομένα πρέπει να προετοιμασθούν και να εισαχθούν ορθά στον προεπεξεργαστή του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε η δημιουργία ενός κώδικα ο οποίος θα προετοιμάζει τα δεδομένα, έτσι ώστε να εισάγονται πιο εύκολα, γρήγορα και ορθά στο προεπεξεργαστή του Deform. Η διαδικασία της προσομοίωσης της κατεργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 5.2. Όπως φαίνεται από το σχήμα, αποτελέσματα της προσομοίωσης της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση είναι, εκτός από τα απόβλιττα, οι δυνάμεις κοπής καθώς και οι τάσεις και παραμορφώσεις σε τεμάχιο αλλά και κοπτικό εργαλείο. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν τις τάσεις που αναπτύσσονται στο τεμάχιο, την παραμόρφωση, τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες καθώς και τις ταχύτητες

ροής του αποβλίττου. Επίσης, όσον αφορά το κοπτικό εργαλείο, είναι δυνατό να υπολογιστούν η ισοδύναμη τάση κατά von Misses, η παραμόρφωση του κοπτικού εργαλείου καθώς και ο ρυθμός παραμόρφωσης του.

Hob3D Pre-Processing	Deform	
Τροποποίηση γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού	Εισαγωγή γεωμετρίας τροχού	Εισαγωγή γεωμετρίας εργαλείου
Δημιουργία στερεής γεωμετρίας δοντιού	Πλεγματοποίηση αντικειμένων	Πλεγματοποίηση αντικειμένων
	Εισαγωγή οριακών συνθηκών	Εισαγωγή κινηματικής του εργαλείου
Πορεία δοντιού	Ορισμός υλικού κατεργασίας	Ορισμός υλικού του εργαλείου

Hob3D	Αποτελέσματα		
Γεωμετρία του οδοντωτού τροχού πριν την προς εξέταση Θ.Κ.	Απαραμόρφωτα και παραμορφωμένα απόβλιττα	Δυνάμεις κοπής	Τάσεις/Παραμορφώσεις στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο

Σχήμα 5.2 Διαδικασία προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση



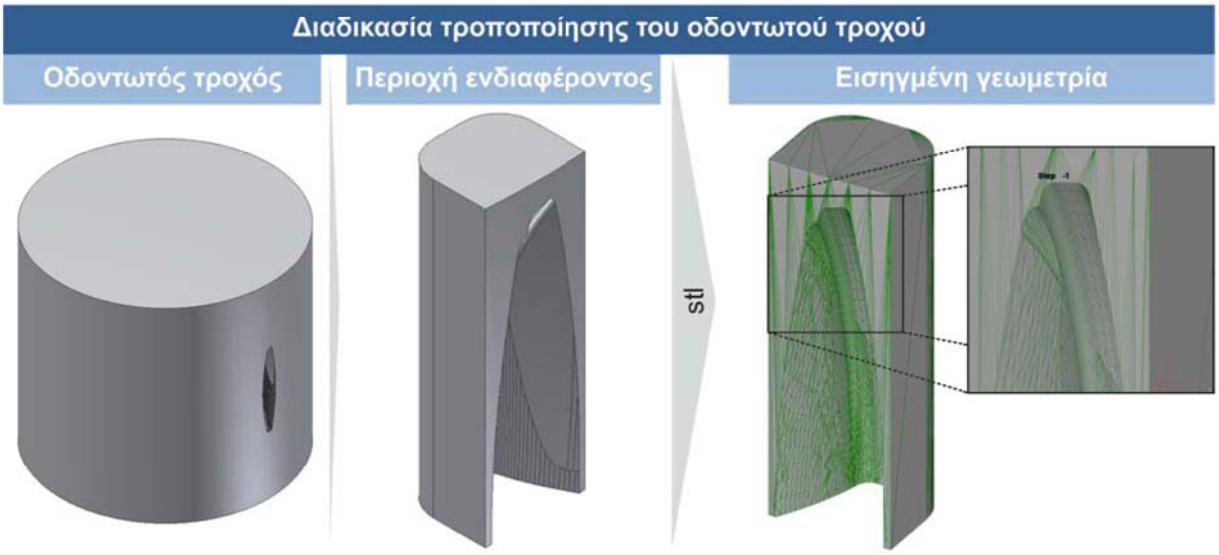
m_n=4mm, α_n=20°, h_a=0°, z_1/z_2=1/40, f_a=4mm/wrev, n_{st}=12, d_h=100mm, v=100m/min, P40, 16MnCr5, Θέση κύλισης: -10, Ομόρροπο φραιζάρισμα

Σχήμα 5.3 Αποτελέσματα προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

Ειδικά το παραγόμενο απαραμόρφωτο απόβλιττο, όπως μπορεί μέσω του λογισμικού των πεπερασμένων στοιχείων να προσδιοριστεί, αποτελεί μία ακόμα διαδικασία επιβεβαίωσης του παραγόμενου από το HOB3D αποβλίττου. Αντίστοιχα, οι δυνάμεις κοπής όπως υπολογίζονται μέσω του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων επιβεβαιώνουν τις υπολογισμένες από το HOB3D δυνάμεις κοπής. Έτσι, μέσω των υπολογισμών των αποβλίττων αλλά και των δυνάμεων κοπής, θα φανεί στη συνέχεια η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του κώδικα υπολογισμού της κινηματικής του φραιζαρίσματος με κύλιση, των αποβλίττων αλλά και των αναπτυσσομένων δυνάμεων κοπής.

Η διαδικασία της προετοιμασίας μιας προσομοίωσης ξεκινά με την επιλογή από το χρήστη της θέσης κύλισης που θα αναλυθεί, ενώ στη συνέχεια εισάγονται δεδομένα όπως το πάχος του δοντιού και το μέγεθος της γωνίας ελευθερίας του δοντιού. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η γεωμετρία του αυλακιού, η οποία χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της κατεργασίας, προέρχεται από την προσομοίωση με τη χρήση του μοντέλου HOB3D, δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή επιπλέον δεδομένων που αφορούν τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο προεπεξεργαστής αναλαμβάνει να αφαιρέσει το τμήμα του οδοντωτού τροχού το οποίο δεν απαιτείται για τη προσομοίωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, έτσι ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν ο αριθμός των απαιτούμενων πεπερασμένων στοιχείων. Το στερεό που προκύπτει συνεχίζει να έχει την αρχή των αξόνων στο ίδιο σημείο με πριν, διευκολύνοντας έτσι την τοποθέτησή του στο Deform. Στη συνέχεια το τροποποιημένο αυλάκι εξάγεται σε μορφή stl, η οποία είναι συμβατή με το Deform.



Σχήμα 5.4 Διαδικασία τροποποίησης του αυλακιού του οδοντωτού τροχού

Στη συνέχεια, δημιουργείται η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου σύμφωνα με την κατατομή αναφοράς κατά DIN 3972, λαμβάνοντας υπόψη την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα γωνία ελευθερίας. Προκειμένου να τοποθετηθεί σωστά το κοπτικό εργαλείο και να κατεργαστεί τη θέση κύλισης που επιλέχθηκε, χρησιμοποιήθηκε η λογική της τοποθέτησης όπως και στο HOB3D, ενώ ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου υπολογίστηκε από τις αντίστοιχες σχέσεις. Στη συνέχεια η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου εξάγεται σε μορφή stl και συνοδεύεται από ένα αρχείο το οποίο περιέχει τα κέντρα περιστροφής καθώς και τις ταχύτητες περιστροφής και μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου.

Με την προετοιμασία των δύο στερεών, κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, και τη δημιουργία του αρχείου που περιέχει τις κινήσεις του κοπτικού εργαλείου ολοκληρώνεται η διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων της προσομοίωσης, ενώ σειρά έχει η εισαγωγή τους στον προεπεξεργαστή του Deform. Για την εισαγωγή των δεδομένων στον προεπεξεργαστή του Deform απαιτείται μία σειρά από έξι βήματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω και αναλύονται στα κεφάλαια 5.2.1-5.2.6:

- Ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης,
- εισαγωγή και πλεγματοποίηση του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού,
- μοντελοποίηση του υλικού προς κατεργασία,
- εισαγωγή και πλεγματοποίηση του κοπτικού εργαλείου,
- μοντελοποίηση του υλικού του κοπτικού εργαλείου,
- εισαγωγή οριακών συνθηκών.

5.2.1 Ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης

Στα διάφορα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις για τη διακριτοποίηση των αντικειμένων που υπόκεινται κατεργασία. Οι πιο δημοφιλείς από αυτές είναι η μέθοδος του Euler και του Lagrange.

- Στην περίπτωση της μεθόδου του Euler, η κίνηση του μέσου γίνεται μέσα από ένα σταθερό πλέγμα, έτσι ένας κόμβος του πλέγματος, καταγράφει τις μεταβλητές κατάστασης όλων των σωματιδίων του αντικειμένου, οι οποίες εισέρχονται στο χώρο τον οποίο περιγράφει ο κόμβος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα ρευστομηχανικής.

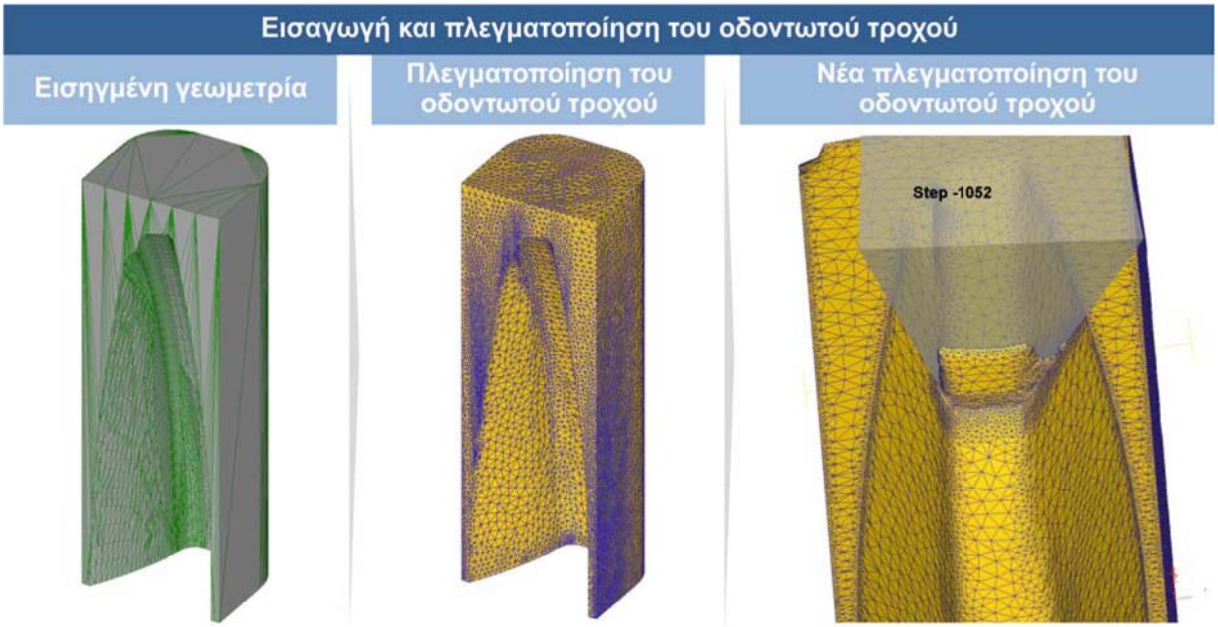
- Η μέθοδος του Lagrange χρησιμοποιεί ένα πλέγμα στο οποίο κάθε κόμβος ακολουθεί τη κίνηση του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του. Έτσι, ένας κόμβος καταγράφει τις μεταβλητές κατάστασης ενός και μόνο σωματιδίου κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του. Η γεωμετρία του πλέγματος σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων απαιτεί αρκετές φορές επαναδιακριτοποιήσεις προκειμένου να ανταπεξέλθει στις αλλαγές στη γεωμετρία του.

Το Deform χρησιμοποιεί τη μέθοδο Updated Lagrangian για τη μοντελοποίηση του υλικού. Στη μέθοδο αυτήν, το υπολογιστικό πλέγμα είναι συνδεδεμένο με τη γεωμετρία του τεμαχίου στην αρχή του προς εξέταση βήματος. Το χρονικό βήμα με βάση το οποίο διακριτοποιείται η κίνηση των επιμέρους στερεών εισάγεται από το χρήστη. Τα δεδομένα τα οποία πρέπει να εισάγει ο χρήστης, αφορούν τη μέθοδο επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, τον αριθμό των βημάτων και το χρονικό βήμα. Για τη διαδικασία της προσομοίωσης οι κινήσεις που εμπλέκονται διακριτοποιούνται, στην περίπτωση της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση, με χρήση ενός χρονικού βήματος. Παράλληλα, πρέπει να επιλεγεί και ένας αριθμός βημάτων ικανός για την ολοκλήρωση της επιθυμητής κατεργασίας. Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτει, χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson.

5.2.2 Εισαγωγή και πλεγματοποίηση του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού

Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης, εισάγεται στο πρόγραμμα η γεωμετρία του αυλακιού προς κατεργασία. Το σύστημα συντεταγμένων του τεμαχίου ταυτίζεται με το σύστημα συντεταγμένων του Deform και έτσι δεν απαιτείται η περαιτέρω μετακίνηση του. Αφού ελεγχθεί για τυχόν σφάλματα στη τριγωνοποίηση της γεωμετρίας κατά

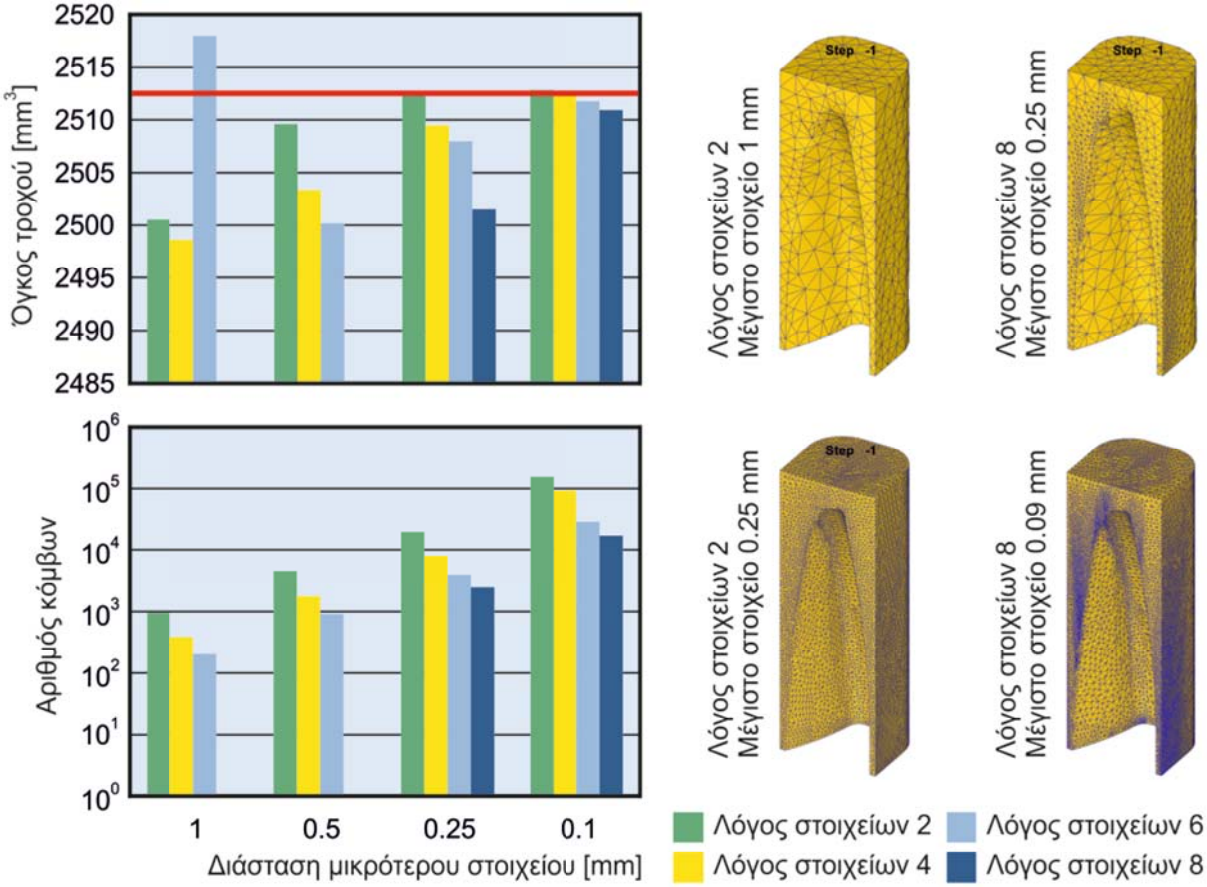
την αποθήκευσή του στη μορφή stl, μπορεί πάνω στο αντικείμενο να κατασκευασθεί το αρχικό πλέγμα. Το πλέγμα κατασκευάζεται με τετράεδρα, των οποίων ο λόγος μεταξύ του μεγαλύτερου και του μικρότερου στοιχείου είναι οκτώ. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετά καλή διακριτοποίηση στην περιοχή που εκτελείται η κατεργασία, ενώ στις περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει τόσο μεγάλο ενδιαφέρον η διακριτοποίηση να είναι πιο αραιή, μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό φόρτο. Όσον αφορά το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος, επιλέχθηκε η διάσταση του μικρότερου στοιχείου να είναι μικρότερη του 0.09mm. Η διάσταση του μικρότερου στοιχείου αποτελεί μια αρχική τιμή για το μέγεθος αυτό μιας και η γεννήτρια πλέγματος μπορεί να μειώσει αυτήν την τιμή για να προσεγγίσει καλύτερα τοπικά φαινόμενα στην κοπτική ακμή. Η επιλογή της παραπάνω τιμής έγινε έτσι ώστε το μικρότερο στοιχείο να έχει διαστάσεις μικρότερες από το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου στις περισσότερες από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής και πλεγματοποίησης του αυλακιού προς κατεργασία καθώς και η επαναπλεγματοποίηση μετά από έναν αριθμό βημάτων.



