



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις
κατεργασίες οδοντώσεων πλάνισης και αποφλοίωσης με κύλιση**

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

Υπό τον

Άγγελο Ε. Μαρινάκη

Χανιά, Σεπτέμβριος 2023



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

Optimization of gear shaping and power skiving cutting conditions

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

by

Angelos E. Marinakis

Chania, September 2023

Copyright © υπό Άγγελο Μαρινάκη
Χανιά 2023

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

Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας - Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Τίτλος (ελληνικά/αγγλικά):

Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις κατεργασίες οδοντώσεων
πλάνισης και αποφλοιώσης με κύλιση

Optimization of gear shaping and power skiving cutting conditions

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άγγελος Μαρινάκης

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Αριστομένης Αντωνιάδης (Επιβλέπων)
2. Νικόλαος Μπιλάλης
3. Γεώργιος Σταυρουλάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 29 / 09 / 2023

1. Αριστομένης Αντωνιάδης, Καθηγητής, ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης



Digitally signed by
Aristomenis
Antoniadis
Date: 2023.10.02
11:33:35 +03'00'

2. Νικόλαος Μπιλάλης, Καθηγητής, ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης

Nikolaos
Bilalis

Digitally signed by
Nikolaos Bilalis
Date: 2023.10.02
14:06:20 +03'00'

3. Γεώργιος Σταυρουλάκης, Καθηγητής, ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης

GEORGIOS STAVROULAKIS
02/10/2023 15:54

4. Παναγιώτης Αλευράς, Επίκουρος Καθηγητής, ΜΠΔ, Πολυτεχνείο Κρήτης

PANAGIOTIS ALEVRAS
02/10/2023 11:38

5. Μιχαήλ Ζερβάκης, Καθηγητής, ΗΜΜΥ, Πολυτεχνείο Κρήτης

Michail
Zervakis

Digitally signed by
Michail Zervakis
Date: 2023.10.02
11:51:11 +03'00'

6. Κωνσταντίνος Δαυίδ, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

KONSTANTINOS DAVID KONSTANTINOS DAVID
02.10.2023 14:19

7. Παναγιώτης Κυράτσης, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων και

PANAGIOTIS KYRATSIS PANAGIOTIS KYRATSIS
02.10.2023 12:38

Βιομηχανικού Σχεδιασμού Τ.Ε., Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Στους γονείς μου,
Μανώλη και Μαρία



Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	III
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα	IV
Περίληψη	V
Abstract	VI
Λίστα μεταβλητών	VII
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διατριβής	1
1.2 Στόχοι της διατριβής	1
1.3 Δομή της διατριβής	2
2. Στάθμη των γνώσεων	4
2.1 Οδοντωτοί τροχοί και κατεργασίες κοπής οδοντώσεων	4
2.2 Κατεργασία οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση	5
2.3 Έρευνα στην κατεργασία πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων	8
2.3.1 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας	8
2.3.2 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	14
2.3.3 Βελτιστοποίηση κοπτικών εργαλείων	16
2.4 Κατεργασία οδοντώσεων με αποφλοίωση με κύλιση	17
2.5 Έρευνα στην κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων	21
2.5.1 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας	22
2.5.2 Βελτιστοποίηση κοπτικών εργαλείων	32
2.6 Συνεισφορά της διατριβής	36
3. Μοντέλο προσομοίωσης	38
3.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου	38
3.2 Δομή του μοντέλου προσομοίωσης	39
3.3 Δημιουργία κατατομής των κοπτικών εργαλείων	40
3.4 Μοντελοποίηση της κινηματικής των κατεργασιών	42
3.4.1 Πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων	44
3.4.2 Αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων	46
3.5 Προσομοίωση τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλίπτων	47
3.5.1 Απόβλιττα πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων	48
3.5.2 Απόβλιττα αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων	50
3.6 Επιβεβαίωση της γεωμετρίας της παραγόμενης οδόντωσης	51
4. Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής	54
4.1 Ανάλυση διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίπτων	54
4.2 Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής	59
4.3 Δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων	62
4.4 Δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων	65

5.	Λογισμικό προσομοίωσης κατεργασιών οδοντώσεων Oplitis	67
5.1	Παρουσίαση του λογισμικού	67
5.2	Κύριες φόρμες κατεργασίας	69
5.3	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού	70
6.	Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής	76
6.1	Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας για την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων	76
6.1.1	Επίδραση των παραμέτρων του κατεργαζόμενου τεμαχίου στις δυνάμεις κοπής	76
6.1.2	Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής.....	80
6.1.3	Επίδραση των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής	82
6.2	Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας για την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων	84
6.2.1	Επίδραση των παραμέτρων του κατεργαζόμενου τεμαχίου στις δυνάμεις κοπής	85
6.2.2	Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής.....	88
6.2.3	Επίδραση των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής	89
7.	Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας	92
7.1	Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών στην πλάνιση με κύλιση	92
7.2	Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών στην αποφλοίωση με κύλιση	96
8.	Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις	100
9.	Βιβλιογραφία.....	102

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής σηματοδοτεί τη λήξη των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, έπειτα από μία περίοδο δεκαετούς πορείας. Θα ήθελα να αποδώσω ξεχωριστές ευχαριστίες σε όλους όσοι με βοήθησαν και στήριξαν αυτή μου την προσπάθεια.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Αριστομένη Αντωνιάδη για την αμέριστη συμπαράστασή του και τις πολύτιμες συμβουλές του σε κάθε τομέα. Η καθοδήγησή του υπήρξε ουσιαστική για την επίλυση κάθε δυσκολίας που παρουσιάστηκε και την επίτευξη των στόχων της διατριβής. Προβλήματα που αρκετές φορές έμοιαζαν δισεπίλυτα, φάνταζαν πλέον «απλά» έπειτα από παρουσίασή τους στον κ. Αντωνιάδη. Ένα μεγάλο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλο αυτό το διάστημα, τόσο για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, αλλά και ως μέλος του Εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3).

Ευχαριστώ πολύ τους Καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Νικόλαο Μπιλάλη και κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις τους, οι οποίες συνέβαλλαν ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας της παρούσας διατριβής. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τον χρόνο που αφιέρωσαν στη μελέτη της παρούσας εργασίας και την επισήμανση σημαντικών παρατηρήσεων.

Ακόμα, ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) για τη συμβολή τους στη δημιουργία ενός ευχάριστου και φιλικού κλίματος στον χώρο του εργαστηρίου. Ευχαριστώ την Διπλ. Μηχ. Εμμανουέλα Δανδούτη για τη συνεισφορά της στην παρούσα εργασία, ιδιαίτερα στη μελέτη της κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Ευχαριστώ τον Δρ. Μηχανικό Ευάγγελο Νικολιδάκη για τις συμβουλές και υποδείξεις του σε πάσης φύσεως επιστημονικά θέματα, αλλά και για τις φιλικές σχέσεις που αναπτύξαμε. Ευχαριστώ την Δρ. Μηχανικό Αναστασία Κατσαμάκη, η οποία παρείχε τις γνώσεις της σε επιστημονικά και όχι μόνο θέματα σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου.

Ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε τους τελευταίους 16 μήνες εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου, στους φίλους μου και στην Αλεξάνδρα για τη διαρκή συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Αναμφίβολα η συνεχής αυτή υποστήριξη συνέβαλε στην έγκαιρη ολοκλήρωσή τους.