Σχήμα 5.5 Διαδικασία εισαγωγής και πλεγματοποίησης του οδοντωτού τροχού

Η επιλογή των συντελεστών της πλεγματοποίησης του αυλακιού έγινε με τη σύγκριση του κάθε πλέγματος ως προς την ακρίβεια τους στην αναπαράσταση της αρχικής γεωμετρίας του αυλακιού και το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που κάθε πλεγματοποίηση χρησιμοποιεί. Έτσι, μια καλή πλεγματοποίηση είναι αυτή που έχει όσο το δυνατόν λιγότερα στοιχεία και περιγράφει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την περιοχή ενδιαφέροντος. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η επίδραση των δύο παραμέτρων του πλέγματος στην ποιότητα του παραγόμενου πλέγματος. Ως μέτρο απόδοσης του πλέγματος ορίστηκε η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζει τον όγκο του οδοντωτού τροχού, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 5.6 με κόκκινο χρώμα. Όπως παρατηρείται εύκολα, η πλεγματοποίηση που προσεγγίζει με τη μεγαλύτερη ακρίβεια τη γεωμετρία είναι αυτή με λόγο στοιχείων δύο και μέγιστο στοιχείο διάστασης 0.1mm. Η επιλογή αυτή είναι αρκετά δαπανηρή μιας και απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων για να περιγράψει τη γεωμετρία του οδοντωτού τροχού. Αντίστοιχα η πλεγματοποίηση με λόγο στοιχείων οκτώ έχει ικανοποιητική ακρίβεια όσο αφορά το μέτρο απόδοσης που επελέγη, διατηρεί αρκετά μικρό αριθμό στοιχείων και μοντελοποιεί με μεγάλη ακρίβεια τη γεωμετρία του αντικειμένου. Στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος 5.6 παρουσιάζονται δύο πλέγματοποιήσεις, η μια με λόγο στοιχείων 2 και μέγιστο

στοιχείο 1mm και η άλλη με λόγο στοιχείων 8 και μικρότερο στοιχείο 0.25mm. Οι δύο αυτές πλεγματοποιήσεις έχουν περίπου ίδια απόδοση στο κριτήριο το οποίο επιλέχθηκε και παραπλήσιο αριθμό κόμβων, όμως εύκολα παρατηρείται ότι η επιλογή ενός μεγάλου λόγου στοιχείων οδηγεί σε καλύτερη αναπαράσταση του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις πιο ακριβείς πλεγματοποιήσεις που παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του σχήματος 5.6.



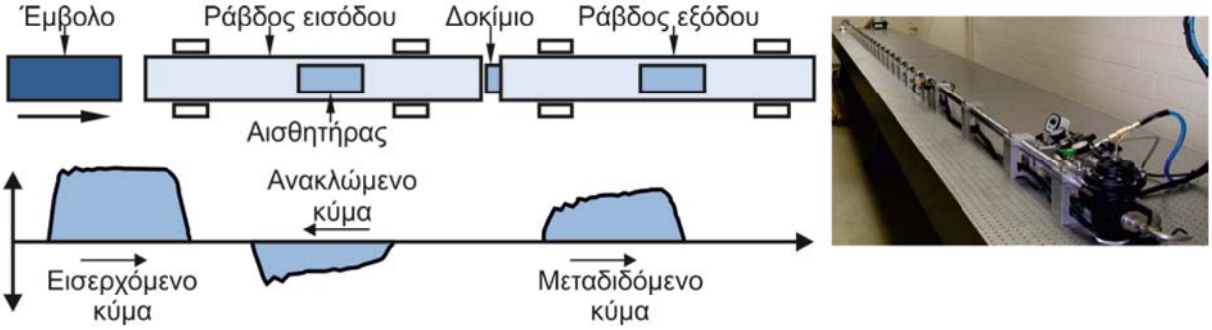
Σχήμα 5.6 Επίδραση των παραμέτρων πλεγματοποίησης στη ποιότητα του πλέγματος

5.2.3 Μοντελοποίηση του υλικού προς κατεργασία

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για την προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών αφαίρεσης υλικού με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η μοντελοποίηση του υλικού προς κατεργασία. Η περιγραφή του υλικού γίνεται συνήθως με τη χρήση της τάσης διαρροής του υλικού συναρτήσει των συνθηκών παραμόρφωσης. Η ακριβής περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού κατά την παραμόρφωσή του, παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Στις κατεργασίες κοπής, απαντώνται μεγάλες παραμορφώσεις καθώς και υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη αρκετά υψηλών θερμοκρασιών. Έτσι, το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι ικανό να περιγράψει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του υλικού σε αυτές τις συνθήκες.

Για την απόκτηση των καμπυλών τάσεων διαρροής για αυτές τις συνθήκες, χρησιμοποιούνται ειδικές μέθοδοι, μια από αυτές είναι η μέθοδος του Split Hopkinson's Pressure Bar (Σχήμα 5.7). Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η επίτευξη ρυθμών

παραμόρφωσης μέχρι και 10^4 s^{-1}, ενώ τα δοκίμια είναι δυνατό να θερμανθούν με τη χρήση επαγωγικού πηνίου. Η διάταξη της μεθόδου αυτής αποτελείται από δύο κυλινδρικές ράβδους σε σειρά, ανάμεσα στις οποίες τοποθετείται ένα δείγμα μικρότερης διαμέτρου από αυτής των ράβδων. Μια μάζα χτυπά τη μία από τις δυο ράβδους, εισάγοντας σε αυτήν ένα ελαστικό κύμα συμπίεσης το οποίο μετριέται από έναν αισθητήρα. Όταν το κύμα φτάνει στο δοκίμιο, χωρίζεται σε τρία μέρη, το πρώτο ανακλάται στο δοκίμιο και επιστρέφει στη ράβδο εισόδου, το δεύτερο παραμορφώνει πλαστικά το δοκίμιο, ενώ το τρίτο περνά μέσα από αυτό και καταλήγει στη ράβδο εξόδου, όπου ένας αισθητήρας το μετρά [53-55].



Σχήμα 5.7 Διάταξη μέτρησης των τάσεων διαρροής με τη μέθοδο Split Hopkinson Pressure bar

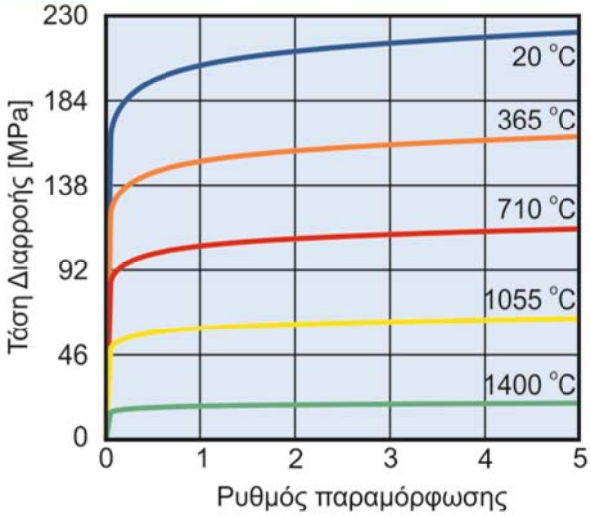
Προκειμένου να είναι δυνατή η μείωση του αριθμού των πειραμάτων και για να γίνεται παρεμβολή στα δεδομένα, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός μοντέλου το οποίο να είναι σε θέση να περιγράψει τις ιδιότητες του υλικού κάτω από σύνθετη φόρτιση σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και παραμορφώσεων. Κατά καιρούς έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα για το σκοπό αυτό. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τάσεων διαρροής των Johnson-Cook το οποίο έχει τη μορφή:

$$\sigma=\left(A+B\cdot\bar{\varepsilon}^{n}\right)\cdot\left(1+C\cdot\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\right)\cdot\left(1-\frac{T-T_0}{T_M-T_0}\right) \tag{5.1}$$

Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι η τάση διαρροής του υλικού επηρεάζεται ανεξάρτητα από τη παραμόρφωση, τον ρυθμό παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία. Στην εξίσωση 5.1 $\bar{\varepsilon}$ είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, το πηλίκο $\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}$ εκφράζει τον αδιάστατο ρυθμό παραμόρφωσης για $\dot{\bar{\varepsilon}}_0=1s^{-1}$, T_0 είναι η θερμοκρασία δωματίου και T_M η θερμοκρασία τήξης του συγκεκριμένου κράματος, ενώ τα A, B, C, n και m είναι παράμετροι του συγκεκριμένου υλικού.

Ο H. Chandrasekaran και οι συνεργάτες του [56] υπολόγισαν τους συντελεστές για το 16MnCr5 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Split Hopkinson's Pressure Bar, σε συνδυασμό με πειράματα φραιζαρίσματος. Οι συντελεστές που υπολόγισαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8 μαζί με τις θερμοκρασιακές παραμέτρους του υλικού, οι οποίες αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [57].

Συντελεστές Johnson-Cook				
A	B	C	n	m
202.07	259.81	0.055	0.294	0.914



Θερμοκρασία [°C]	Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [kJ/kg K]	Συντ. γραμμικής διαστολής 10^{-6} [K^{-1}]	Μέτρο ελαστικότητας 10^{3} [MPa]
20	43.39	474.14	11.04	213
100	44.21	487.37	11.46	203.6
200	43.98	500.6	12.16	195.6
400	39.3	545.01	13.22	182
600	33.51	601.06	14.28	159.7
800	23.64	695.65	12.65	123.5
1000	27.76	690.66	14.45	78.7
1200	30.25	685.71	15.94	46.5

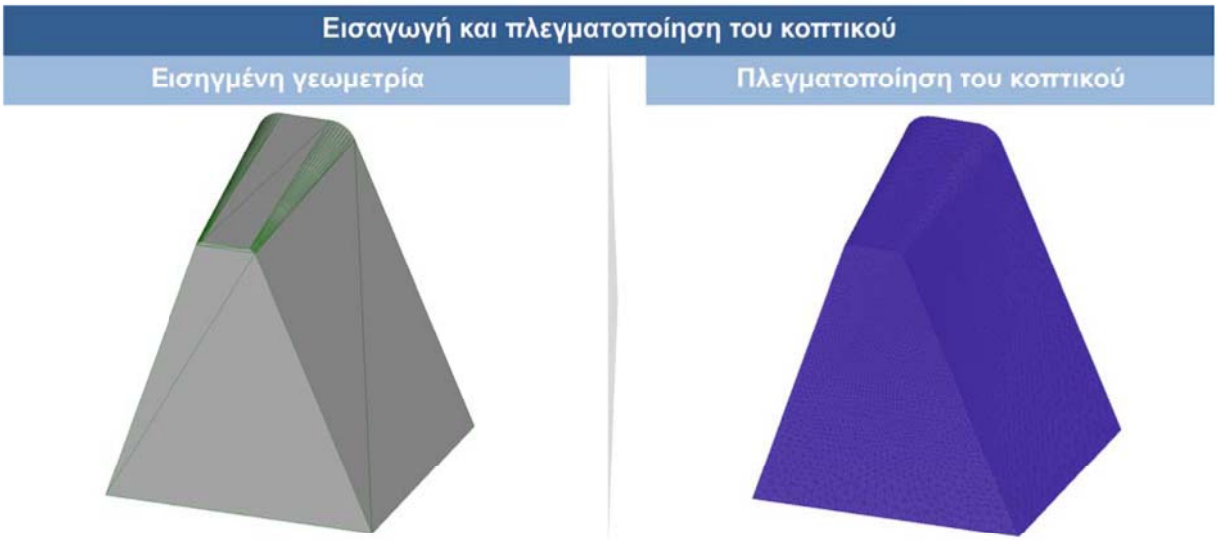
Λόγος Poisson	0.3

Σχήμα 5.8 Παράμετροι του χάλυβα 16MnCr5

5.2.4 Εισαγωγή και πλεγματοποίηση του κοπτικού εργαλείου

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εισαγωγής όλων των δεδομένων που σχετίζονται με το κατεργαζόμενο τεμάχιο ακολουθεί η διαδικασία εισαγωγής και πλεγματοποίησης του κοπτικού εργαλείου. Λόγω του ότι η τοποθέτηση της κοπτικής ακμής στο χώρο έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια κατασκευής του αρχείου stl του κοπτικού εργαλείου, δεν απαιτείται επιπλέον μετακίνησή του στο χώρο. Έτσι, το μόνο που απαιτείται κατά την εισαγωγή του τεμαχίου είναι να εισαχθεί μαζί με αυτό και το αντίστοιχο αρχείο το οποίο περιέχει τα κέντρα περιστροφής και τους άξονες παράλληλα στους οποίους μετακινείται το κοπτικό εργαλείο, το οποίο και δημιουργείται μαζί με το αρχείο stl από τον προεπεξεργαστή.

Σειρά έχει η πλεγματοποίηση του κοπτικού εργαλείου, η οποία και γίνεται για να είναι δυνατόν να εκτελεστεί ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού πεδίου στην κοπτική ακμή καθώς και, σε μετέπειτα στάδιο, η μελέτη των τάσεων που ασκούνται σε αυτό. Το κοπτικό εργαλείο σε αυτό το στάδιο θεωρείται ως απαραμόρφωτο σώμα, προκειμένου να διευκολυνθεί η λειτουργία του προγράμματος. Στην περίπτωση του κοπτικού εργαλείου, ο λόγος του μεγαλύτερου προς το μικρότερο στοιχείο ορίστηκε ίσος με πέντε, ενώ το μέγεθος του μικρότερου τετράεδρου ορίστηκε να είναι ίσο με 0.05. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής και πλεγματοποίησης του κοπτικού εργαλείου.

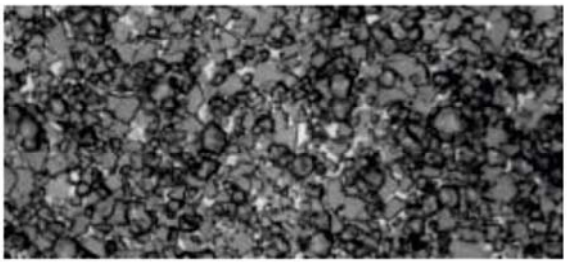


Σχήμα 5.9 Διαδικασία εισαγωγής και πλεγματοποίησης του κοπτικού εργαλείου

5.2.5 Μοντελοποίηση του υλικού του κοπτικού εργαλείου

Το κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατεργασίας κοπής θεωρείται απαραμόρφωτο, ενώ κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό θεωρείται ελαστικό. Με βάση αυτό το γεγονός δεν απαιτείται η μοντελοποίηση του υλικού του με τη χρήση του μοντέλου τάσεων διαρροής αλλά πρέπει να δοθούν οι τιμές, τόσο για το μέτρο ελαστικότητάς του, όσο και τα θερμικά χαρακτηριστικά του για την ορθή μετάδοση της θερμότητας μέσα από το σώμα του. Στην παρούσα εργασία ως υλικό κατασκευής του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκε το σκληρομέταλλο P40 [55], τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10.

Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	70
Ειδική θερμοχωρητικότητα [kJ/kg K]	0.35
Συντ. γραμμικής διαστολής 10^{-6} [K^{-1}]	5.8
Μέτρο ελαστικότητας 10^3 [MPa]	600
Λόγος Poisson	0.22



Σχήμα 5.10 Παράμετροι του σκληρομέταλλου P40

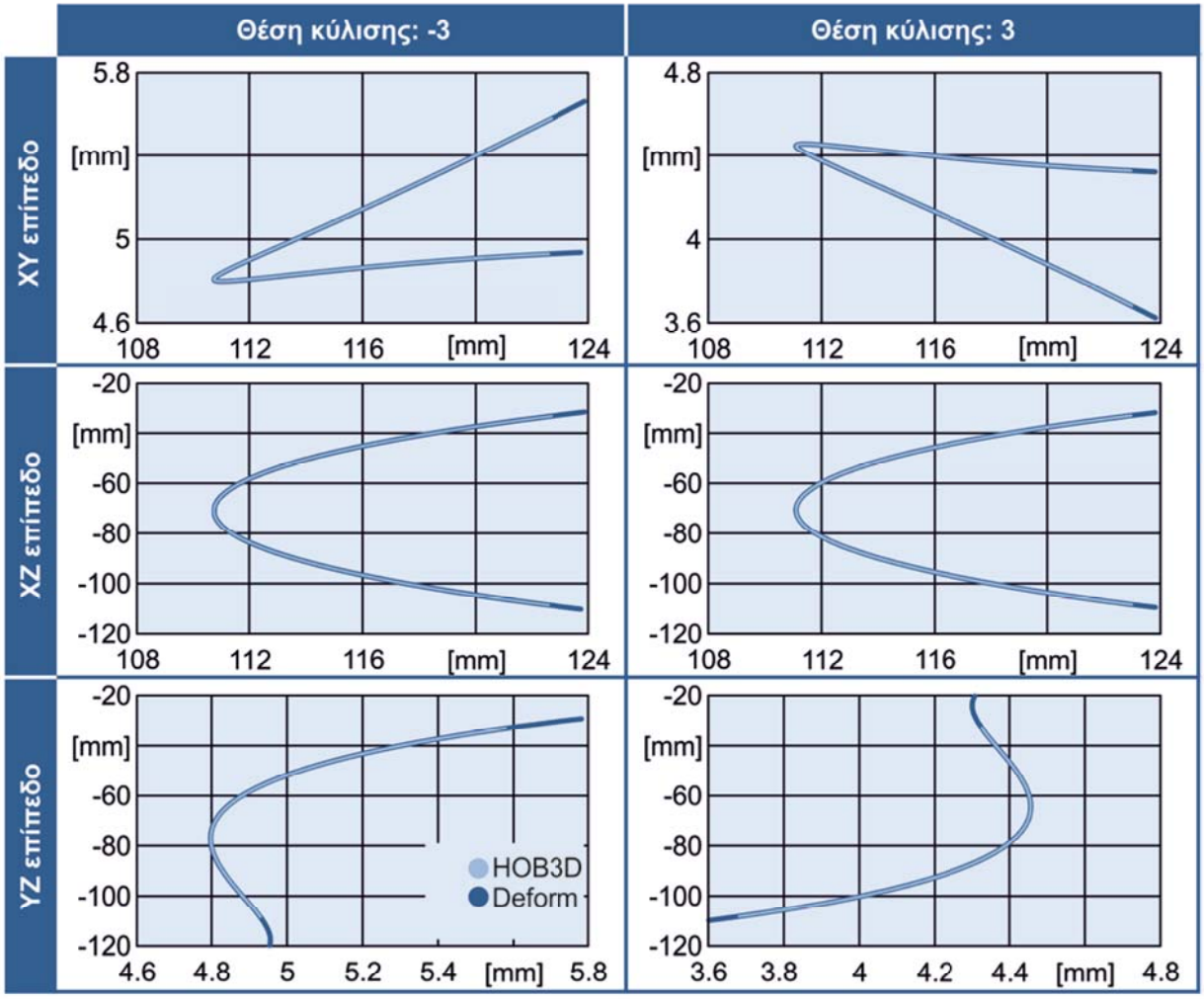
5.2.6 Εισαγωγή οριακών συνθηκών

Στην τελευταία φάση πρέπει να οριστούν οι οριακές συνθήκες του συστήματος εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε αυτό το βήμα ορίζεται ο συντελεστής τριβής με το νόμο του Coulomb και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, τόσο για την επαφή κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου, όσο και για αυτή μεταξύ των υποαποβλιτων του τεμαχίου. Επιπλέον, ορίζεται ποιες επιφάνειες του τεμαχίου έχουν επαφή με το περιβάλλον. Με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος δημιουργείται η βάση δεδομένων του προβλήματος και ξεκινά η επίλυσή του.