Άγγελος Μαρινάκης,
Σεπτέμβριος 2023

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Άγγελος Μαρινάκης γεννήθηκε στα Χανιά το 1995. Το 2018 αποφοίτησε από τη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης με βαθμό 8.77, όπου και έλαβε έπαινο Ευφήμου Μνείας και το 3^ο βραβείο αριστείας του ιδρύματος Limmat της Ελβετίας. Η Διπλωματική του εργασία έχει τίτλο «Εφαρμογή Επαυξημένης Πραγματικότητας για Διαδραστικούς Γεωμετρικούς Μετασχηματισμούς Τρισδιάστατων Μοντέλων CAD». Το Νοέμβριο του 2018 έγινε δεκτός ως υποψήφιος διδάκτωρ από τη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης με ερευνητικό πεδίο την προσομοίωση κατεργασιών οδοντώσεων.

Από το 2018 έως και σήμερα έχει εργαστεί ως εργαστηριακός συνεργάτης στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης, συμβάλλοντας στην εκπόνηση εργαστηριακών ασκήσεων και την προετοιμασία εκπαιδευτικού υλικού στα προπτυχιακά μαθήματα «Μηχανολογικό Σχέδιο», «Τεχνική Σχεδίαση Ηλεκτρομηχανολογικών Εγκαταστάσεων», καθώς και στο μεταπτυχιακό μάθημα «Κατεργασίες με τη βοήθεια Η/Υ». Από το 2018 έως το 2020 έχει εργαστεί με σύμβαση εργασίας στο εθνικό ερευνητικό πρόγραμμα «Ανάπτυξη Ψυχαγωγικού Λογισμικού Εκπαίδευσης Ψηφιακής Καθοδήγησης Εργαλειομηχανών».

Δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές:

- **Marinakis A.**, Alevras P., Antoniadis A. A Systematic Analysis of the Power Skiving Process using a novel Gear Manufacturing Simulation Software, Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, 2022
- **Marinakis A.**, Dandouti E., Antoniadis A. CAD based Simulation Model for the Calculation of Chip Geometry and Cutting Force Components in Gear Shaping, Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME 2022
- **Marinakis A.**, Mania K., Antoniadis A. Augmented Reality for CAD-CAM Training featuring Interactive Geometric Transformations, International Journal of Computer-Aided Design and Applications, 2021

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές:

- Daskalogrigorakis G., Kirakosian S., **Marinakis A.**, Nikolidakis E., Pateraki I., Antoniadis A., Mania K. G-Code Machina: A Serious Game for G-code and CNC Machine Operation Training. In Proc. IEEE Global Engineering Education Conference (IEEE EDUCON 2021)
- **Marinakis A.**, Katsamaki A., Pateraki I., Nikolidakis E., Antoniadis A. A Novel Serious Game for Education and Training of Computer-Aided Manufacturing (CAM) Programming, 30th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering, Praha, Czech Republic, 2021
- **Marinakis A.**, Mania K., Antoniadis A. Augmented Reality for CAD-CAM Training featuring Interactive Geometric Transformations, Proceedings of CAD'20, Barcelona, Spain, 2020

Περίληψη

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία μηχανών, ευρέως διαδεδομένοι στη βιομηχανία λόγω της ικανότητάς τους για ακριβή, ευέλικτη και αξιόπιστη μετάδοση περιστροφικής κίνησης και ισχύος. Κάθε έτος παράγονται δισεκατομμύρια τεμάχια οδοντωτών τροχών, ενώ η παγκόσμια ζήτηση τους αυξάνεται συνεχώς. Η αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί τον βασικό καταναλωτή τους, ενώ ακολουθούν η αεροναυπηγική βιομηχανία, η αγροτική βιομηχανία, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κ.λπ., με επίσης τεράστιες απαιτήσεις σε οδοντωτούς τροχούς. Έτσι, η βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής οδοντώσεων είναι ένα από τα σημαντικότερα διεθνή ζητήματα στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Η πλάνιση με κύλιση και η αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων αποτελούν δύο από τις πιο χαρακτηριστικές κατεργασίες παρασκευής οδοντωτών τροχών. Η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων είναι η πρωταρχική έως τώρα κατεργασία κατασκευής εσωτερικών οδοντωτών τροχών, ενώ μόλις τα τελευταία χρόνια έχει βρει εφαρμογή και η αποφλοίωση με κύλιση, λόγω κυρίως της ανάπτυξης των σύνθετων κέντρων κατεργασίας, αυξάνοντας σημαντικά τους ρυθμούς παραγωγής.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο εκτελείται σε ένα εμπορικό σύστημα CAD και προσομοιώνει τις κατεργασίες κατασκευής οδοντώσεων της πλάνισης και της αποφλοίωσης με κύλιση. Τα στάδια της προσομοίωσης περιλαμβάνουν τη δημιουργία της κοπτικής κατατομής, τον υπολογισμό της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου και στη συνέχεια την προσομοίωση της πολύπλοκης κινηματικής για κάθε κατεργασία. Η δημιουργία του κοπτικού εργαλείου και της τροχιάς που ακολουθεί γίνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή διακριτοποίηση, η οποία σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια του λογισμικού CAD εξασφαλίζουν τη μέγιστη ακρίβεια της προσομοίωσης. Τα παραγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν την τελική γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού καθώς και τα τρισδιάστατα απαραμόρφωτα απόβλιντα που παράγονται κατά τη διάρκεια κάθε κατεργασίας. Η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίντων χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής οι οποίες μετασχηματίζονται σε τέσσερα διαφορετικά συστήματα. Για την αποτελεσματική λειτουργία του μοντέλου δημιουργείται για κάθε κατεργασία ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον γραφικής διεπαφής, μέσω του οποίου οι χρήστες μπορούν να εισάγουν δεδομένα, να εκτελέσουν και να αποθηκεύσουν προσομοιώσεις, αλλά και να εξάγουν όλες τις παραγόμενες πληροφορίες που προκύπτουν από την εκτέλεση αυτών.

Η επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου γίνεται σε τρία στάδια. Αρχικά, μέσω θεωρητικών σχέσεων επαληθεύεται η γεωμετρία του αυλακιού του κατεργαζόμενου τροχού, η οποία είναι τμήμα εξελιγμένης καμπύλης του βασικού κύκλου. Στη συνέχεια γίνεται επαλήθευση της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίντων με σύγκρισή τους με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Το τρίτο στάδιο αφορά την επαλήθευση των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής, η οποία πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισής τους με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία.

Τέλος, το μοντέλο που αναπτύσσεται χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μεγάλου πλήθους προσομοιώσεων των δύο κατεργασιών για εξωτερικές και εσωτερικές οδοντώσεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών αναλύονται για τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων κάθε κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής.

Abstract

Gears are one of the most crucial machine elements, widely used in the industry, due to their capability to provide accurate, flexible and reliable rotary motion. Billions of gears are produced every year, while the global gear demand is growing constantly. While automotive industry is the primary consumer of gears, other industries also require huge amounts of gears such as the aerospace industry, agricultural machinery or power stations. As such, the optimization of gear manufacturing processes is a subject of great importance for the construction industry.

Gear shaping and power skiving are some of the most characteristic gear cutting processes. Gear shaping is the primary process for manufacturing internal gears, while power skiving found application only recently with the development of five-axis CNC machines, greatly increasing productivity.

The purpose of the current thesis is the development of a complete and reliable simulation model, which is embedded in a commercial CAD software, and is able to simulate the gear manufacturing processes of gear shaping and power skiving. The simulation model includes the creation of the cutting tool profile, the generation of the 3D trajectory of the cutting tool and the simulation of the complex kinematics of each manufacturing process. For the generation of the tool profile and trajectory, optimal discretization is used, which along with the high accuracy of the CAD software ensure the maximum accuracy of the model. Simulation results include the geometry of the final machined gear and the undeformed 3D chips generated during each manufacturing process. The geometry of the undeformed chips is used for the calculation of the developed cutting forces, which are then transformed in four different coordinate systems. For each gear manufacturing process, a graphical user interface is developed, in which a user may input process data, execute or store a simulation, but also view and export the simulation results.

The verification of the simulation model is accomplished in three distinct stages. Initially the geometry of the gear gap flanks is validated through the comparison to the theoretical equations of the expected curves. The second stage involves the validation of the undeformed chip geometry. For the verification of the calculated cutting forces, the simulation results are compared to experimental results obtained from the literature.

Finally, in order to analyze the effect of the cutting parameters of each cutting process, a series of simulations is executed for external and internal gear manufacturing. The results are used to derive the optimal cutting conditions for each process, regarding the effect of the parameters on the developed cutting forces.

Λίστα μεταβλητών

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
α	Απόσταση κέντρων του κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου πριν την έναρξη της προσομοίωσης	mm
α_F	Πλάγια γωνία ελευθερίας	°
α_k	Γωνία ελευθερίας κεφαλής	°
α_n	Γωνία πίεσης	°
β_x	Σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ των αξόνων X διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων	°
β_y	Σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ των αξόνων Y διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων	°
β_z	Σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ των αξόνων Z διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων	°
β_1, β_2	Γωνία ελίκωσης	°
γ	Γωνία αποβλίπτου	°
δ_i	Γωνία μεταξύ του διανύσματος της στοιχειώδους δύναμης εκτροπής και του θετικού ημιάξονα X στο επίπεδο διατομής του αποβλίπτου	°
θ_1, θ_2	Βήμα περιστροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων κύλισης	°
φ_1, φ_2	Βήμα περιστροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής	°
ψ	Γωνία εξελιγμένης	°
Σ	Γωνία κλίσης κοπτικού εργαλείου	°
ω_1, ω_2	Γωνιακή ταχύτητα	rpm
b	Πλάτος οδοντωτού τροχού / Πλάτος αποβλίπτου	mm
b_i	Στοιχειώδεις πλάτος αποβλίπτου	mm
b_{ieq}	Ισοδύναμο στοιχειώδεις πλάτος αποβλίπτου	mm
AV	Πλάγια μετατόπιση	mm
EX	Εξωτερική οδόντωση	-
IN	Εσωτερική οδόντωση	-
HL	Πλάγια οδόντωση	-
SP	Ευθεία οδόντωση	-
d_0	Αρχική διάμετρος	mm
d_θ	Συντελεστής ελικοειδούς οδόντωσης	°
d_f	Διάμετρος ποδών	mm
d_{fa}	Αξονικό βήμα μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής	mm
d_k	Διάμετρος κεφαλής	mm
d_b	Βασική διάμετρος	mm
e	Εκκεντρότητα	mm
f_a	Αξονική πρόωση	mm/wrev
f_r	Ακτινική πρόωση	mm/DS
f_w	Πρόωση κύλισης	mm/DS
h	Ύψος δοντιού / Πάχος αποβλίπτου	mm
h_f	Ύψος ποδός	mm
h_i	Στοιχειώδεις πάχος αποβλίπτου	mm
h_{ieq}	Ισοδύναμο στοιχειώδεις πάχος αποβλίπτου	mm

VIII

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
h_{max}	Μέγιστο πάχος διατομής αποβλίπτου	mm
h_k	Ύψος κεφαλής	mm
l_0	Διάκενο δοντιού	mm
m_n	Μέτρο οδόντωσης	mm
n_t	Αριθμός επιπέδων τροχιάς	-
n_d	Διαφορά θέσεων κύλισης/περιστροφής μεταξύ δύο διαδοχικών δοντιών του κοπτικού εργαλείου	
r	Ακτίνα καμπυλότητας κεφαλής στην κοπτική ακμή	mm
s_0	Πάχος δοντιού	mm
s_i	Εμβαδόν στοιχειώδους τμήματος	mm
t_0	Βήμα οδόντωσης	mm
v_c	Ταχύτητα κοπής	m/min
z_1, z_2	Αριθμός δοντιών	-
z_v	Φανταστικός αριθμός δοντιών	-
x, y, z	Σταθερές κατεργαζόμενου υλικού	-
x_1, x_2	Μετατόπιση κατατομής	-
K_S, K_R, K_V	Ειδικές αντιστάσεις κοπής	N/mm ²
F_S	Κύρια δύναμη κοπής	N
F_V	Δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης	N
F_R	Δύναμη απώθησης	N
F_D	Δύναμη εκτροπής	N
T	Βάθος κοπής	mm
Δείκτης	Περιγραφή	
1	Κοπτικό εργαλείο	
2	Κατεργαζόμενο τεμάχιο / οδοντωτός τροχός	



1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης δύο κατεργασιών οδοντωτών τροχών, της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων και της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων. Οι κατεργασίες αυτές αποτελούν δύο από τις πιο σημαντικές κατεργασίες οδοντώσεων και τις κατεξοχήν κατεργασίες κατασκευής εσωτερικών οδοντωτών τροχών. Ιδιαίτερα για την κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων, το ερευνητικό ενδιαφέρον για τη μελέτη και τη βελτιστοποίησή της έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης των σύνθετων κέντρων κατεργασίας και της υψηλής ποιότητας και παραγωγικότητας που προσφέρει.

Οι υψηλές απαιτήσεις των δύο κατεργασιών σε συνδυασμό με την πολύπλοκη κινηματική και γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων τους, είναι μερικά από τα προβλήματα που καθιστούν απαραίτητη την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας και την πρόβλεψη των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Ένα μοντέλο προσομοίωσης υψηλής ακρίβειας είναι σε θέση να πετύχει αυτούς τους στόχους και κατά συνέπεια να συμβάλλει στην εξοικονόμηση χρόνου και κόστους της παραγωγικής διαδικασίας. Για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας της προσομοίωσης ο κώδικας του προσομοιωτικού μοντέλου ενσωματώνεται σε ένα εμπορικό πακέτο CAD. Το γεγονός ότι τα ακριβή και ολοκληρωμένα διαθέσιμα μοντέλα για τις συγκεκριμένες κατεργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία είναι περιορισμένα, σε συνδυασμό με την αυξημένη αξιοπιστία υπολογισμών του περιβάλλοντος CAD, συνθέτουν την ερευνητική καινοτομία της παρούσας διατριβής.