5.3 Επαλήθευση της τροχιάς του κοπτικού δοντιού

Για να επαληθευτεί η κίνηση που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε η τροχιά του κοπτικού εργαλείου όπως αυτή παράγεται μέσα από το HOB3D. Λόγω του ότι αυτή έχει ήδη επαληθευτεί μέσα από τη διαδικασία της

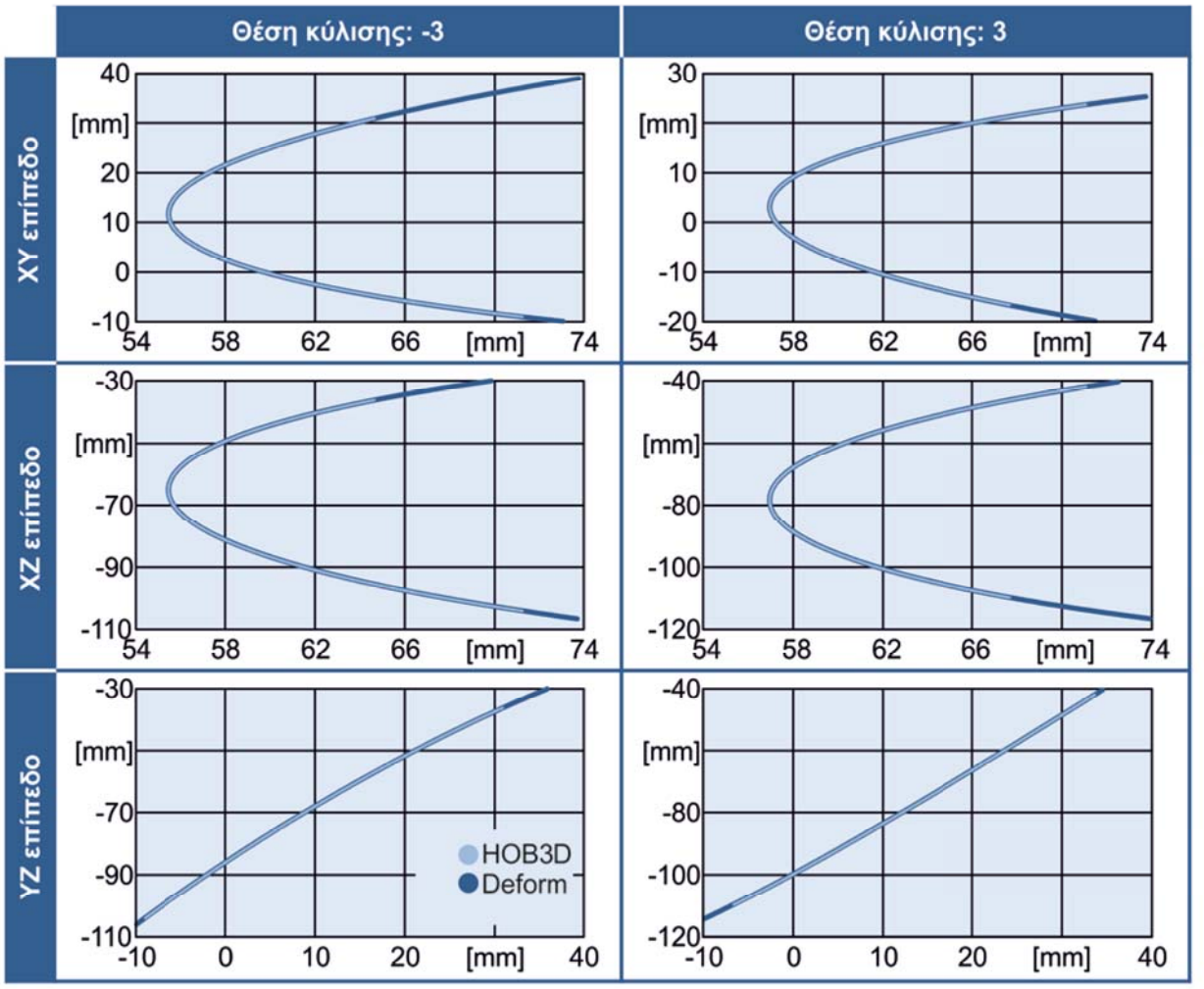
επιβεβαίωσης του μοντέλου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πιστοποίηση της τροχιάς του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση των δύο τροχιών έγινε με την αξιολόγηση της απόστασης μεταξύ της καμπύλης που σχηματίζει ένα σημείο της βάσης του κοπτικού εργαλείου καθώς αυτό κινείται στο χώρο. Το σημείο αυτό είναι εύκολα επιλέξιμο, τόσο στο CAD αρχείο, όσο και μέσα από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι προβολές της τροχιάς στο κινητό συστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού (2). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο τροχιών για την περίπτωση της ευθείας οδόντωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11.



m_n=3.79mm, α_n=20°, h_a=0°, z_1/z_2=1/56, f_a=4mm/wrev, n_{st}=9, d_h=150mm, Ομόρροπο

Σχήμα 5.11 Επαλήθευση της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου στην περίπτωση της ευθείας οδόντωσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα οι δύο τροχιές, όπως αυτές παρατηρούνται από την προβολή της τροχιάς στα τρία επίπεδα του ορθοκανονικού συστήματος συντεταγμένων, είναι ταυτόσημες τόσο στην περίπτωση της θέσης κύλισης -3 όσο και σε αυτή της θέσης κύλισης 3. Αντίστοιχα μπορούν να κατασκευασθούν διαγράμματα τα οποία να δείχνουν την τροχιά του κοπτικού εργαλείου στην περίπτωση της κατεργασίας μιας ελικοειδούς οδόντωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12.



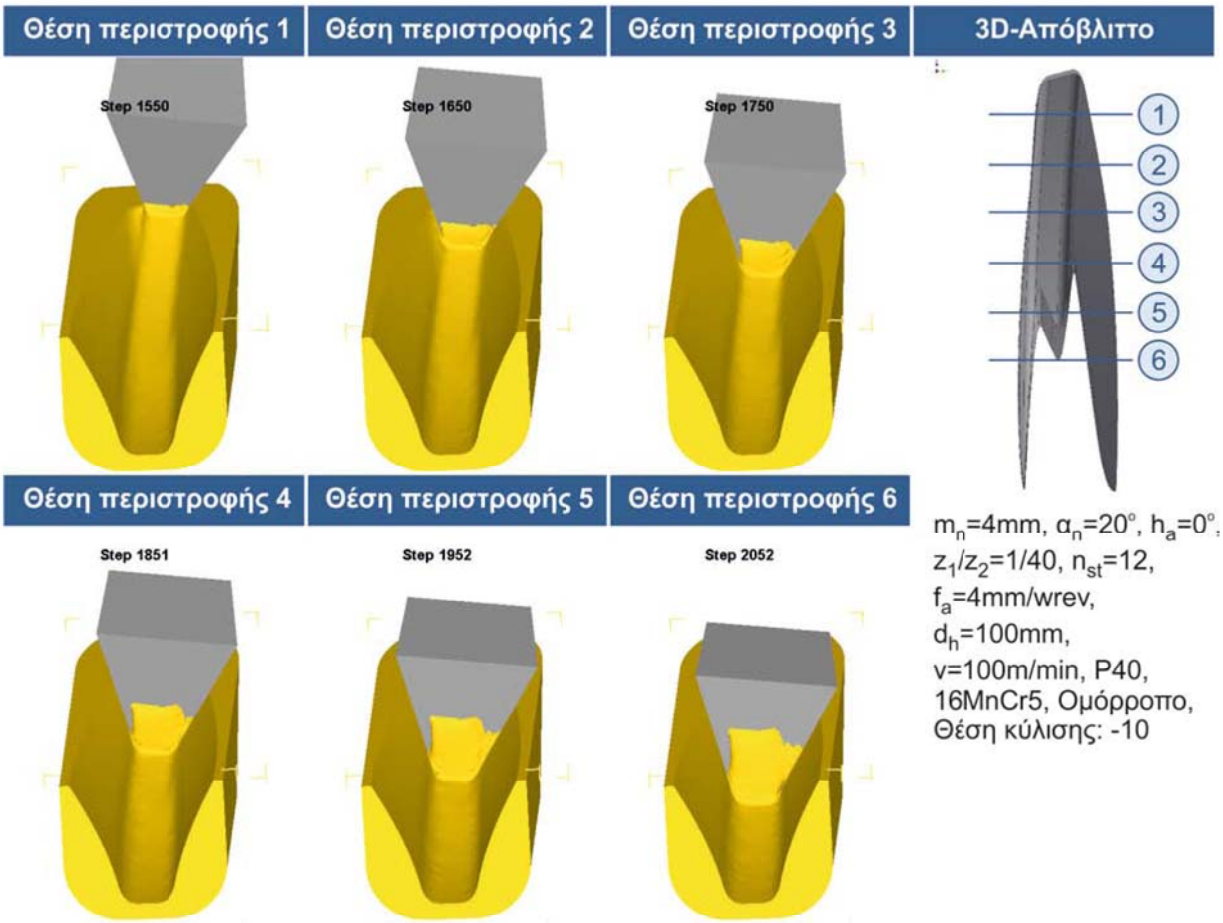
m_n=3.82mm, α_n=20°, h_a=30°, z_1/z_2=1/30, f_a=4mm/wrev, n_{st}=6, d_h=147mm, Ομόρροπο-ομοιόστροφο

Σχήμα 5.12 Επαλήθευση της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης

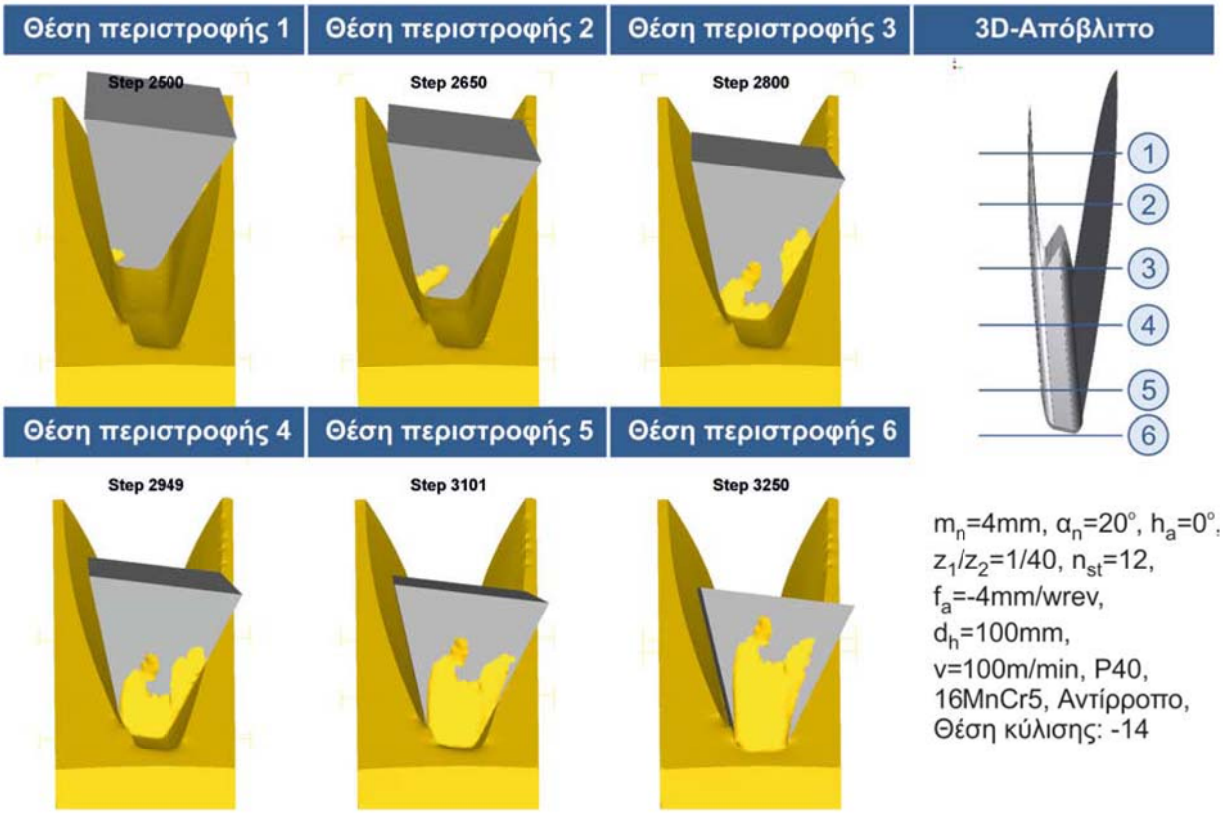
5.4 Επαλήθευση των παραγόμενων αποβλίττων

Η πορεία της παραμόρφωσης του αποβλίττου μέσα στο αυλάκι για την περίπτωση της ομόρροπης κατεργασίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. Όπως φαίνεται και στη στερεή μορφή του αποβλίττου, στα δεξιά του σχήματος, η κατεργασία ξεκινά με τη κεφαλή του κοπτικού εργαλείου ακολουθούμενη από την εισερχόμενη παρειά, γεγονός το οποίο ωθεί το απόβλιττο προς την εξερχόμενη παρειά. Στη συνέχεια και καθώς η εξερχόμενη παρειά εισέρχεται στην κατεργασία, το απόβλιττο κινείται παράλληλα με την εξερχόμενη παρειά.

Αντίστοιχα, με την περίπτωση της αντίρροπης κατεργασίας (Σχήμα 5.14), η κατεργασία ξεκινά με τις δύο παρειές να κατεργάζονται το αυλάκι με τα δύο υποαπόβλιττα να ρέουν προς το κέντρο του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια, η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου εισέρχεται στην κατεργασία και ωθεί το υπο-απόβλιττο της εξερχόμενης παρειάς προς τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Σε εκείνο το σημείο τα δύο υποαπόβλιττα συγκρούονται και συνεχίζουν την πορεία τους προς τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου.

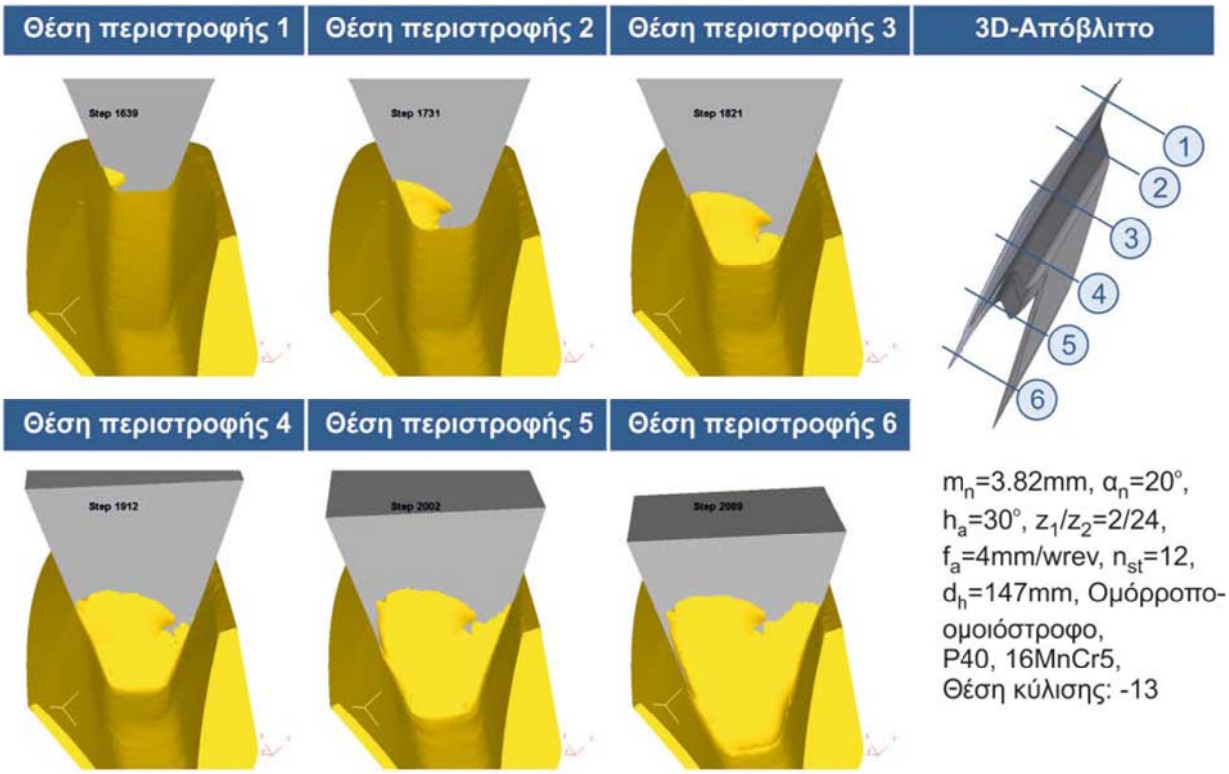


Σχήμα 5.13 Ροή αποβλίττου στην περίπτωση της ομόρροπης κατεργασίας



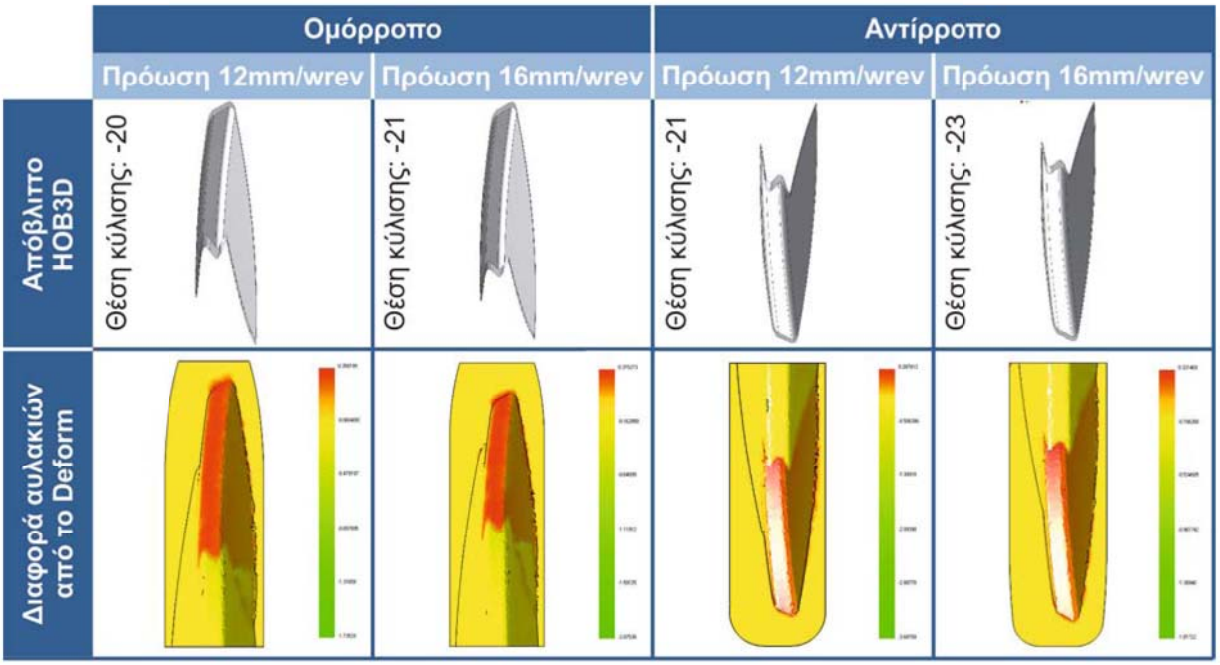
Σχήμα 5.14 Ροή αποβλίττου στην περίπτωση της αντίρροπης κατεργασίας

Αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά της κατεργασίας μιας ευθείας οδόντωσης εξάγονται και για τις περιπτώσεις της κατεργασίας ελικοειδών οδοντωτών τροχών. Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η πορεία της κατεργασίας στην περίπτωση της ομόρροπης-ομοιόστροφης κατεργασίας ενός ελικοειδούς οδοντωτού τροχού. Όπως παρατηρείται η κατεργασία ξεκινά από την εξερχόμενη παρειά με το απόβλιττο να ρέει με κατεύθυνση προς την εισερχόμενη παρειά. Στη συνέχεια και καθώς η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου εισέρχεται στην κατεργασία, το απόβλιττο από την εξερχόμενη παρειά συγκρούεται με αυτό που δημιουργείται από την κεφαλή. Τέλος, και καθώς και η εισερχόμενη παρειά αρχίζει την κατεργασία, η σύγκρουση των υποαποβλίττων στην περιοχή του κοπτικού εργαλείου κάτω από την κεφαλή γίνεται πιο έντονη, με το απόβλιττο να προχωρά παράλληλα στην εξερχόμενη παρειά.



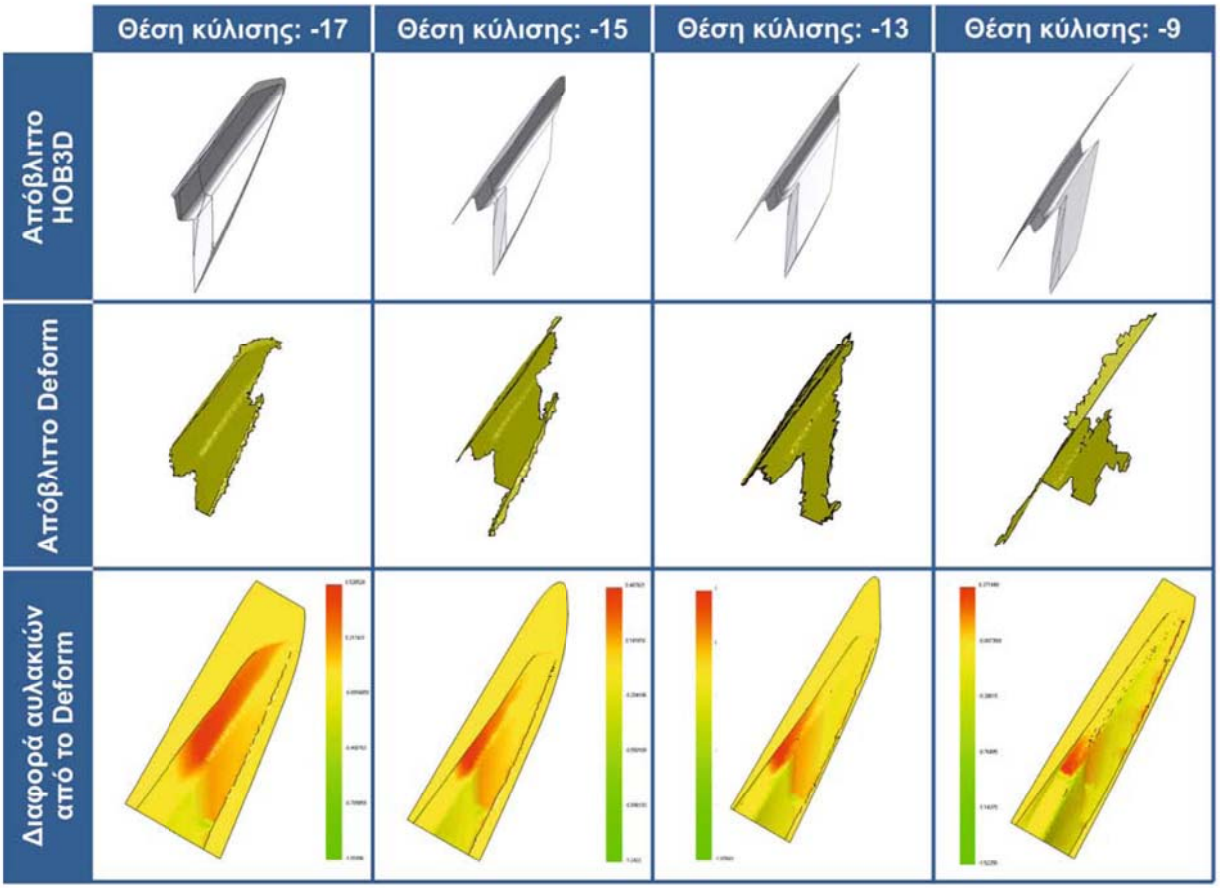
Σχήμα 5.15 Ροή αποβλίττου στην περίπτωση της ομόρροπης-ομοιόστροφης κατεργασίας ελικοειδούς οδοντωτού τροχού

Για τις κατεργασίες που προαναφέρθηκαν, παρουσιάζονται στο Σχήματα 5.16 και 5.17 αντίστοιχα τα απόβλιττα όπως αυτά παράγονται από το λογισμικό HOB3D και από το Deform. Ειδικότερα, στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα απόβλιττα δυο θέσεων κύλισης για τις περιπτώσεις κατεργασίας ομόρροπου (με πρόωση 12mm/wrev και 16mm/wrev) και αντίρροπου (με πρόωση -12mm/wrev και -16mm/wrev) φραιζαρίσματος. Τα αντίστοιχα υπολογισμένα από το HOB3D απόβλιττα συνοδεύουν τα απαραμόρφωτα απόβλιττα από το Deform, όπως αυτά προσδιορίζονται ως οι διαφορές των αυλακιών πριν και μετά την κατεργασία η οποία προσομοιώνεται με τα πεπερασμένα στοιχεία. Αντίστοιχα αποτελέσματα για κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης φαίνονται στο Σχήμα 5.17. Όπως φαίνεται από τα δύο σχήματα, παρά το γεγονός ότι η ακρίβεια υπολογισμών στο μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία είναι μικρότερη όσον αφορά την κινηματική και τον προσδιορισμό αποβλίττων, σε σχέση με το σύστημα CAD που διαχειρίζεται στερεά χωρίς να τα διακριτοποιεί, τα απόβλιττα αυτά προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια και τα δύο αυτά μοντέλα συμφωνούν απολύτως.



m_n=4mm, α_n=20°, h_a=0°, z_1/z_2=1/40, n_{st}=12, d_h=100mm, P40, 16MnCr5, v=100m/min

Σχήμα 5.16 Απόβλιττα παραγόμενα από το HOB3D σε σύγκριση με τα απαραμόρφωτα απόβλιττα του Deform για κατεργασία ευθείας οδόντωσης

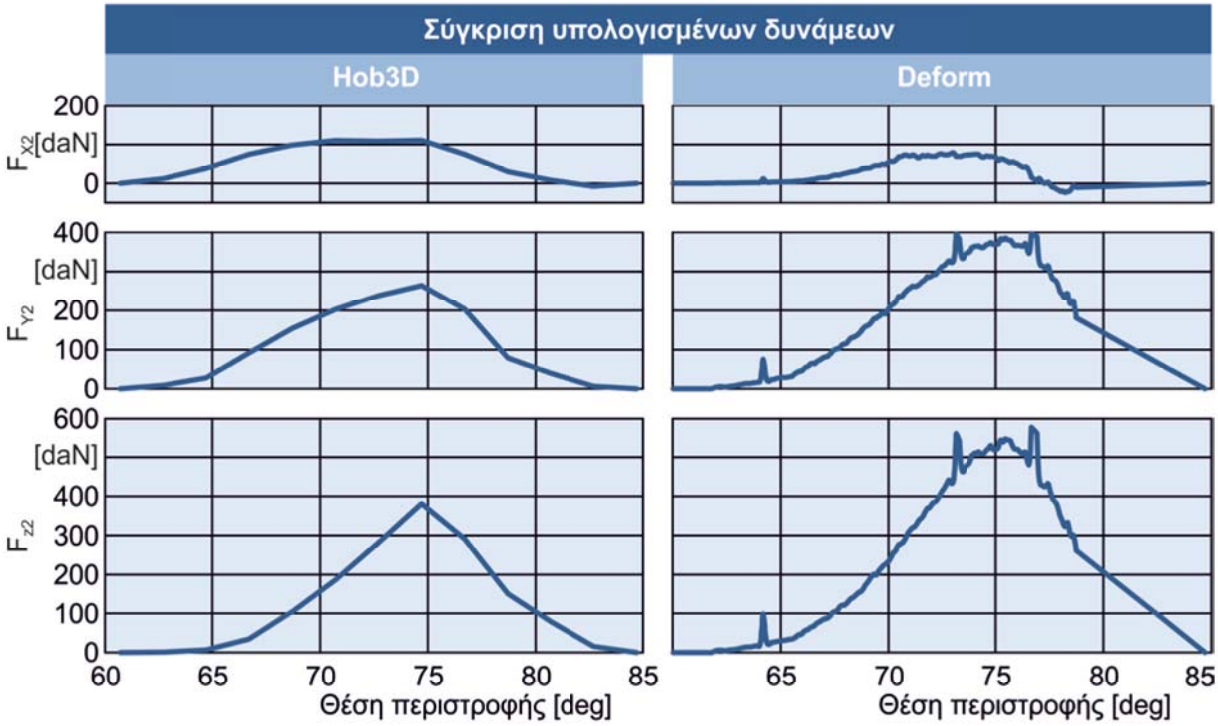


m_n=3.82mm, α_n=20°, h_a=30°, z_1/z_2=1/30, f_a=4mm/wrev, n_{st}=6, d_h=147mm, Ομόρροπο-ομοιόστροφα

Σχήμα 5.17 Απόβλιττα παραγόμενα από το HOB3D σε σύγκριση με τα απαραμόρφωτα απόβλιττα του Deform για κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης

5.5 Επαλήθευση δυνάμεων κοπής

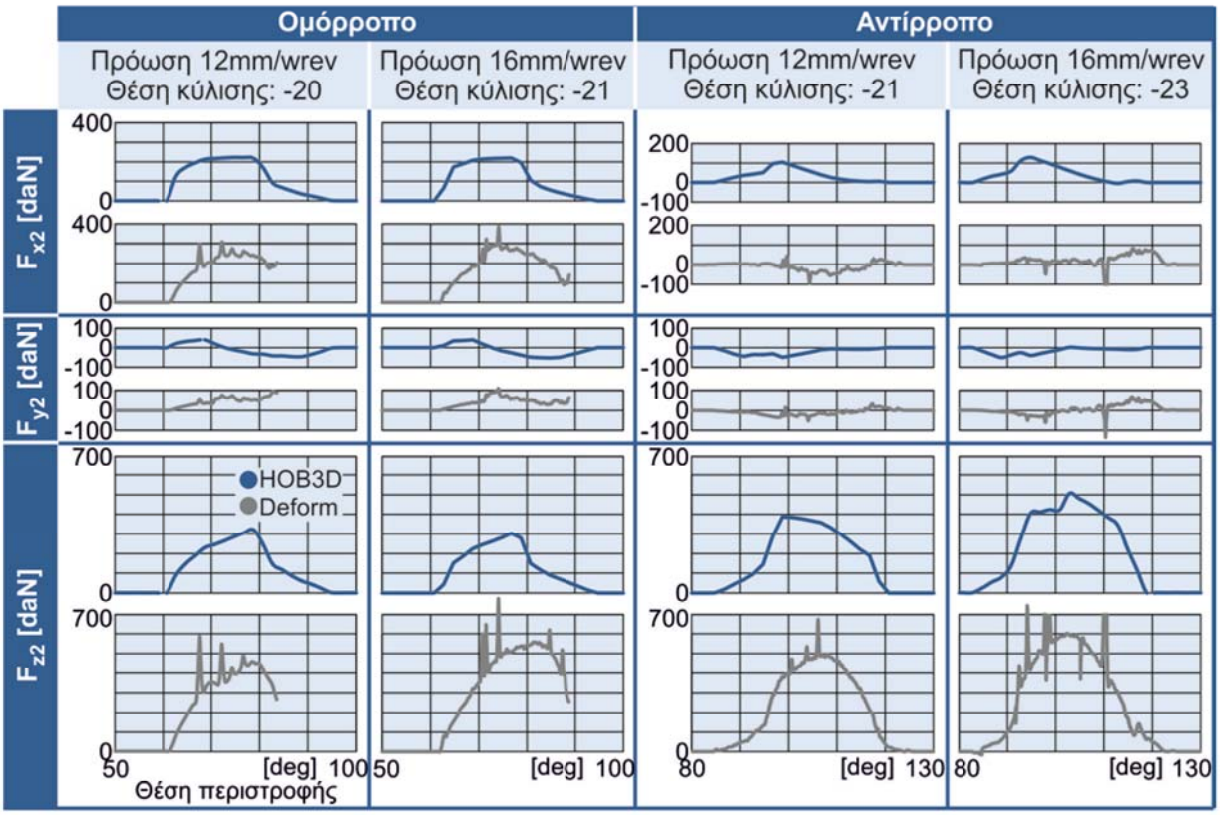
Μετά την επαλήθευση της κινηματικής και των αποβλίττων συγκρίνονται οι δυνάμεις κοπής που υπολογίζονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με αυτές του HOB3D. Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται η εξέλιξη των δυνάμεων κοπής στο σύστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού για την περίπτωση κατεργασίας μιας ελικοειδούς οδόντωσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα οι δυνάμεις κοπής που υπολογίζονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζουν με αρκετά καλή ακρίβεια τη μορφή της φόρτισης. Όσον αφορά το μέτρο των δυνάμεων κοπής, αυτές υπερεκτιμώνται στο Deform για τους άξονες Y και Z, ενώ υποεκτιμώνται για τον άξονα X. Η διαφορά αυτή τιμών οφείλεται κυρίαρχα στη διαφορετική μοντελοποίηση που γίνεται στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο, στην εκάστοτε μεθοδολογία του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, τα διαφορετικά δεδομένα που απαιτούνται στην κάθε μέθοδο υπολογισμού, στο συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου, κ.λπ.. Σε κάθε περίπτωση όμως οι τιμές στις δυνάμεις μεταξύ των HOB3D και Deform είναι αριθμητικά συγκρίσιμες ενώ ποιοτικά οι δυνάμεις ταυτίζονται.



m_n=3.82mm, α_n=20°, h_a=30°, z_1/z_2=2/24, f_a=4mm/wrev, n_{st}=12, d_h=147mm, v=100m/min, Ομόρροπο-ομοιόστροφο, P40, 16MnCr5, Θέση κύλισης: -13

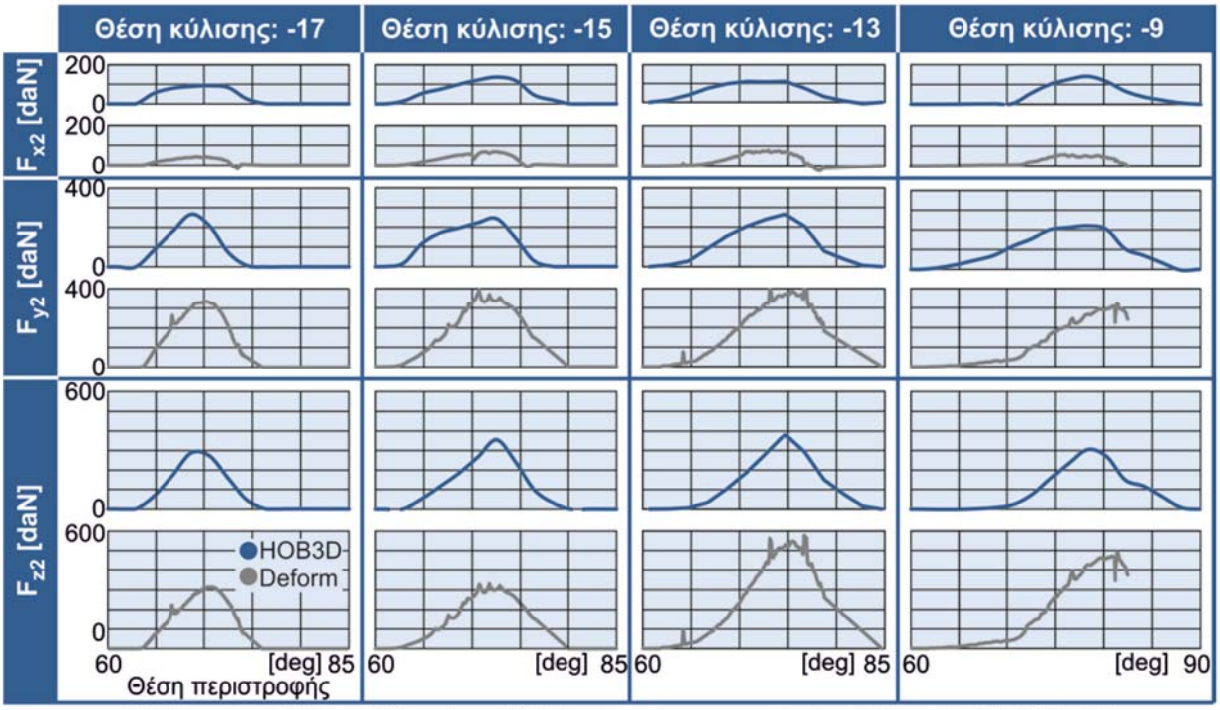
Σχήμα 5.18 Σύγκριση υπολογισμένων δυνάμεων μεταξύ Hob3D και Deform στο κινούμενο σύστημα συντεταγμένων του οδοντωτού τροχού.