1.2 Στόχοι της διατριβής

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

- **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης για την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων.** Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στοχεύει στην προσομοίωση οποιασδήποτε περίπτωσης για την κατεργασία πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τροχού, του κοπτικού εργαλείου και τις συνθήκες κατεργασίας. Πρωταρχικός στόχος είναι η δημιουργία της γεωμετρίας της κατατομής του κοπτικού εργαλείου και στη συνέχεια ο υπολογισμός της τρισδιάστατης τροχιάς που αυτή διανύει. Ακολουθεί η τρισδιάστατη προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας και κατά συνέπεια ο ακριβής προσδιορισμός των απαραμόρφωτων αποβλίπτων και της τελικής γεωμετρίας του κατεργαζόμενου τροχού.
- **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης για την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων.** Το μοντέλο αυτό έχει την ίδια δομή με το μοντέλο της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Οι βασικές διαφορές αφορούν τις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας σχετικά με τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και την κινηματική της, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τον διαφορετικό τρόπο προσδιορισμού των απαραμόρφωτων αποβλίπτων.

- **Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής.** Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής βασίζεται στη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων κάθε κατεργασίας. Το μοντέλο υπολογισμού αποτελεί μία διαμόρφωση του μοντέλου λοξής κοπής, ώστε να προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες των κατεργασιών κατασκευής οδοντώσεων και η υλοποίησή του σε περιβάλλον CAD απαιτεί ένα πλήθος υπολογισμών και μετασχηματισμών, οι οποίοι υλοποιούνται από διαφορετικούς αλγορίθμους. Οι υπολογισμένες δυνάμεις επιβεβαιώνονται με αποτελέσματα πειραμάτων από τη βιβλιογραφία.
- **Ανάπτυξη ολοκληρωμένου περιβάλλοντος γραφικής διεπαφής χρήστη.** Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των επιμέρους κατεργασιών αλλά και τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, παρουσιάζονται μέσα από ένα πλήρως λειτουργικό και φιλικό περιβάλλον γραφικής διεπαφής χρήστη, μέσα από το οποίο γίνεται εισαγωγή δεδομένων, προβολή και εξαγωγή αποτελεσμάτων, δημιουργία αναφορών και αποθήκευση προσομοιώσεων.
- **Διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας.** Τελικός στόχος της εργασίας αποτελεί η εξέταση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων των κατεργασιών στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται, καθώς και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται ξεχωριστά για τις δύο κατεργασίες κοπής που εξετάζονται.

1.3 Δομή της διατριβής

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αρχικά μία σύντομη αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους καθώς και μία συνοπτική παρουσίαση των δύο κατεργασιών κοπής οδοντωτών τροχών που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την υπάρχουσα ερευνητική δραστηριότητα σχετική με τις κατεργασίες της πλάνισης και της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων. Η βιβλιογραφική έρευνα αφορά δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά, παρουσιάσεις σε συνέδρια ή ολοκληρωμένες διδακτορικές διατριβές. Συγκεκριμένα, οι διάφορες ερευνητικές προσεγγίσεις μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Μελέτη των κατεργασιών κοπής οδοντωτών τροχών μέσω μοντέλων προσομοίωσης:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλες οι μελέτες που αφορούν την προσομοίωση των κατεργασιών της πλάνισης και της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων με αριθμητικά μοντέλα, ή με τη χρήση εμπορικών λογισμικών. Τα μοντέλα αυτά στοχεύουν συνήθως στον προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίπτων της κατεργασίας, των δυνάμεων κοπής και της αναπτυσσόμενης φθοράς στα κοπτικά εργαλεία.
- **Μελέτη των κατεργασιών κοπής οδοντωτών τροχών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα μοντέλα τα οποία με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζουν την κατανομή των τάσεων και θερμοκρασιών στο κοπτικό εργαλείο. Επιπλέον εξετάζεται η επίδραση των φαινομένων που οφείλονται στα φαινόμενα παρεμπόδισης της ροής των αποβλίπτων και που συμβάλλουν στη φθορά των κοπτικών εργαλείων.
- **Μελέτη των κοπτικών εργαλείων και επίδραση των παραμέτρων κοπής:** Ένα σημαντικό πλήθος εργασιών αφορά τη μελέτη της γεωμετρίας των κοπτικών εργαλείων και τη βελτίωση αυτής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η φθορά σε αυτά, να αυξηθεί ο χρόνος ζωής τους και να εξαλειφθούν τα σφάλματα που μεταφέρονται στην τελική

γεωμετρία του οδοντωτού τροχού λόγω αστοχιών στη γεωμετρία τους. Επιπλέον, σημαντικό μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας έχει αφιερωθεί στην επίδραση των διαφόρων παραμέτρων των κατεργασιών στη γεωμετρική ακρίβεια των παρειών του τελικού οδοντωτού τροχού.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Το μοντέλο έχει ως στόχο την ακριβή προσομοίωση των δύο κατεργασιών που μελετώνται. Η δομή του κεφαλαίου συνοπτικά είναι η εξής:

- Περιγραφή του εμπορικού πακέτου CAD που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του μοντέλου, καθώς και των βοηθητικών εργαλείων για την ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.
- Παρουσίαση της δομής του μοντέλου, των απαραίτητων δεδομένων εισόδου από τον χρήστη, της διαδικασίας που ακολουθείται για την προσομοίωση καθώς και τα παραγόμενα αποτελέσματα.
- Περιγραφή της δημιουργίας του κοπτικού εργαλείου, της μοντελοποίησης της τρισδιάστατης τροχιάς του και του τρόπου προσομοίωσης της κινηματικής της κατεργασίας.
- Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού των τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλίπτων και της παραγόμενης τελικής γεωμετρίας του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού.
- Επιβεβαίωση τελικής γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού, όπως προκύπτει από την προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας. Η επιβεβαίωση επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των παρειών της γεωμετρίας του αυλακίου του τροχού με θεωρητικές σχέσεις που περιγράφουν την αναμενόμενη γεωμετρία τους.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής. Η διαδικασία υπολογισμού βασίζεται στο μοντέλο των Kienzle – Victor και για την ορθή υλοποίησή της σε περιβάλλον CAD χρησιμοποιείται μία σειρά από αλγορίθμους. Ο υπολογισμός δυνάμεων μελετάται για ένα δόντι αλλά και για τις συνολικές δυνάμεις που προκύπτουν από την ταυτόχρονη εμπλοκή των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το μοντέλο δυνάμεων εφαρμόζεται αποτελεσματικά και στις δύο κατεργασίες κοπής οδοντώσεων και επαληθεύεται με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το λογισμικό OPLITIS, που αναπτύχθηκε για την ομαλή εισαγωγή των δεδομένων, καθώς και την προβολή και εξαγωγή των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την προσομοίωση των δύο κατεργασιών. Το λογισμικό περιλαμβάνει μία ολοκληρωμένη και πλήρως λειτουργική γραφική διεπαφή χρήστη που ενσωματώνεται στο περιβάλλον CAD.