Η συμπεριφορά αυτή των δυνάμεων κοπής παρουσιάζεται αναλυτικότερα στα Σχήματα 5.19 και 5.20 όπου φαίνονται οι υπολογισμένες δυνάμεις με το HOB3D και αντίστοιχα το λογισμικό Deform για ευθεία αλλά και ελικοειδή οδόντωση. Από τα σχήματα γίνεται φανερό πως ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής είναι και στις περιπτώσεις αυτές ποιοτικά ταυτόσημος ενώ αριθμητικά οι δυνάμεις στο Deform παρουσιάζουν μικρές διαφορές που οφείλονται στους λόγους που προαναφέρθηκαν.



m_n=4mm, α_n=20°, h_a=0°, z_1/z_2=1/40, n_{st}=12, d_h=100mm, P40, 16MnCr5, v=100m/min

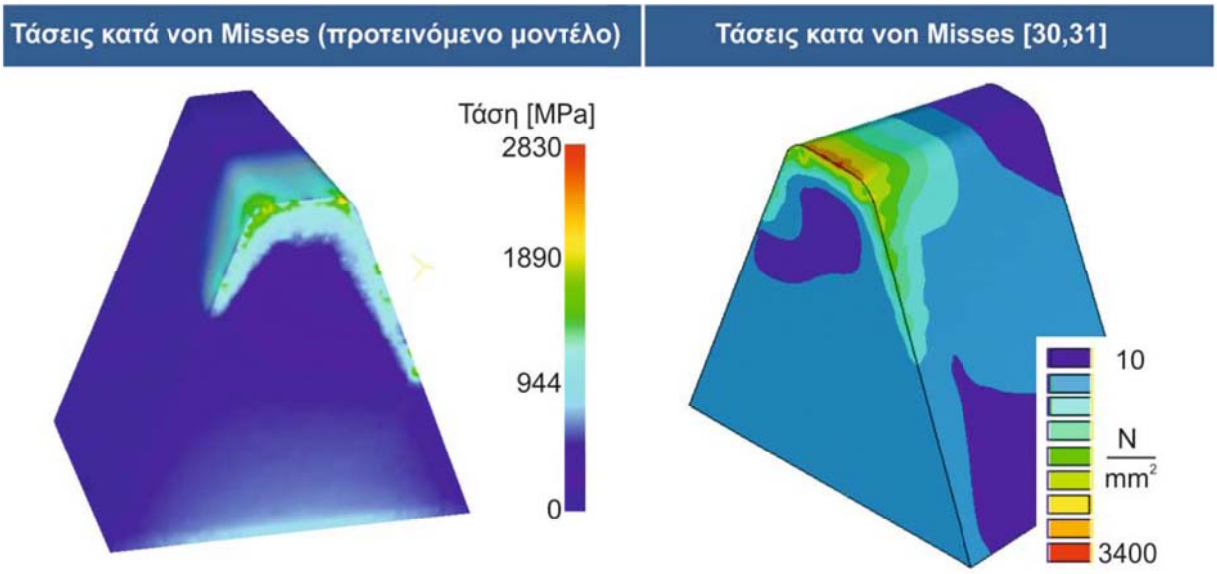
Σχήμα 5.19 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στο σύστημα του οδοντωτού τροχού κατά τη διάρκεια της ομόρροπης και αντίρροπης κατεργασίας ευθείας οδόντωσης



m_n=3.82mm, α_n=20°, h_a=30°, z_1/z_2=1/30, f_a=4mm/wrev, n_{st}=6, d_h=147mm, P40, 16MnCr5, v=100m/min, Ομόρροπο-ομοιόστροφο

Σχήμα 5.20 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στο σύστημα του οδοντωτού τροχού κατά τη διάρκεια της ομόρροπης κατεργασίας ελικοειδούς οδόντωσης

Η μεθοδολογία αυτή οδηγεί ταυτόχρονα στον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στο κοπτικό εργαλείο και, παρά το ότι αυτός ο υπολογισμός δε σχετίζεται με το αναπτυχθέν στην παρούσα διατριβή μοντέλο προσομοίωσης HOB3D, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21 για μια περίπτωση κατεργασίας όπου χρησιμοποιήθηκαν για επιβεβαίωση υπολογιστικά αποτελέσματα τα οποία αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και έχουν επαληθευτεί πειραματικά [30,31].



m_n=3.82mm, α_n=20°, h_a=30°, z_1/z_2=2/24, f_a=4mm/wrev, n_{st}=12, d_h=147mm, v=100m/min
Ομόρροπο-ομοιόστροφο, P40, 16MnCr5, Θέση κύλισης: -13

Σχήμα 5.21 Σύγκριση τάσεων του μοντέλου του Αντωνιάδη και των συνεργατών του με το προτεινόμενο μοντέλο

Ο Αντωνιάδης και οι συνεργάτες του υπολόγισαν σε μια σειρά περιπτώσεων, τις τάσεις κατά von Misses στις θέσεις περιστροφής με τη μεγαλύτερη διατομή, θέσεις οι οποίες προκαλούν τη μέγιστη καταπόνηση στο κοπτικό εργαλείο. Με βάση το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο αναπτύχθηκε, υπολογίστηκαν οι τάσεις στο κοπτικό εργαλείο στην αντίστοιχη θέση περιστροφής της ίδιας θέσης κύλισης. Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων. Όπως εύκολα είναι φανερό, οι τάσεις στο κοπτικό εργαλείο με τη χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, πλησιάζουν αρκετά αυτές του μοντέλου του Αντωνιάδη και των συνεργατών του. Οι διαφορές που υπάρχουν κατά τόπους μπορούν να οφείλονται σε μία σειρά από παράγοντες, όπως η μέθοδος επίλυσης που κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί, ο τρόπος με τον οποίο φορτίζεται το κοπτικό εργαλείο και διαφορές στη μοντελοποίηση των υλικών.

6 Διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας

Το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε και επιβεβαιώθηκε, χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της επίδρασης έξι παραμέτρων της κατεργασίας στις μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι αυτοί που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής και σχετίζονται με τη γεωμετρία του παραγόμενου οδοντωτού τροχού, του κοπτικού εργαλείου, όπως επίσης και με τις συνθήκες κοπής. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των δυνάμεων κοπής καθώς και οι τιμές που επιλέχθηκαν για κάθε μια από αυτές.

m_n Μέτρο οδόντωσης [mm]	4	8	12	16			
z_2 Αριθμός δοντιών	40	80	120	160			
h_a Γωνία ελίκωσης [deg]	-30	-20	-10	0	10	20	30
n_{st} Αριθμός στηλών	6	8	10	12	14	16	18
z_1 Αριθμός αρχών	1	2	3				
f_a Αξονική πρόωση [mm/wrev]	2	4	8	12	16		
Στρατηγική κατεργασίας	Ομόρροπο φραιζάρισμα				Αντίρροπο φραιζάρισμα		

Σχήμα 6.1 Παράμετροι κατεργασίας που εξετάστηκαν

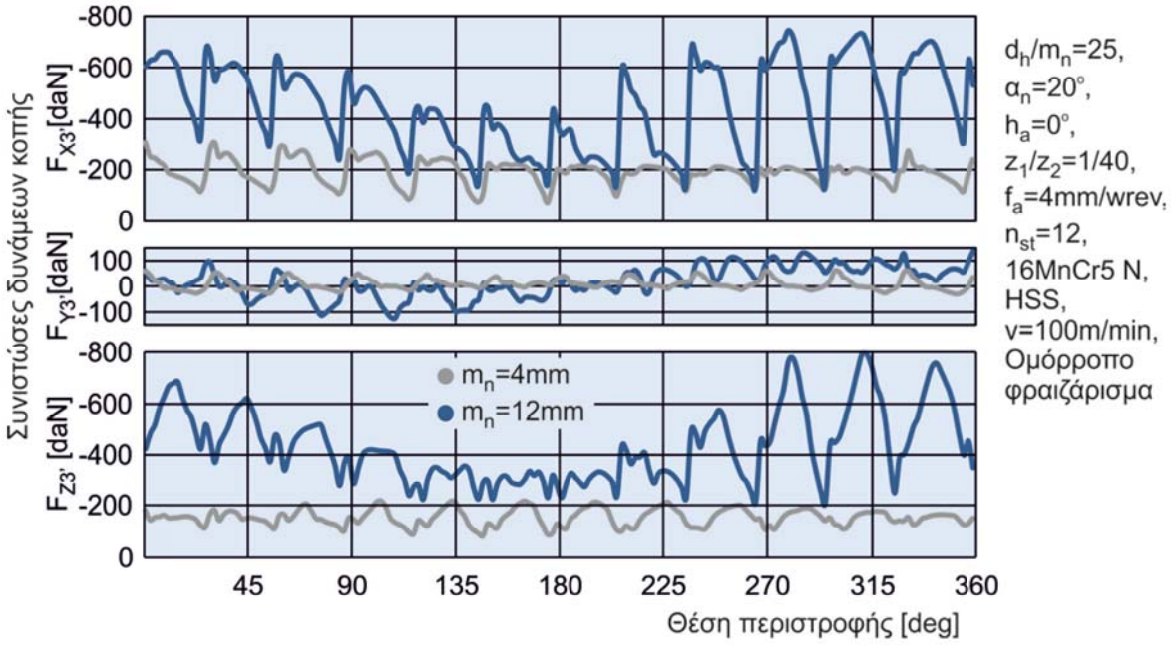
6.1 Επίδραση των παραμέτρων του οδοντωτού τροχού στις δυνάμεις κοπής

Οι παράμετροι της κατεργασίας οι οποίες εξετάστηκαν και σχετίζονται με τη γεωμετρία του παραγόμενου οδοντωτού τροχού είναι το μέτρο της οδόντωσης του παραγόμενου οδοντωτού τροχού, η γωνία ελίκωσης και ο αριθμός των δοντιών του. Για τη μελέτη της επίδρασης του μέτρου οδόντωσης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, διατηρήθηκε σταθερή η γωνία ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου και μεταβλήθηκε η διάμετρός του, έτσι ώστε οι δυνάμεις κοπής να είναι συγκρίσιμες. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται σύγκριση της εξέλιξης των δυνάμεων κοπής κατά τη διάρκεια περιστροφής του κοπτικού εργαλείου για δυο διαφορετικά μέτρα οδόντωσης. Οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στη περίπτωση του οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 12 είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στη κατεργασία ενός οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 4.

Αναλυτικότερα οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στον άξονα X εμφανίζονται να είναι τριπλάσιες τη περίπτωση της κατεργασίας του οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 12 σε σχέση με αυτές του οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 4. Αντίστοιχα στον άξονα Y η δύναμη κοπής στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 12 είναι διπλάσια, ενώ στον άξονα Z είναι τετραπλάσια. Η αύξηση των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση του μεγέθους του αυλακιού το οποίο υπόκειται κατεργασία σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι θέσεις κύλισης που απαιτούνται για τη κατεργασία του αυλακιού είναι σχεδόν σταθερές.

Ως αποτέλεσμα τα απόβλιττα που παράγονται έχουν μεγαλύτερο πάχος και πλάτος, έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση του κοπτικού εργαλείου με μέτρο οδόντωσης 12 το πάχος του αποβλίττου που παράγεται στην πιο δυσμενή θέση περιστροφής σε όλη τη κατεργασία είναι

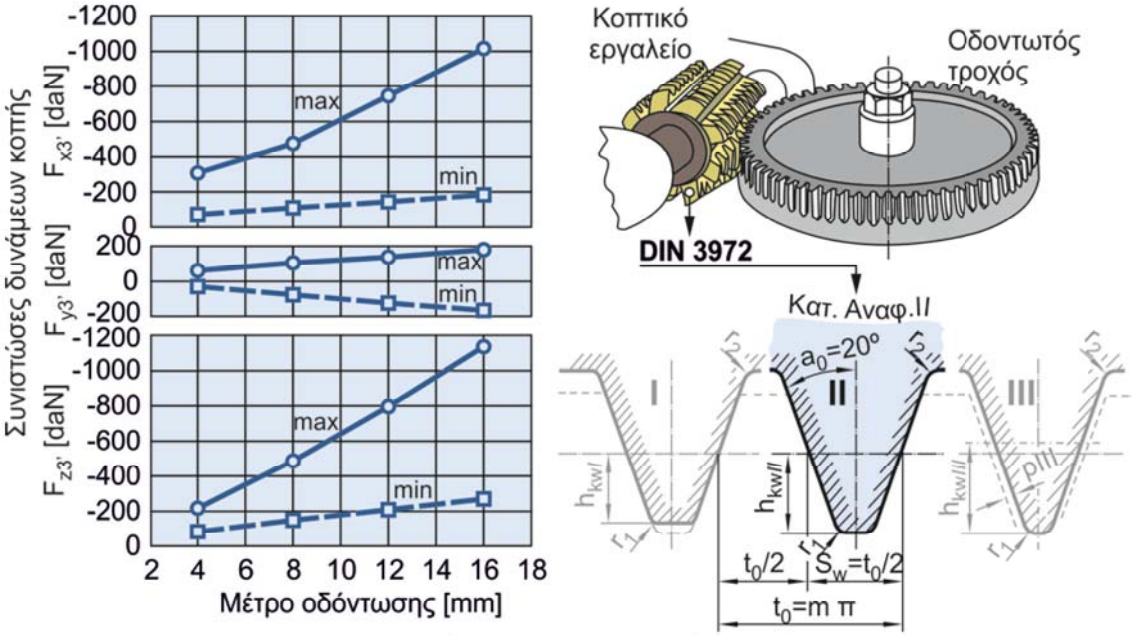
μιάμιση φορά παχύτερο από την αντίστοιχη θέση στο οδοντωτού τροχό με μέτρο οδόντωσης 4 ενώ το ανοιγμένο μήκος του αποβλίττου στη περίπτωση του οδοντωτού τροχού με μέτρο οδόντωσης 12 είναι τριπλάσιο σε σχέση με αυτό του άλλου οδοντωτού τροχού, με τις μορφές των δύο θέσεων να είναι πανομοιότυπες.



Σχήμα 6.2 Σύγκριση δυνάμεων κοπής για οδοντωτού τροχούς διαφορετικού μέτρου της οδόντωσης

Με βάση τα παραπάνω αιτιολογείται ο τετραπλασιασμός της συνιστώσας της δύναμης κοπής στον άξονα Z. Οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στους άλλους δύο άξονες φαίνεται να μην ακολουθούν τον ίδιο ρυθμό αύξησης με αυτό της Z συνιστώσας και αυτό λόγω της αλληλεξουδετέρωσης των δυνάμεων κοπής. Κατά την κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση είναι δυνατόν να εκτελείται ταυτόχρονα κατεργασία με δύο ή και τρείς περιοχές του κάθε κοπτικού δοντιού, έτσι πολλές φορές υπάρχει εξουδετέρωση των δυνάμεων κοπής που παράγονται από διαφορετικές περιοχές του κοπτικού εργαλείου, όπως παραδείγματος χάρη οι δυνάμεις κοπής που παράγονται από τις δύο παρειές του κοπτικού δοντιού.

Συνοπτικά εκπονώντας προσομοιώσεις για διαφορετικά μέτρα οδόντωσης κατασκευάστηκαν καμπύλες οι οποίες δίνουν την επίδραση του μέτρου οδόντωσης στις μέγιστες τιμές των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, και οι τρείς συνιστώσες της δύναμης κοπής αυξάνονται με την αύξηση του μέτρου της οδόντωσης. Όπως είναι φανερό οι παρατηρήσεις που έγιναν για τα μέτρα οδόντωσης 4 και 12 φαίνονται να γενικεύονται και στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

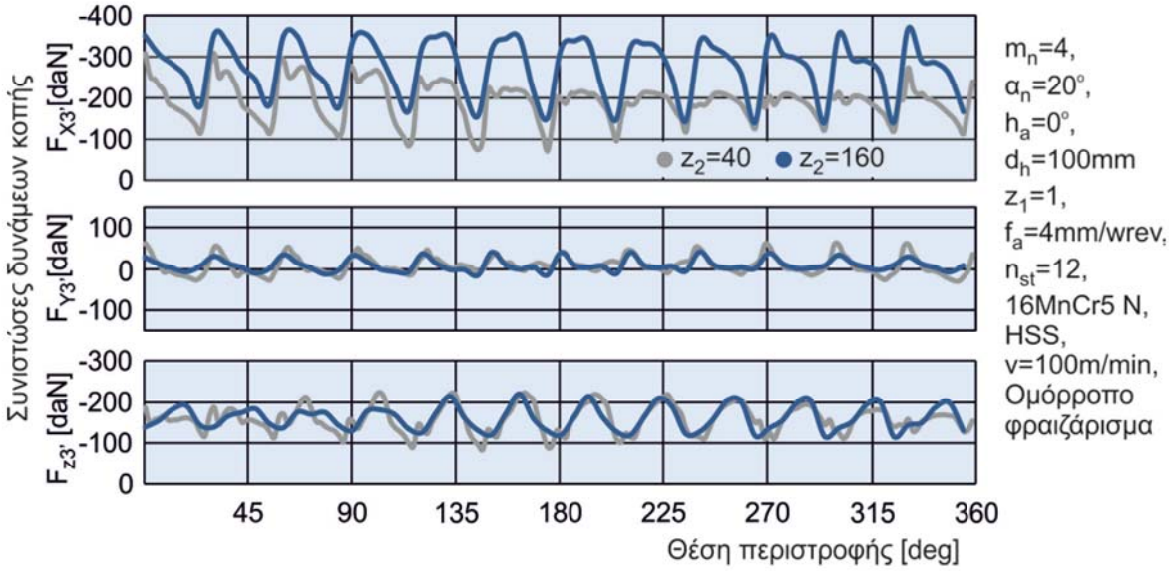


α_n=20°, z_1/z_2=1/40, n_{st}=12, h_a=0°, d_h/m_n=25, γ=2,547°,16MnCr5 N, HSS, v=100m/min, f_a=4mm/wrev, Ομόρροπο φραιζάρισμα

Σχήμα 6.3 Επίδραση του μέτρου της οδόντωσης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

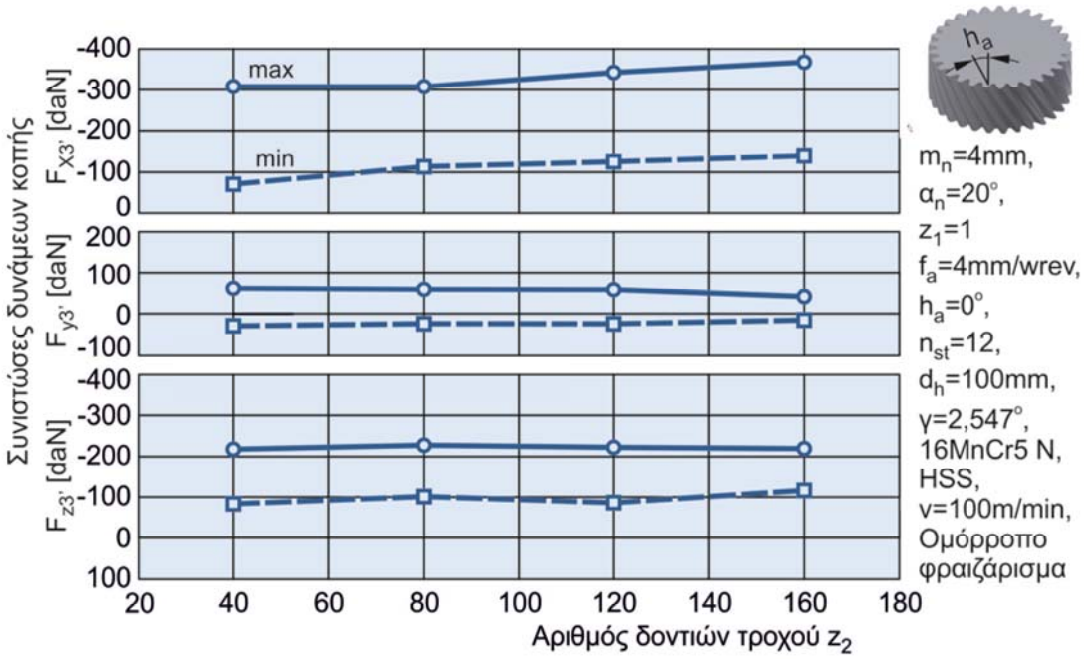
Η επόμενη παράμετρος της γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού που εξετάσθηκε ήταν ο αριθμός των δοντιών του παραγόμενου οδοντωτού τροχού. Η σύγκριση της εξέλιξης των δυνάμεων κοπής για δύο διαφορετικούς αριθμούς δοντιών του οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4. Όπως φαίνεται στο σχήμα η αύξηση του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου προκαλεί αύξηση των δυνάμεων στους άξονες X και Z και οριακή μείωση στον άξονα Y. Οι αλλαγές στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής οφείλονται σε τρία βασικά φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται και τα οποία συνολικά οδηγούν στην αύξηση που παρατηρείται στις δυνάμεις κοπής. Αρχικά παρατηρείται αύξηση των θέσεων κύλισης οι οποίες απαιτούνται για τη κατεργασία του δοντιού, λόγω του ότι η αύξηση των δοντιών ενός οδοντωτού τροχού αυξάνει και την εξωτερική του διάμετρο, η οποία με τη σειρά της μεγαλώνει την περιοχή μέσα στην οποία συνεργάζονται ο οδοντωτός τροχός με το κοπτικό εργαλείο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι ο όγκος του αυλακιού που υπόκειται κατεργασία μειώνεται ελαφρά με την αύξηση του αριθμού των δοντιών του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, οδηγεί σε περισσότερα και λεπτότερα απόβλιττα, το οποίο συνολικά οδηγεί σε ελαφριά αύξηση των δυνάμεων κοπής.

Κάτι άλλο το οποίο παρατηρείται εύκολα είναι το γεγονός ότι οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής για την περίπτωση της κατεργασίας οδοντωτού τροχού με 160 δόντια έχουν σταθερότερο εύρος κατά τη διάρκεια της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το εύρος στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού με 40 δόντια. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την κατεργασία του αυλακιού ενός οδοντωτού τροχού με πολλά δόντια παράγονται περισσότερα και λεπτότερα απόβλιττα σε σχέση με ένα οδοντωτό τροχό με λιγότερα δόντια γεγονός το οποίο συμβάλει στην ισοκατανομή των δυνάμεων κατά τη περιστροφή του κοπτικού εργαλείου. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού με 40 δόντια απαιτούνται 39 θέσεις κύλισης, στη περίπτωση του οδοντωτού τροχού με 160 δόντια απαιτούνται 62 θέσεις κύλισης, το οποίο μεταφράζεται σε 3 και 5 δόντια ανά στήλη να κατεργάζονται το τεμάχιο.



Σχήμα 6.4 Σύγκριση δυνάμεων κοπής για οδοντωτούς τροχούς με διαφορετικό αριθμό δοντιών

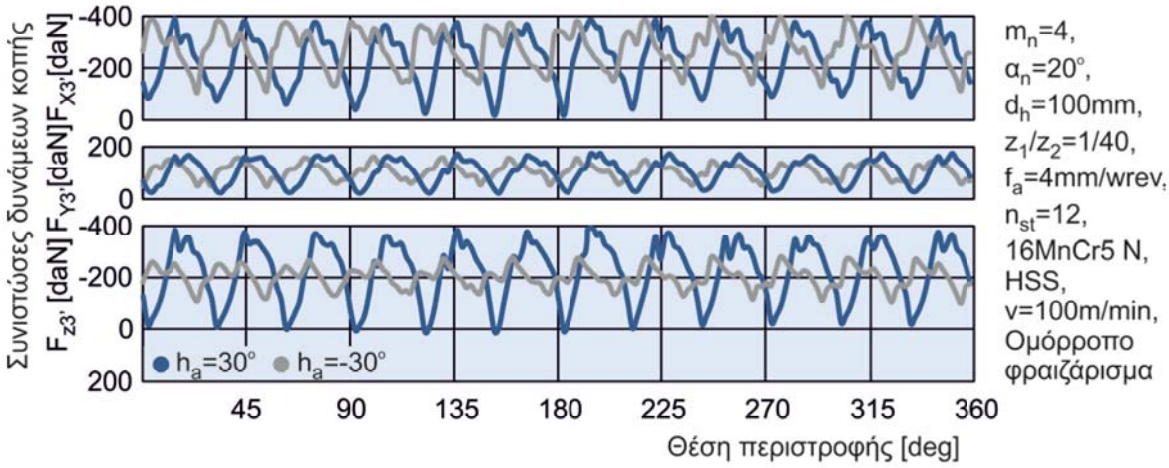
Συνολικά εκπονώντας προσομοιώσεις για μια σειρά διαφορετικών αριθμών δοντιών του οδοντωτού τροχού δημιουργούνται οι καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.



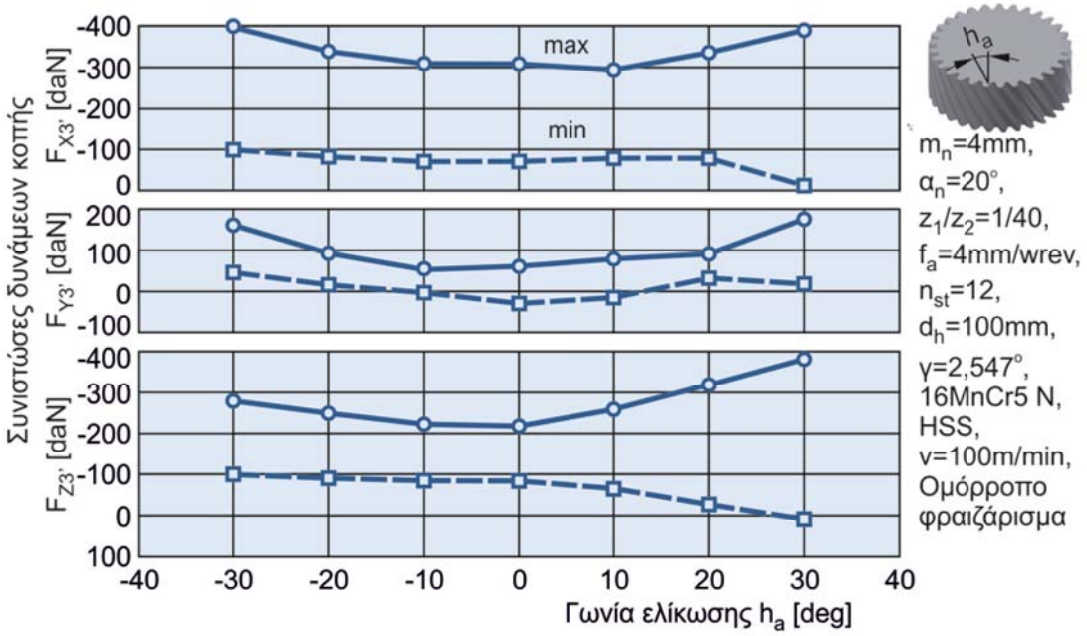
Σχήμα 6.5 Επίδραση του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

Η γωνία ελίκωσης του παραγόμενου οδοντωτού τροχού ήταν η τελευταία παράμετρος του οδοντωτού τροχού η οποία αναλύθηκε. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η σύγκριση της εξέλιξης των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία δύο ελικοειδών οδοντωτών τροχών. Όπως φαίνεται, οι δυνάμεις στους άξονες X και Y έχουν σχεδόν την ίδια μορφή αλλά έχουν μια διαφορά φάσης μεταξύ τους. Στον άξονα Z οι δυνάμεις διαφέρουν, όχι μόνο ως προς αυτή τη διαφορά φάσης, αλλά και ως προς το μέγεθος της φόρτισης, το οποίο δικαιολογείται από τη

διαφορετική γεωμετρία των αποβλίττων. Η κατεργασία του ομοιόστροφου φραιζαρίσματος όπως παρατηρήθηκε παράγει απόβλιττα με μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με την αντίστροφη στρατηγική, αυτό σε συνδυασμό με το ότι το κοπτικό εργαλείο στην ομοιόστροφη στρατηγική φορτίζεται περισσότερο στην εισερχόμενη παρειά και στην αντίστροφή στρατηγική φορτίζεται η εξερχόμενη παρειά, οδηγεί στη διαφορά τόσο στο μέγεθος των δυνάμεων στους άξονες X και Z όσο και στις μικροδιαφορές στη μορφή τους. Στο Σχήμα 6.7, παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής στη περίπτωση ενός ελικοειδούς οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 6.6 Σύγκριση δυνάμεων κοπής για οδοντωτούς τροχούς διαφορετικής γωνίας ελίκωσης



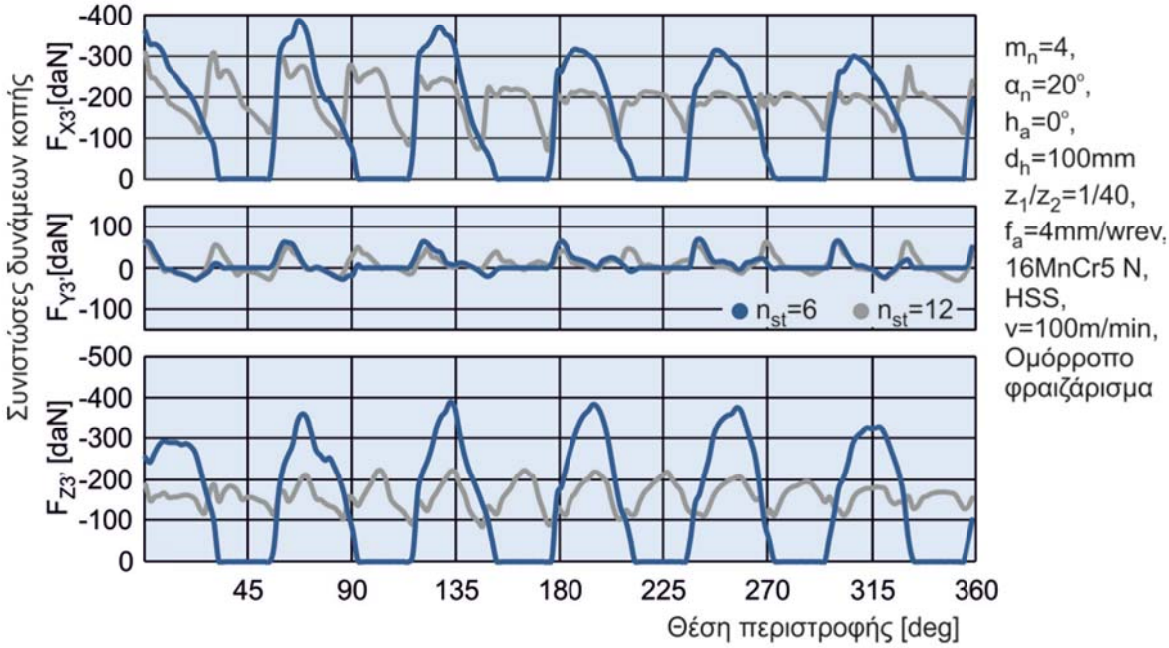
Σχήμα 6.7 Επίδραση της γωνίας ελίκωσης του οδοντωτού τροχού στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα, σε όλες τις περιπτώσεις οι συνιστώσες της δύναμης κοπής για ελικοειδή οδόντωση είναι μεγαλύτερες από εκείνες που είχαν παρατηρηθεί στην κατεργασία της ευθείας οδόντωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα απόβλιττα που παράγονται από την κατεργασία ελικοειδών οδοντωτών τροχών είναι πιο μακριά και λόγω του ότι στην

κατεργασία ελικοειδών οδοντώσεων τα δόντια του κοπτικού εργαλείου, τα οποία κατεργάζονται ταυτόχρονα τα αυλάκια του οδοντωτού τροχού, είναι περισσότερα από αυτά σε μία περίπτωση ευθείας οδόντωσης. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί στα διαγράμματα του σχήματος 6.7 ότι οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στους άξονες X και Y αυξάνονται συμμετρικά γύρω από εκείνες της κοπής της ευθείας οδόντωσης, ενώ για τη συνιστώσα Z δεν ισχύει το ίδιο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η κατεργασία με θετική γωνία ελίκωσης αντιστοιχεί σε κατεργασία με στρατηγική ομοιόστροφου φραιζαρίσματος, ενώ στην περίπτωση της αρνητικής γωνίας ελίκωσης σε κατεργασία με στρατηγική αντίστροφου φραιζαρίσματος. Αυτές οι δύο στρατηγικές παράγουν διαφορετικές μορφές αποβλίττου.

6.2 Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής

Εκτός από τις παραμέτρους του οδοντωτού τροχού, εξετάστηκαν και οι γεωμετρικοί παράμετροι του κοπτικού εργαλείου. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν ήταν ο αριθμός των αρχών του κοπτικού εργαλείου, καθώς και ο αριθμός των στηλών του. Οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής για τη κατεργασία με κοπτικό εργαλείο με 6 και 12 στήλες παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8.

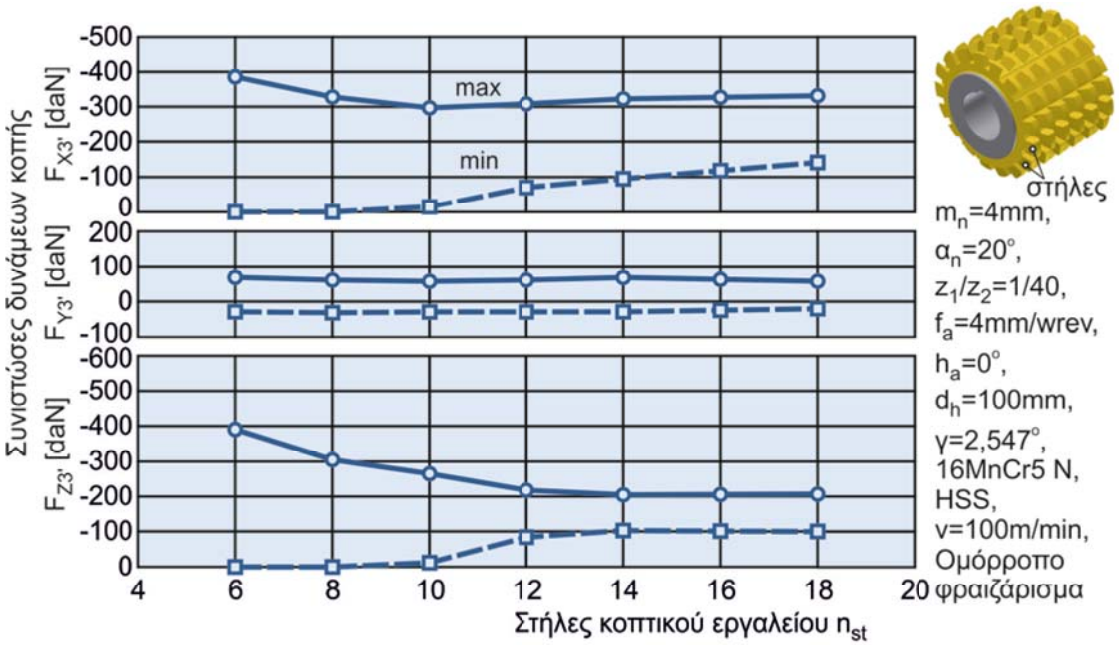


Σχήμα 6.8 Σύγκριση δυνάμεων κοπής για κοπτικά εργαλεία με διαφορετικό αριθμό στηλών

Η μείωση του αριθμού των στηλών του κοπτικού εργαλείου έχει δραματική επίδραση στην εξέλιξη των δυνάμεων κοπής μια και με την αλλαγή τους οι φορτίσεις μειώνονται σε πλήθος και γίνονται πιο έντονες μια και η ελάχιστη τιμή της φόρτισης μειώνεται και η μέγιστη αυξάνεται. Όπως παρατηρείται εύκολα οι δυνάμεις κοπής με τη χρήση κοπτικού εργαλείου με 6 στήλες αντιστοιχεί σε κοπή με χρήση μίας στήλης του κοπτικού εργαλείου τη φορά, έτσι μια στήλη του κοπτικού εργαλείου τελειώνει την κατεργασία του αυλακιού πριν αρχίσει την κατεργασία η επόμενη στήλη, γι' αυτό και οι συνιστώσες της δύναμης κοπής μηδενίζονται περιοδικά. Στην περίπτωση της κατεργασίας με ένα κοπτικό εργαλείο με 12 στήλες αυτό το φαινόμενο δεν παρατηρείται μια και η επόμενη στήλη του κοπτικού εργαλείου αρχίζει την κατεργασία πριν ολοκληρώσει η προηγούμενη στήλη την κατεργασία. Αυτό εξηγείται από το

γεγονός ότι όσο ο αριθμός των στηλών αυξάνει, η απόσταση μεταξύ στηλών του κοπτικού εργαλείου γίνεται μικρότερη και περισσότερες από τις στήλες του κοπτικού εργαλείου κατεργάζονται το αυλάκι ταυτόχρονα, οδηγώντας στην αύξηση των ελάχιστων τιμών των δυνάμεων κοπής. Όσον αφορά τις θέσεις κύλισης που απαιτούνται για την πλήρη κατεργασία του τροχού αυτές περιορίζονται στη περίπτωση του κοπτικού εργαλείου με 6 στήλες σε 19 από 39 θέσεις κύλισης που είναι στην περίπτωση του κοπτικού εργαλείου με 12 στήλες. Λόγω αυτού του γεγονότος τα απόβλιττα που προκύπτουν από το κοπτικό εργαλείο με 6 στήλες έχουν μιάμιση φορά μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με αυτό των αποβλίττων που παρήχθησαν με το κοπτικό εργαλείο με 12 στήλες.