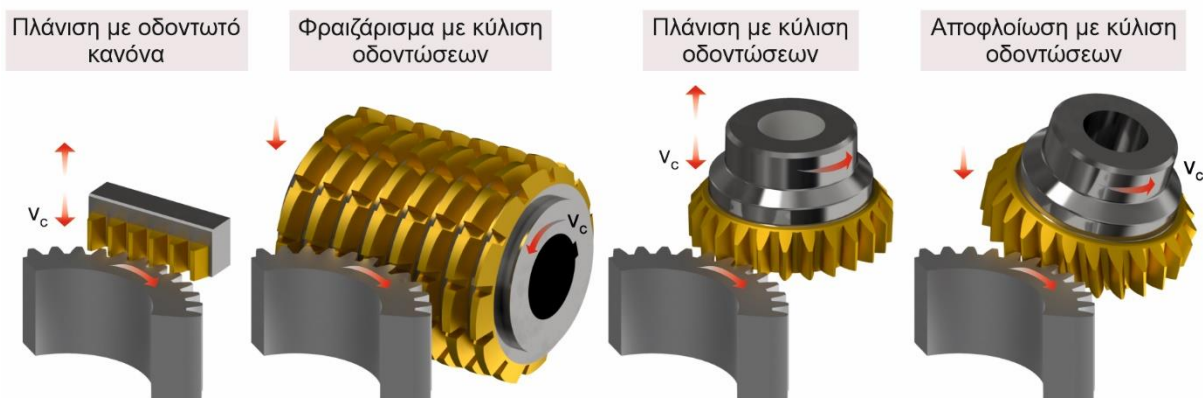
Στα **Κεφάλαια 6 και 7** γίνεται αναλυτική μελέτη για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών κοπής για κάθε κατεργασία. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του τροχού και του κοπτικού εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Για τον σκοπό αυτόν πραγματοποιήθηκε πλήθος προσομοιώσεων του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Στα **Κεφάλαια 8 και 9** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, οι ιδέες για βελτίωση και περαιτέρω μελλοντική έρευνα καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.



2.1 Οδοντωτοί τροχοί και κατεργασίες κοπής οδοντώσεων

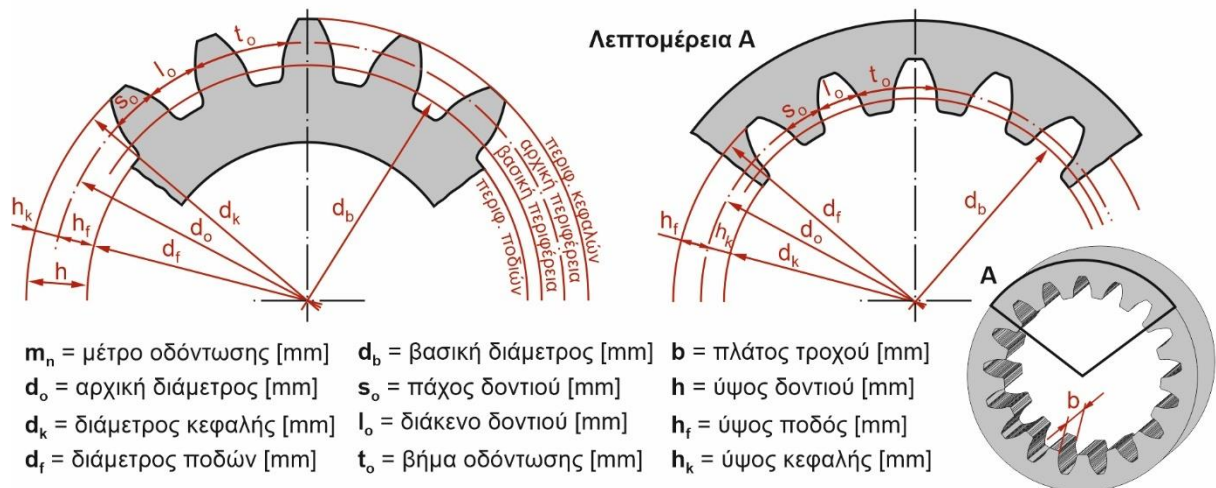
Η χρήση των οδοντωτών τροχών έχει ξεκινήσει εδώ και 3000 χρόνια, με πλήθος εφαρμογών σε στοιχεία μηχανών και συνεχίζει με διαρκώς αυξανόμενους ρυθμούς μέχρι και σήμερα. Οι οδοντωτοί τροχοί είναι αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας, με κυριότερες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική βιομηχανία και την αγροτική βιομηχανία. Βασική είναι η χρήση των οδοντωτών τροχών και στη σύγχρονη καθημερινότητα, με εφαρμογές σε ηλεκτρικές συσκευές, ρολόγια, ανελκυστήρες και μετρητικά εργαλεία. Η κατασκευή οδοντωτών τροχών βελτιώνεται συνεχώς, καθώς οι απαιτήσεις για παραγωγή μηχανών υψηλών προδιαγραφών, αθόρυβης λειτουργίας, λιγότερου βάρους και με μικρότερο κόστος αυξάνονται διαρκώς. Οι πολύπλοκες μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών ποικίλουν και η χρήση τους εξαρτάται από τις σχεδιαστικές απαιτήσεις, τα διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία, την ποσότητα οδοντωτών τροχών που θα παραχθεί καθώς και το κόστος παραγωγής [1]. Το υλικό, η διαστατική ακρίβεια και η ποιότητα των δοντιών των οδοντωτών τροχών έχουν καθοριστική σημασία για την αξιοπιστία τους, την αντοχή τους στον χρόνο και την αποδοτική λειτουργία τους. Ειδικά η ακρίβεια των χαρακτηριστικών των οδοντωτών τροχών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο κατασκευής τους. Οι πιο διαδεδομένες κατεργασίες με γένεση είναι η πλάνιση με οδοντωτό κανόνα, το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων και η αποφλοιώση με κύλιση οδοντώσεων, όπως αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κατεργασίες κοπής οδοντώσεων με γένεση

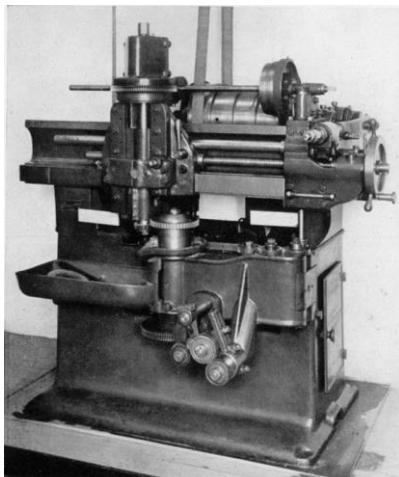
Η πλάνιση και η αποφλοιώση με κύλιση οδοντώσεων αποτελούν τις κύριες κατεργασίες κοπής εσωτερικών οδοντωτών τροχών, ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν και εξωτερικές οδοντώσεις. Ενώ η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων χρησιμοποιείται ευρέως εδώ και 100 χρόνια, η αποφλοιώση με κύλιση οδοντώσεων έχει βρει εφαρμογή μόλις στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, προσφέροντας σημαντική άνοδο στους ρυθμούς παραγωγής. Η πολύπλοκη κινηματική των εν λόγω κατεργασιών, η περίπλοκη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων, αλλά και τα φαινόμενα παρεμπόδισης ροής των αποβλίπτων που εμφανίζονται στις κατεργασίες αυτές, αποτελούν θεμελιώδη προβλήματα κατά την εφαρμογή τους. Έτσι, η βελτιστοποίηση των δύο αυτών κατεργασιών αποτελεί πεδίο με υψηλό οικονομικό και ερευνητικό ενδιαφέρον διεθνώς.

Όπως είναι γνωστό, οι οδοντωτοί τροχοί διακρίνονται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς, ευθείας ή ελικοειδούς οδόντωσης. Οι οδοντωτοί τροχοί με γεωμετρία οδόντωσης εξελιγμένης καμπύλης, είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία μηχανών των σύγχρονων και αποδοτικών μηχανισμών μετάδοσης κίνησης [2] και η παραγωγή τους μέσω των κατεργασιών της πλάνισης και της αποφλοίσωσης με κύλιση αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά για εξωτερικούς και εσωτερικούς οδοντωτούς τροχούς παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξωτερικών και εσωτερικών οδοντωτών τροχών

2.2 Κατεργασία οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση



Σχήμα 2.3: Μηχανή πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων κατά Fellows

Η κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων παρουσιάζεται για πρώτη φορά το 1896 από τον Αμερικανό εφευρέτη Edwin R. Fellows. Η μέχρι τότε κατασκευή οδοντωτών τροχών γινόταν με τη μέθοδο του φραιζαρίσματος με εργαλείο μορφής. Στη μέθοδο εκείνη, η μορφή του εργαλείου της κοπτικής φραιζας μεταφέρεται σε ένα αυλάκι, διατηρώντας ακίνητο τον κατεργαζόμενο τροχό. Για την κοπή ενός διπλανού αυλακιού απαιτείται κατάλληλη κίνηση διαίρεσης του εργαλείου, που πραγματοποιείται μέσω της κινηματικής της εργαλειομηχανής και στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία φραιζαρίσματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος είχε σημαντικά μειονεκτήματα σχετικά με την ποιότητα του τελικού τροχού αλλά και τον χρόνο ολοκλήρωσης της κατεργασίας. Τα προβλήματα αυτά επιλύθηκαν με την εφεύρεση της πρώτης μηχανής πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων το 1897 (σχήμα 2.3) [3]. Η νέα μέθοδος κατεργασίας βασίζεται στην αρχή της κύλισης μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού. Η κοπή επιτυγχάνεται με παλινδρομικές κινήσεις του εργαλείου στη διεύθυνση του άξονά του και με ταυτόχρονη περιστροφική κίνηση του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού. Σημαντικό πλεονέκτημα της κατεργασίας είναι ότι η επανατοποθέτηση του εργαλείου δεν είναι πλέον απαραίτητη. Έτσι, βελτιώνεται σημαντικά ο χρόνος κοπής και ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα στην τελική γεωμετρία του παραγόμενου αυλακιού, σφάλματα που οφείλονται σε επανατοποθετήσεις του κοπτικού εργαλείου ή του κατεργαζόμενου τροχού.

Το κοπτικό εργαλείο της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων έχει τη μορφή ενός εξωτερικού κυλινδρικού οδοντωτού τροχού με οδοντώσεις εξελιγμένης καμπύλης. Οι πλάγιες παρειές και η παρειά κεφαλής των δοντιών υπόκεινται σε διαδικασία λείανσης προκειμένου να δημιουργηθούν οι απαραίτητες γωνίες ελευθερίας. Απαραίτητη προϋπόθεση της κατεργασίας είναι το κοπτικό εργαλείο να έχει ίδιο μέτρο οδόντωσης (m_n) και γωνία πίεσης (α_n) με τον οδοντωτό τροχό προς κατεργασία. Το ύψος κεφαλής των δοντιών (h_k) είναι μεγαλύτερο από έναν κοινό οδοντωτό τροχό και συνήθως ίσο με $1.25m_n$, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί στη δημιουργία της απαραίτητης χάρης στην περιοχή των ποδιών του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού [4]. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων πλάνισης με κύλιση, καθώς και οι χαρακτηριστικές γωνίες τους στις κοπτικές ακμές.



Σχήμα 2.4: Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Κοπτικές γωνίες επί των παρειών του εργαλείου

Στο σχήμα 2.4 διακρίνονται η πλάγια γωνία ελευθερίας (α_F), η γωνία ελευθερίας κεφαλής (α_K), η γωνία αποβλίπτου (γ) καθώς και η γωνία ελίκωσης (β_1) στο κοπτικό εργαλείο πλάγιας οδόντωσης. Οι γωνίες ελευθερίας εξυπηρετούν στην αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ των παρειών του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού. Τυπικές τιμές για τις πλάγιες γωνίες ελευθερίας είναι $1.5^\circ - 2^\circ$, ενώ για τη γωνία ελευθερίας κεφαλής $2^\circ - 4^\circ$. Η γωνία αποβλίπτου διευκολύνει τον σχηματισμό και κυρίως τη ροή των αποβλίπτων με χαρακτηριστικές τιμές μεταξύ 0° και 10° , ενώ ενδέχεται να πάρει και αρνητικές τιμές σε κατεργασίες φινιρίσματος [5]. Η γωνία ελίκωσης (β_1) στα κοπτικά εργαλεία είναι απαραίτητη για την κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων και είναι πάντα ίση με την γωνία ελίκωσης του κατεργαζόμενου τροχού.