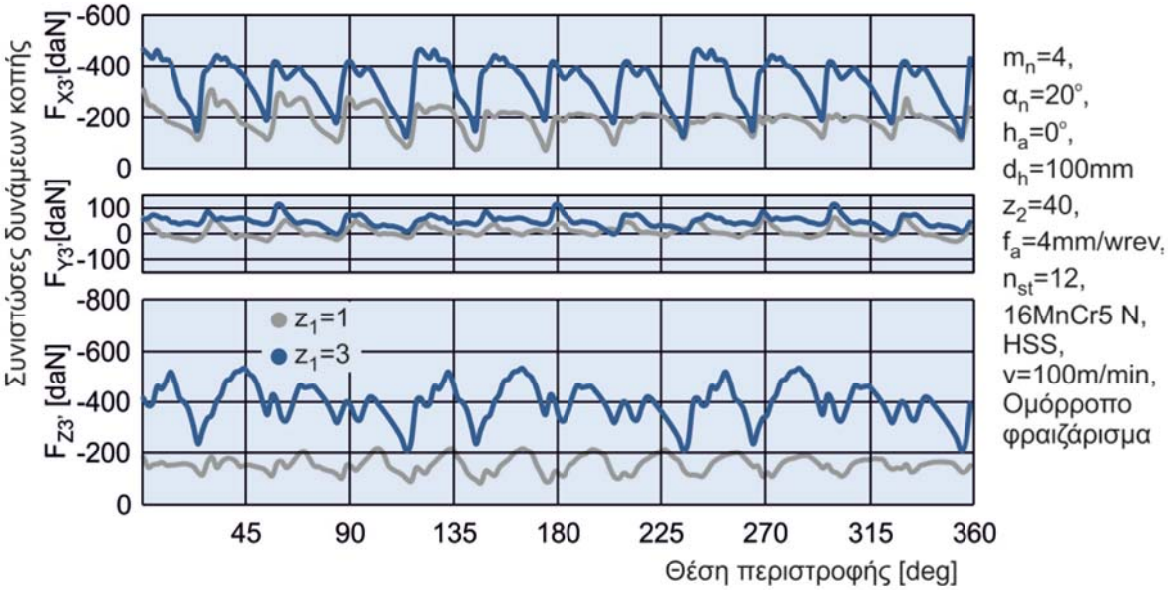
Η επίδραση του αριθμού των στηλών στις συνιστώσες της δύναμης κοπής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9. Σε γενικές γραμμές, οι συνιστώσες της δύναμης κοπής και στους τρεις άξονες μειώνονται καθώς ο αριθμός των στηλών του κοπτικού εργαλείου αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές των X και Z συνιστωσών των δυνάμεων κοπής μειώνονται σε μέτρο με την αύξηση του πλήθους των στηλών του κοπτικού εργαλείου, ενώ οι ελάχιστες τιμές ακολουθούν την αντίθετη πορεία. Αποτέλεσμα το οποίο συμφωνεί με τις παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω. Τέλος, συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στη περίπτωση του κοπτικού εργαλείου με 6 στήλες επαναλαμβάνεται και στο κοπτικό εργαλείο με 8 στήλες.



Σχήμα 6.9 Επίδραση του αριθμού των στηλών του κοπτικού εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

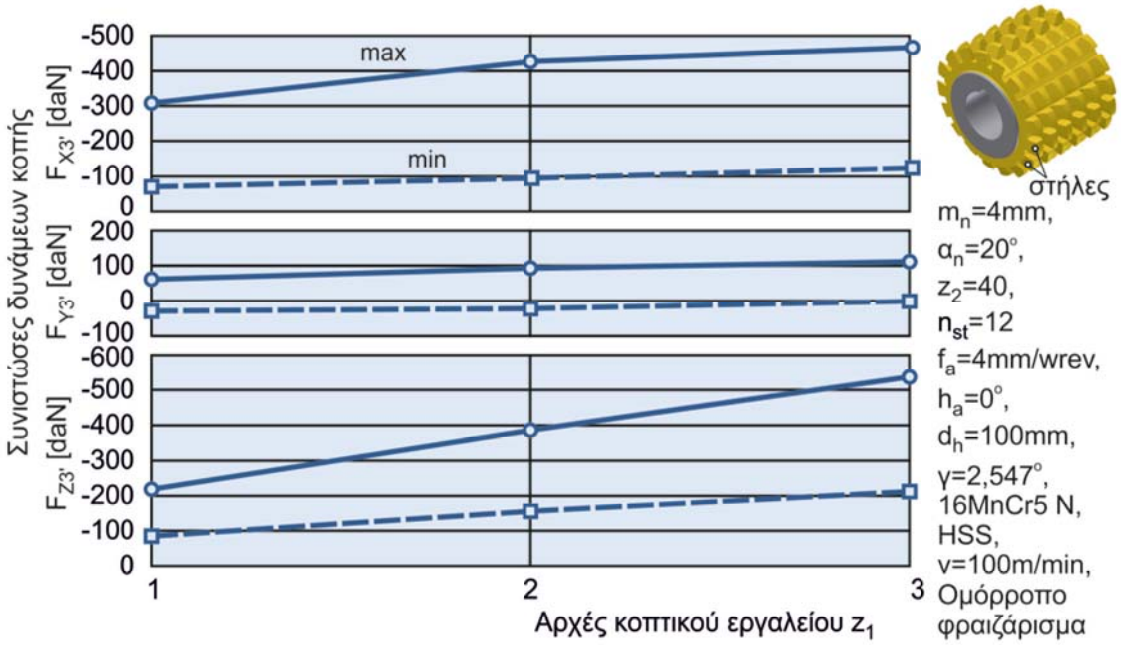
Οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής για κοπτικό εργαλείο με μία και τρείς αρχές παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.10. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των αρχών του κοπτικού εργαλείου. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα δεδομένου ότι όσο περισσότερες αρχές έχει ένα κοπτικό εργαλείο, τόσο λιγότερες θέσεις κύλισης απαιτούνται για να κοπεί πλήρως το αυλάκι του τροχού. Ως αποτέλεσμα τα απόβλιττα που προκύπτουν κατά την κατεργασία με κοπτικό εργαλείο με 3 αρχές έχουν ίδιο ανοιγμένο μήκος σε σχέση με αυτά της κατεργασίας με κοπτικό εργαλείο με μια αρχή αλλά έχουν σχεδόν το τριπλάσιο πάχος. Σύμφωνα με τις εξισώσεις των Kienzle-Victor αυτό οδηγεί σε υπερδιπλασιασμό των δυνάμεων κοπής, γεγονός το οποίο

παρατηρείται και στο διάγραμμα της Z συνιστώσας. Οι δυνάμεις στους άλλους δύο άξονες δεν έχουν ίδια αύξηση λόγω του ότι οι δυνάμεις σε αυτούς τους άξονες εξαρτώνται και από τη μορφή του αποβλίττου, η οποία προκαλεί αλληλοεξουδετερώσεις.



Σχήμα 6.10 Σύγκριση δυνάμεων κοπής για εργαλεία με διαφορετικό αριθμό αρχών

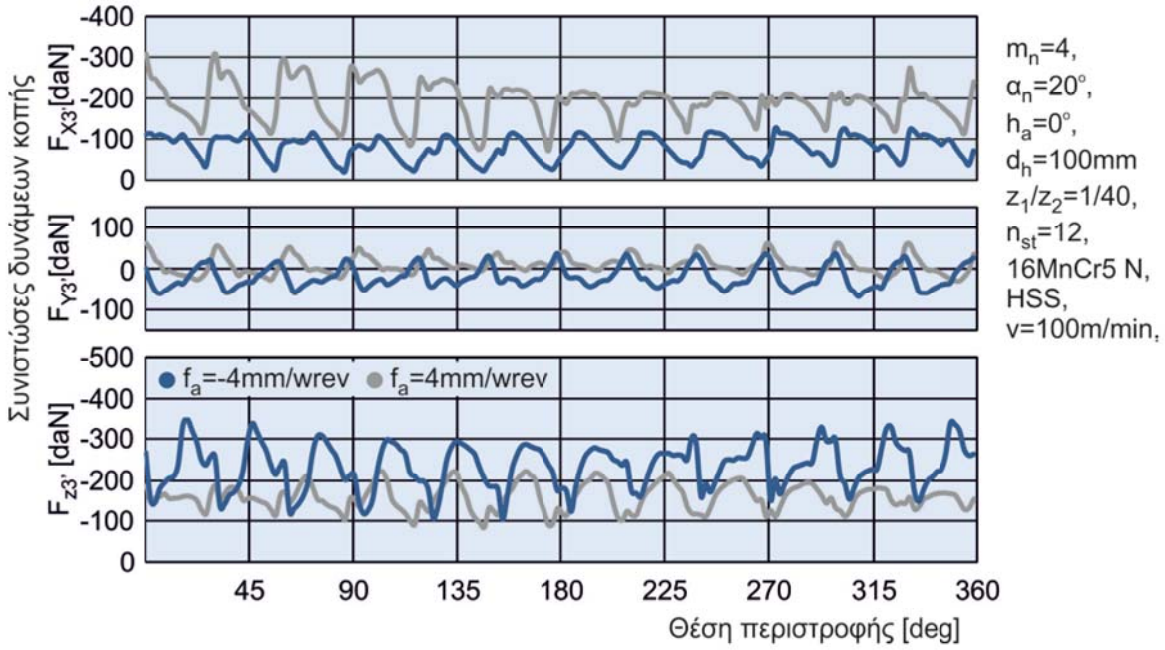
Συνολικά, εκπονώντας προσομοίωση και για κοπτικό εργαλείο με 2 αρχές σχεδιάζεται το διάγραμμα μεταβολής των ακραίων τιμών των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.



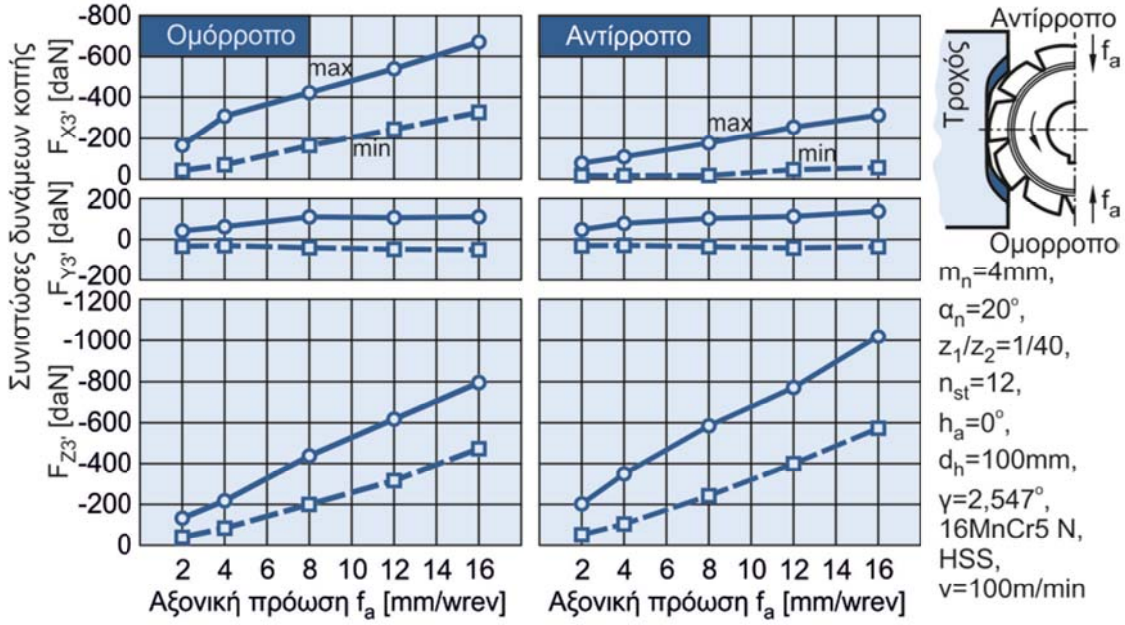
Σχήμα 6.11 Επίδραση του αριθμού των αρχών του κοπτικού εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

6.3 Επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στις δυνάμεις κοπής

Η τελευταία ομάδα παραμέτρων που αναλύεται είναι οι συνθήκες κοπής. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούν την αξονική πρόωση και τη στρατηγική της κατεργασίας. Η επίδραση της κατεύθυνσης της πρόωσης σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και την περιστροφή του εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12 Επίδραση της στρατηγικής της κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής



Σχήμα 6.13 Επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

Συγκρίνοντας τις δύο στρατηγικές διαπιστώνεται ότι με την ομόρροπη στρατηγική δημιουργούνται υψηλότερες δυνάμεις κοπής στον X άξονα για όλες τις τιμές της πρόωσης,

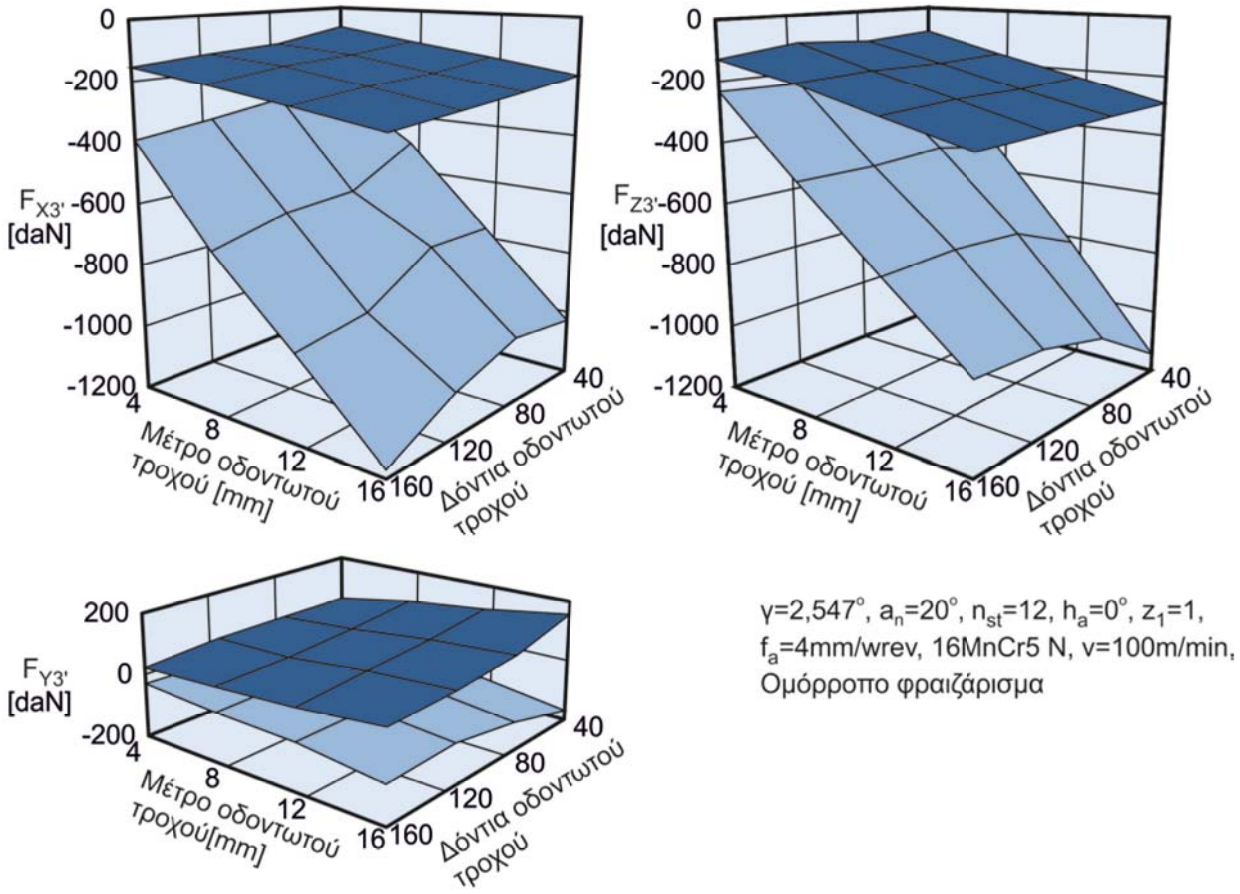
ενώ η συνιστώσα Z της δύναμης κοπής είναι πάντα υψηλότερη για την αντίρροπη στρατηγική κατεργασίας. Παρά το ότι τα απόβλιττα που προκύπτουν από τις δύο στρατηγικές είναι όμοια τόσο σε μορφή όσο και σε διαστάσεις η φόρτιση η οποία προκαλούν είναι τελείως διαφορετική. Έτσι οι δυνάμεις στο σύστημα της κοπτικής ακμής είναι σχεδόν ταυτόσημες στις δύο στρατηγικές αλλά όταν μετασχηματιστούν στο σύστημα συντεταγμένων του τροχού αναλύονται με διαφορετικό τρόπο. Στο Σχήμα 6.13 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με διαφορετική αξονική πρόωση, τόσο για ομόρροπο όσο και για αντίρροπο φραιζάρισμα.