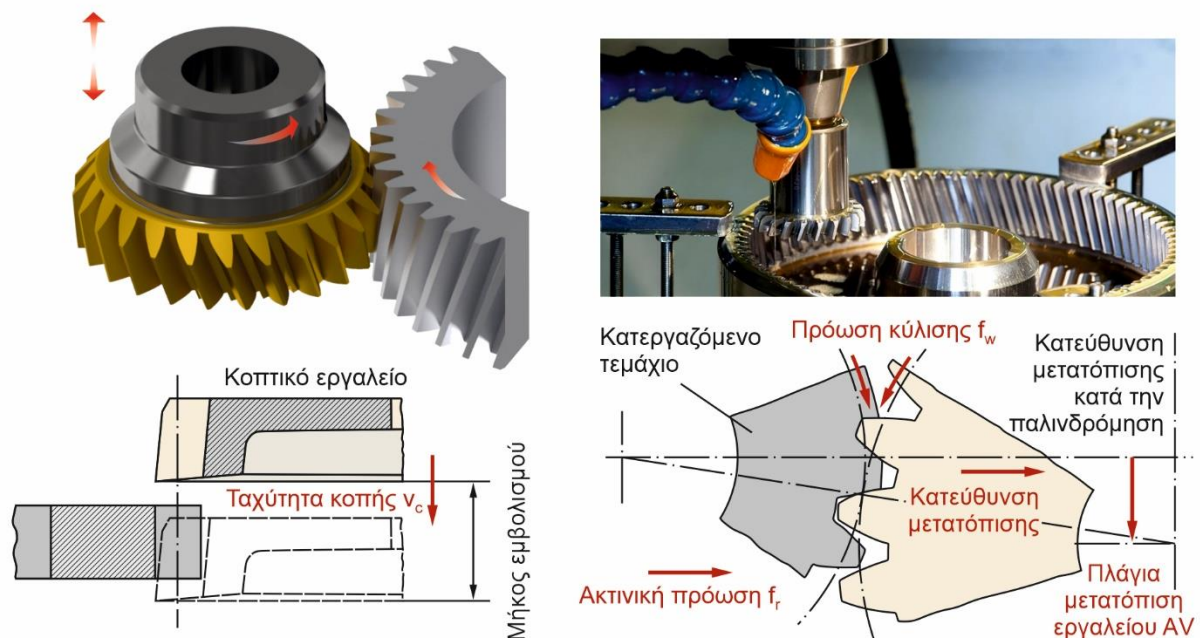
Η βασική κίνηση κοπής στην κατεργασία εκτελείται από μία κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση του κοπτικού εργαλείου, που ονομάζεται **εμβολισμός**, η οποία ισούται με την ταχύτητα κοπής v_c της κατεργασίας. Ένας εμβολισμός είναι υπεύθυνος για τον σχηματισμό και την αφαίρεση ενός αποβλίπτου από ένα κοπτικό δόντι, γεγονός το οποίο συμβαίνει κατά την κάθοδό του προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε όλο το πλάτος της οδόντωσης. Στη συνέχεια το κοπτικό δόντι επιστρέφει στην αρχική του θέση, αφού πρώτα πραγματοποιηθεί μία μικρή κίνηση εξόδου από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή σύγκρουση με το τελευταίο κατά την άνοδο. Η κατεύθυνση της μετατόπισης εξόδου ρυθμίζεται μέσω της πλάγιας μετατόπισης AV του κοπτικού εργαλείου [6]. Για την κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων απαιτείται μία επιπλέον περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, έτσι ώστε η διαδρομή των κοπτικών δοντιών κατά την παλινδρόμηση να ακολουθεί την ελίκωση του κατεργαζόμενου αυλακιού. Η διαδικασία σχηματισμού ενός αποβλίπτου ονομάζεται **θέση κύλισης**. Με μία σειρά από διαδοχικούς εμβολισμούς, κάθε κοπτικό δόντι του εργαλείου αφαιρεί τα απόβλιττα που αντιστοιχούν σε όλες τις θέσεις κύλισης που απαιτούνται για την κατεργασία ενός αυλακιού. Έτσι, ένα αυλάκι σχηματίζεται από ένα μόνο κοπτικό δόντι, σε αντίθεση με την κατεργασία του φραιζαρίσματος με κύλιση, όπου κάθε θέση κύλισης κατεργάζεται από διαφορετικό δόντι του κοπτικού εργαλείου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας το κοπτικό εργαλείο και ο κατεργαζόμενος τροχός περιστρέφονται συνεχώς γύρω από τους άξονές τους, σύμφωνα με τη σχέση μετάδοσης που προκύπτει από τον λόγο των δοντιών τους:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.1)$$

Η συχνότητα των παλινδρομικών κινήσεων εξαρτάται από την πρόωση κύλισης f_w και ορίζεται ως την περιστροφική μετατόπιση ενός τυχαίου σημείου της αρχικής περιφέρειας του τεμαχίου, ή του κοπτικού εργαλείου, ανά εμβολισμό του τελευταίου. Τέλος, η ακτινική πρόωση f_r είναι υπεύθυνη για την τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στο προβλεπόμενο βάθος κοπής εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι, η κινηματική της κατεργασίας περιγράφεται συνολικά από τέσσερις ανεξάρτητες κινήσεις, όπως παρουσιάζονται και στο σχήμα 2.5:

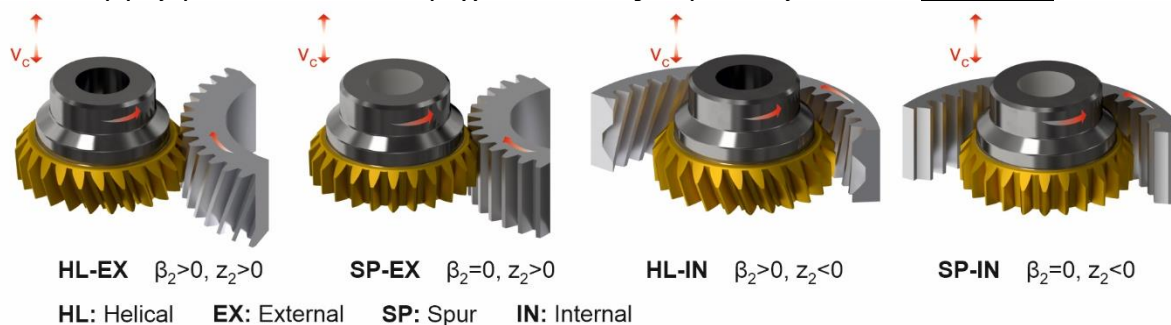
- Παλινδρομική κίνηση του κοπτικού εργαλείου στη διεύθυνση του άξονά του. Αντιστοιχεί στην κύρια κίνηση κοπής με ταχύτητα v_c . Η συχνότητα παλινδρόμησης εξαρτάται από την πρόωση κύλισης f_w .
- Κίνηση απομάκρυνσης του κοπτικού εργαλείου από το κατεργαζόμενο τεμάχιο στο τέλος ενός εμβολισμού, με σκοπό την αποφυγή της σύγκρουσης με το κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ως προς τον άξονά του με γωνιακή ταχύτητα ω_1 .
- Περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου ως προς τον άξονά του με γωνιακή ταχύτητα ω_2 .



Σχήμα 2.5: Κινηματική της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων

Λόγω της κίνησης εξόδου του κοπτικού εργαλείου κατά την παλινδρόμηση, δημιουργείται νεκρός χρόνος στην κατεργασία ο οποίος συμβάλλει στην αύξηση του κόστους της και θεωρείται το κύριο μειονέκτημά της. Η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων χρησιμοποιείται για την

κατεργασία εξωτερικών αλλά κυρίως εσωτερικών οδοντωτών τροχών, λόγω της αδυναμίας κατεργασίας των τελευταίων από την πλειονότητα των κατεργασιών κοπής οδοντώσεων. Έτσι, διακρίνονται τέσσερις παραλλαγές της κατεργασίας με βάση το είδος και τη γωνία ελίκωσης του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, οι οποίες παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.6](#).



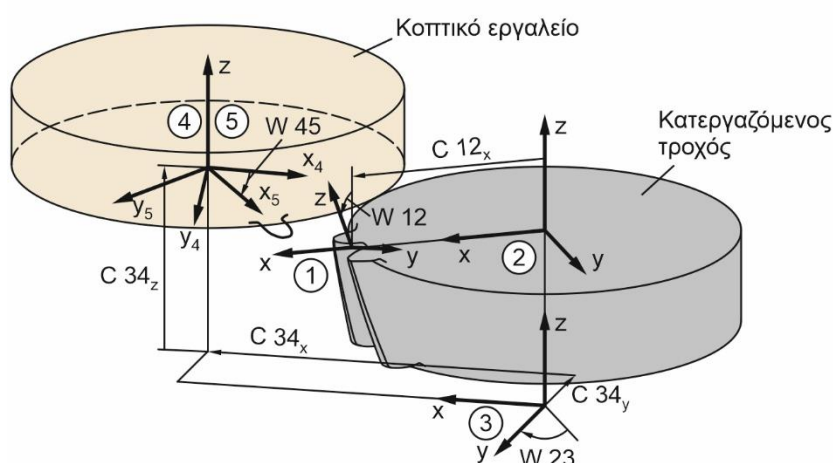
Σχήμα 2.6: Παραλλαγές κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων

2.3 Έρευνα στην κατεργασία πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων

Το ερευνητικό ενδιαφέρον για την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων εστιάζεται στην ανάλυση της κινηματικής της, τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των παραγόμενων αποβλίπτων, τη μείωση της φθοράς των εργαλείων και τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Η μελέτη των παραπάνω γίνεται συνήθως μέσω αριθμητικών υπολογισμών, μοντέλων που προσομοιώνουν την κατεργασία, μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και πειραματική διερεύνηση. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλες οι σχετικές ερευνητικές προσεγγίσεις με την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων.