Όπως είναι λογικό οι συνιστώσες στον X και Z άξονα αυξάνονται ραγδαία με την αύξηση της πρόωσης, ενώ στον Y άξονα είναι σχεδόν σταθερές, τόσο για το ομόρροπο όσο και για το αντίρροπο φραιζάρισμα. Οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται λόγω του ότι τα απόβλιττα που παράγονται με την αύξηση της πρόωσης είναι περισσότερα σε αριθμό εξαιτίας της ταχύτερης μετακίνησης του κοπτικού εργαλείου. Το πάχος των αποβλίττων καθώς αυξάνεται η πρόωση είναι όλο και πιο μεγάλο και διατηρείται για περισσότερες θέσεις κύλισης σε υψηλό επίπεδο.

6.4 Επίδραση των παραμέτρων του τροχού στις δυνάμεις κοπής

Για την εξέταση της συνδυασμένης επίδρασης των κατασκευαστικών παραμέτρων του τροχού, και πιο συγκεκριμένα του μέτρου της οδόντωσής και του αριθμού των δοντιών, στις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής εκπονήθηκε ένας αριθμός προσομοιώσεων. Με αυτόν τον τρόπο εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής με την ταυτόχρονη μεταβολή του αριθμού των δοντιών του τροχού και του μέτρου οδόντωσης του. Τα αποτελέσματα σε μορφή τρισδιάστατων επιφανειών παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι το μέτρο της οδόντωσης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής, ενώ ο αριθμός των δοντιών του τροχού επιφέρει μικρότερες αλλαγές στις δυνάμεις κοπής. Παρατηρώντας τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στον άξονα Z παρατηρείται ότι η συνιστώσα αυτή αυξάνεται με την αύξηση του μέτρου της οδόντωσης αλλά μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των δοντιών του τροχού. Η αιτία αυτής της μεταβολής είναι ότι με την αύξηση του μέτρου της οδόντωσης το αυλάκι του τροχού μεγαλώνει πράγμα το οποίο συμβαίνει και με την αύξηση του αριθμού των δοντιών του τροχού, γεγονός το οποίο παρατηρείται και από στον άξονα Y. Οι αλληλοεξουδετερώσεις των δυνάμεων κοπής καθώς και η μορφή και το πλήθος των αποβλίττων μεταβάλλουν την εικόνα στον άξονα X όπου η δύναμη κοπής αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των δοντιών.



Σχήμα 6.14 Επίδραση του αριθμού των δοντιών και του μέτρου του τροχού στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

7 Συμπεράσματα-Μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η κατεργασία οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Η μελέτη αυτή έγινε με τη χρήση δύο μοντέλων τα οποία αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Το πρώτο βασίστηκε σε μοντελοποίηση με χρήση ενός εμπορικού προγράμματος CAD ενώ το δεύτερο σε ένα πρόγραμμα μελέτης κατεργασιών με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα βασικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, περιλαμβάνουν:

1. Την ανάπτυξη της εφαρμογής HOB3D για την προσομοίωση της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση. Η εφαρμογή HOB3D χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του Autodesk Inventor, συνδύασε με ολοκληρωμένο τρόπο όλες τις απαραίτητες ενέργειες για την εκτέλεση των προσομοιώσεων της κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση οι οποίες είναι:
    - Η δημιουργία ενός κώδικα υπολογισμού των διεισδύσεων του κοπτικού εργαλείου στον όγκο του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία, με τη δημιουργία μίας τρισδιάστατης επιφάνειας υψηλής ακρίβειας, η οποία περιγράφει την κίνηση του κοπτικού εργαλείου στο χώρο. Η επιφάνεια αυτή παράγεται μέσα στο περιβάλλον του προγράμματος CAD με αυτόματο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου, του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού καθώς και τις παραμέτρους της κατεργασίας. Η ακρίβεια της παραγόμενης τροχιάς του κοπτικού εργαλείου ελέγχθηκε για την ορθότητα της με βάση την αναλυτική κινηματική της κατεργασίας και βρέθηκε ότι απέχει ελάχιστα από αυτήν. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε, είναι σε θέση να παράξει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αποβλίττων, πιο ακριβή από τα μέχρι τώρα σχετικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Λόγω της χρήσης ενός προγράμματος CAD τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πιο ευπαρουσίαστα και κατανοητά σε σχέση με άλλων μοντέλων που έχουν παρουσιαστεί, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω αναλύσεις με προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.
    - Μέσα από την ανάλυση των απαραμόρφωτων αποβλίττων, το HOB3D υπολογίζει τις δυνάμεις κοπής, οι οποίες απαιτούνται για 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 αποβλίττου στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου προκύπτει ως συνάρτηση του πάχους και του πλάτους του αποβλίττου, σταθμισμένα με τη χρήση δύο παραμέτρων του κατεργαζόμενου υλικού. Η διαδικασία υπολογισμού γίνεται αυτόματα από το μοντέλο και δεν απαιτείται από το χρήστη καμία ενέργεια παρά μόνο την εισαγωγή των παραμέτρων του υλικού προς κατεργασία. Τα αποτελέσματα του κώδικα αυτού περιλαμβάνουν τις δυνάμεις κοπής σε όλες τις θέσεις περιστροφής όλων των θέσεων κύλισης, ενώ υπολογίζονται και οι συνολικές δυνάμεις κοπής σε όλο το κοπτικό εργαλείο.
    - Με τη χρήση λογισμικού ανάπτυξης εφαρμογών δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον το οποίο είναι δυνατό να χρησιμοποιήσει ο χρήστης του προγράμματος για να εκτελέσει προσομοιώσεις και να αναλύσει αποτελέσματα εκτελεσμένων προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα τα οποία προσφέρονται περιλαμβάνουν τις διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίττων και τις δυνάμεις κοπής.

- Τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε επαληθεύτηκαν τόσο με αναλυτικές σχέσεις όσο και με πειραματικά δεδομένα. Αναλυτικότερα το αυλάκι του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού το οποίο προκύπτει από την προσομοίωση ελέγχθηκε με βάση τις αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τη κατατομή του δοντιού, όσο και με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Όσον αφορά τις δυνάμεις κοπής αυτές επιβεβαιώθηκαν με τη χρήση πειραματικών δεδομένων για μεμονωμένα δόντια όσο και αποτελέσματα από δυναμομετρήσεις με ολόκληρο το κοπτικό εργαλείο.

2. Το δεύτερο μοντέλο το οποίο ανεπτύχθη, βασίστηκε σε ένα εμπορικό πρόγραμμα ανάλυσης κατεργασιών παραμόρφωσης υλικού με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της ροής του αποβλίττου μέσα στο χώρο του αυλακιού καθώς και τον υπολογισμό των αναπτυσσομένων δυνάμεων κοπής. Αναλυτικότερα οι ενέργειες που εκτελέστηκαν για την προσομοίωση της κατεργασίας ήταν:
    - Η δημιουργία κατάλληλων προεπεξεργαστών για την εισαγωγή της στερεής γεωμετρίας του αυλακιού, η οποία προέρχεται από τα αποτελέσματα του HOB3D, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Εκτός αυτής, ο προεπεξεργαστής δημιουργεί τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και το τοποθετεί κατάλληλα στο χώρο έτσι ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν ο χρόνος προετοιμασίας της προσομοίωσης.
    - Η μοντελοποίηση του υλικού προς κατεργασία και του υλικού του κοπτικού έγινε με τη χρήση πειραματικών δεδομένων που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία.
    - Η επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, η οποία έγινε σε τρία στάδια. Αρχικά η τροχιά του κοπτικού συγκρίθηκε με βάση την αντίστοιχη πορεία του κοπτικού εργαλείου, όπως αυτή δημιουργείται στο HOB3D. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι η πορεία του κοπτικού εργαλείου και στις δύο περιπτώσεις είναι ακριβώς η ίδια. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των παραγομένων αποβλίττων καθώς και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής, σύγκριση που επιβεβαίωσε την ορθότητα των υπολογισμών του λογισμικού HOB3D.

3. Στη τελευταία φάση της διατριβής, έγινε εκτέλεση του μοντέλου HOB3D για τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατεργασία στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής.

Μελλοντικές κατευθύνσεις για περαιτέρω ερευνητικές αποστολές:

- Ανάπτυξη κώδικα και προσθήκη στο λογισμικό HOB3D του υπολογισμού των αναπτυσσομένων τάσεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Μελέτη της επίδρασης των διαφοροποιήσεων στη γεωμετρία της κατατομής αναφοράς στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής και στις αναπτυσσόμενες τάσεις στο κοπτικό εργαλείο και τη γεωμετρία του τελικού οδοντωτού τροχού.
- Εισαγωγή ενός μοντέλου δυναμικής συμπεριφοράς της κατεργασίας στην κινηματική του μοντέλου.
- Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και σε άλλες κατεργασίες κοπής οδοντώσεων με σύνθετη κινηματική όπως η πλάνιση με οδοντωτό κανόνα, η πλάνιση με κύλιση, το φραιζάρισμα αποφλοίωσης με κύλιση κ.α..

8 Βιβλιογραφία

[1] B. Karpuschewski, H. J. Knoche, and M. Hipke, "Gear finishing by abrasive processes," *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 57, pp. 621-640, 2008.

[2] L. Runai and L. Ming, "Research on Key Technologies of Direct-Drive Gear Hobbing Machine of Dry Cutting," presented at the 2010 International Conference on Computer, Mechatronics,Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010.

[3] DIN-3972, "Bezugsprofile von Verzahnwerkzeugen fuer Evolventenverzahnungen Nach DIN 867 " *Taschenbuch 106,* 1981.

[4] ISO-2490, "Solid (monobloc) gear hobs with tenon drive or axial keyway, 0,5 to 40 module -- Nominal dimensions," 2007.

[5] O. Winkel, "New Developments in gear hobbing," *Gear Technology,* vol. March/April, pp. 45-52, 2010.

[6] T. Tokawa, Y. Nishimura, and Y. Nakamura, "High productivity dry hobbing system," *Mitsubishi heavy industries Ltd. Technical Review,* vol. 38, pp. 27-31, 2001.

[7] Fette-Lmt., "Gear Cutting Tools Catalog."

[8] G. Sulzer, "Leistungssteigerung bei der Zylinderradherstellung durch genaue Erfassung der Zerspankinematik," Dissertation, TH Aachen, 1973.

[9] K. Joppa, "Leistungssteigerung beim Waelzfraesen mit Schnellarbeitsstahl durch Analyse, Beurteilung und Beinflussung des Zerspanprozesses," Dissertation, TH Aachen, 1977.

[10] K. Bouzakis and W. König, "Process Models for the Incorporation of gear Hobbing into an Information Centre for Machining Data," *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 30, pp. 77-82, 1981.

[11] K. D. Bouzakis, "Konzept und technologishe Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Waelzfraese," Habilitation, TH Aachen, 1980.

[12] O. Kienzle and H. Victor, "Spezifische Schnittkrafte bei der Metallbearbeitung," *Werkstofftechnik und Machinenbau* vol. 47, pp. 224–225, 1957.

[13] K. D. Bouzakis and A. Antoniadis, "Optimizing of Tangential Tool Shift in Gear Hobbing*," *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 44, pp. 75-78, 1995.

[14] K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, and N. Vidakis, "Gear Hobbing Cutting Process Simulation and Tool Wear Prediction Models," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 124, pp. 42-51, 2002.

[15] P. Gutmann, "Zerspankraftberechnung beim Waelzfraesen," Ph.d. thesis, TH Aachen, 1988.

[16] A. Abood, "Dynamic Analysis of the Cutting Forces in Gear Hobbing," Ph.D. Thesis, Newcastle University, 2002.

[17] M. Komori, M. Sumi, and A. Kubo, "Method of Preventing Cutting Edge Failure of Hob Due to Chip Crush," *JSME International Journal,* vol. 47, pp. 1140-1148, 2004.

[18] U. Rutjes, "Calculation of chip removal for an potimisation of the gear hobbing process," presented at the GEARS 2003 Gears and Transmitions Workshop, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

[19] F. Klocke, C. Grogels, A. Stuckenberg, and R. Schalaster, "Software-Based process design in gear finish hobbing," *Gear Technology,* vol. May, pp. 48-52, 2010.

[20] J. Michalski and L. Skoczylas, "A comparative analysis of the geometrical surface texture of a real and virtual model of a tooth flank of a cylindrical gear," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 204, pp. 331-342, 2008.

[21] J. Michalski and L. Skoczylas, "Modelling the tooth flanks of hobbed gears in the CAD environment," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 36, pp. 746-751, 2008.

[22] J. Michalski, "Surface topography of the cylindrical gear tooth flanks after machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 43, pp. 513-528, 2009.

[23] L. Vedmar, "A Parametric Analysis of the Gear Surface Roughness After Hobbing," *Journal of Mechanical Design,* vol. 132, pp. 1110041-8, 2010.

[24] L. Vedmar, C. Andersson, and J.-E. Stahl, "A Parametric Analysis of the Undeformed Chip Geometry in Gear Hobbing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 131, pp. 061003-8, 2009.

[25] V. Dimitriou and A. Antoniadis, "Advanced CAD Simulation of Gear Hobbing," in *CIRP - 10th International Workshop on Modeling of Machinig Operation*, University of Calabria, 2007.

[26] V. Dimitriou and A. Antoniadis, "CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 41, pp. 347-357, 2009.

[27] V. Dimitriou, N. Vidakis, and A. Antoniadis, "Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of 3-Dimensional Kinematics Modeling," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 129, pp. 911-918, 2007.

[28] A. Antoniadis, "Determination of the impact tool stresses during gear hobbing and determination of cutting forces during hobbing of the hardened gears.," Dissertation, Aristoteles University of Thessaloniki, 1989.

[29] K. D. Bouzakis and A. Antoniadis, "Optimal Selection of Machining Data in Gear Hobbing Regarding the Tool Mechanical Stresses Occuring During the Cutting Process," *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 37, pp. 109-112, 1988.

[30] A. Antoniadis, N. Vidakis, and N. Bilalis, "Fatigue Fracture Investigation of Cemented Carbide Tools in Gear Hobbing, Part 2: The Effect of Cutting Parameters on the Level of Tool Stresses---A Quantitative Parametric Analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 124, pp. 792-798, 2002.

[31] A. Antoniadis, N. Vidakis, and N. Bilalis, "Fatigue Fracture Investigation of Cemented Carbide Tools in Gear Hobbing, Part 1: FEM Modeling of Fly Hobbing and Computational Interpretation of Experimental Results," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 124, pp. 784-791, 2002.

[32] K. D. Bouzakis, O. Friderikos, and I. Tsiafis, "FEM-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of spur and helical gears," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* vol. 1, pp. 18-26, 2008.

[33] K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, and O. Friderikos, "Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods," *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 57, pp. 676-696, 2008.

[34] O. Friderikos, "Simulation of Chip Formation and Flow in Gear Hobbing Using the Finite Element Method," Ph.D.Thesis, Aristoteles University of Thessaloniki, 2008.

[35] C. Claudin and J. Rech, "Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing--Application to the evaluation of various cutting edge preparations in high speed dry gear hobbing," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 209, pp. 5152-5160, 2009.

[36] J. Rech, "Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing," *Wear,* vol. 261, pp. 505-512, 2006.

[37] J. Rech, M. A. Djouadi, and J. Picot, "Wear resistance of coatings in high speed gear hobbing," *Wear,* vol. 250, pp. 45-53, 2001.

[38] H. Matsuoka, S. Suda, H. Yokota, and Y. Tsuda, "Fundamental Research on Hobbing with Minimal Quantity Lubrication of Cutting Oil (Effect of Quantity of Oil Supply)," *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing,* vol. 49, pp. 590-599, 2006.

[39] H. Matsuoka, H. Ono, and Y. Tsuda, "Wear reduction effects of Ca sulfonate on coated tools in hobbing," *JSME International Journal,* vol. 45, pp. 821-830, 2002.

[40] H. Matsuoka, H. Ono, and Y. Tsuda, "Fundamental reaserch on cutting performance of water soluble cutting fluids compared with dry hobbing," *JSME International Journal,* vol. 18, pp. 371-380, 2005.

[41] J. Gerth, M. Larsson, U. Wiklund, F. Riddar, and S. Hogmark, "On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting," *Wear,* vol. 266, pp. 444-452, 2009.

[42] J. Gerth, M. Werner, M. Larsson, and U. Wiklund, "Reproducing wear mechanisms in gear hobbing--Evaluation of a single insert milling test," *Wear,* vol. 267, pp. 2257-2268, 2009.

[43] P. Kyratsis, N. Bilalis, and A. Antoniadis, "CAD-based simulations and design of experiments for determining thrust force in drilling operations," *CAD Computer Aided Design,* vol. 43, pp. 1879-1890, 2011.

[44] P. Kyratsis, N. Tapoglou, N. Bilalis, and A. Antoniadis, "Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface," *International Journal of Machining and Machinability of Materials,* vol. 10, pp. 18-33, 2011.

[45] N. Tapoglou and A. Antoniadis, "3-Dimensional kinematics simulation of face milling," *Measurement,* vol. 45, pp. 1396-1405, 2012.

[46] König , W. and K. Essel *Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspanung metallischer Werkstoffe*. 1973: Verlag Stahl Eisen m.b.H., Düsseldorf.

[47] ISO-1328, *Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth*. 1995.

[48] H. Petri, "Zahnfuß-Analyse bei außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil I - Vorbetrachtungen," *Antriebstechnik,* vol. 14, pp. 19-22, 1975.

[49] H. Petri, "Zahnfuß-Analyse bei außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil II - Berechnung," *Antriebstechnik,* vol. 14, pp. 125-131, 1975.

[50] H. Petri, "Zahnfuß-Analyse bei außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil III - Berechnung," *Antriebstechnik,* vol. 14, pp. 289-297, 1975.

[51] H. Petri, "Zahnfuß-Analyse bei außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil IV - Bildiche Darstellung mittels EDV," *Antriebstechnik,* vol. 14, pp. 369-371, 1975.

[52] J. D. Gardner, A. Vijayaraghavan, and D. A. Dornfeld, "Comparative Study of Finite Element Simulation Software," ed, 2005.

[53] S. P. F. C. Jaspers and J. H. Dautzenberg, "Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 122, pp. 322-330, 2002.

[54] W. Chen and B. Song, *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*: Springer, 2010.

[55] F. Klocke and A. Kuchle, *Manufacturing Processes 1: Lathing, Milling, Drilling*: Springer, 2011.

[56] H. Chandrasekaran, R. M'Saoubi, and H. Chazal, "Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split hopkinson bar tests," *Machining Science and Technology,* vol. 9, pp. 131-145, 2005/03/23 2005.

[57] M. Spittel and T. Spittel, "Steel symbol/number: 16MnCr5/1.7131," in *Metal Forming Data - Ferrous Alloys - deformation behaviour*. vol. 2C1, H. Warlimont, Ed., ed: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.