2.3.1 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας

Η ανάπτυξη του πρώτου μοντέλου προσομοίωσης για την κατεργασία πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, πραγματοποιήθηκε από τον G. Sulzer στη διδακτορική του διατριβή [7]. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran και προσομοιώνει την

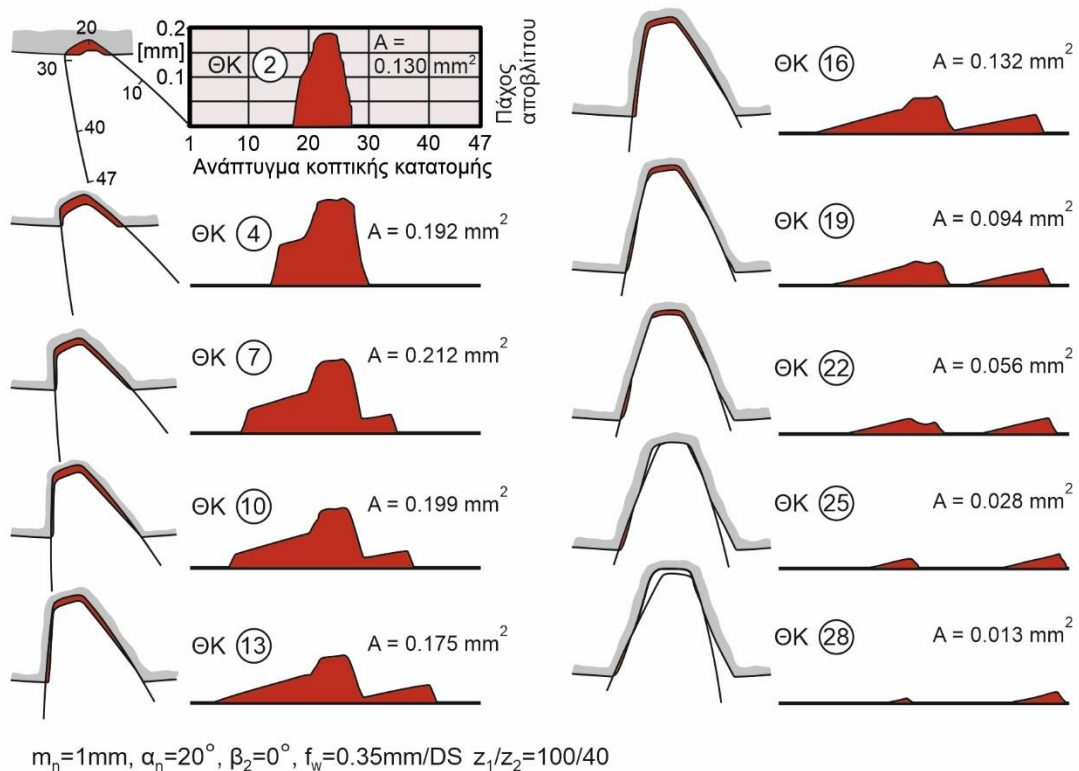


Σχήμα 2.7: Συστήματα συντεταγμένων στο μοντέλο του Sulzer

κινήσει του κοπτικού εργαλείου, έγινε μέσω πολυγωνικών γραμμών που τοποθετούνται σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους. Για τον προσδιορισμό των απαραίμφωτων αποβλίπτων της κατεργασίας, το ενεργό περίγραμμα της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου διεισδύει στις επιμέρους θέσεις κύλισης της κατεργασίας και όλες μαζί δημιουργούν την τελική γεωμετρία του

κινηματική της κατεργασίας με τη χρήση πέντε συστημάτων συντεταγμένων. Τα συστήματα αυτά, όπως παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.7](#), αφορούν τις κινήσεις του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού και μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών τους, μετατοπίσεων και περιστροφών, επιτυγχάνεται η προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας. Η αναπαράσταση της γεωμετρίας του κατεργαζόμενου τροχού αλλά και της τρο-

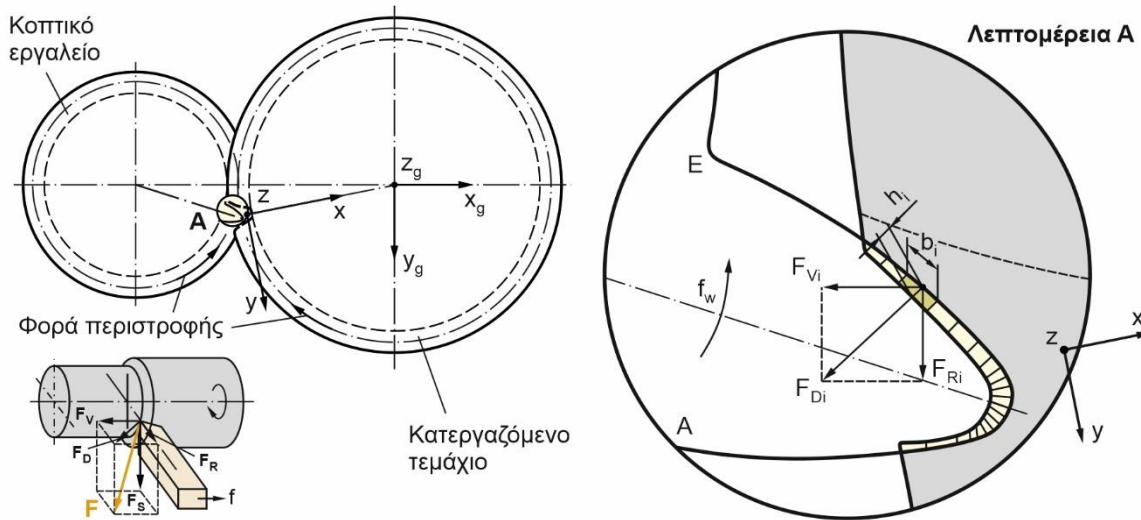
αυλακιού του κατεργαζόμενου τροχού. Μέσω της τομής των πολυγωνικών γραμμών του κατεργαζόμενου τροχού και της κατατομής του κοπτικού εργαλείου στην εκάστοτε θέση κύλισης, προκύπτουν, τόσο η διατομή του αποβλίπτου, όσο και η νέα γεωμετρία του τροχού που θα χρησιμοποιηθεί για την επόμενη θέση κύλισης. Στο σχήμα 2.8 απεικονίζονται μερικές θέσεις κύλισης για μία περίπτωση ευθείας εξωτερικής οδόντωσης και ο τρόπος συμβολής τους στη σταδιακή δημιουργία της τελικής γεωμετρίας του αυλακιού του οδοντωτού τροχού, σύμφωνα με το μοντέλο του Sulzer. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται για κάθε θέση κύλισης η επιφάνεια διατομής του αποβλίπτου που σχηματίζεται, καθώς και το πάχος αποβλίπτου κατά μήκος του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής.



Σχήμα 2.8: Θέσεις κύλισης και πάχος αποβλίπτων κατά Sulzer

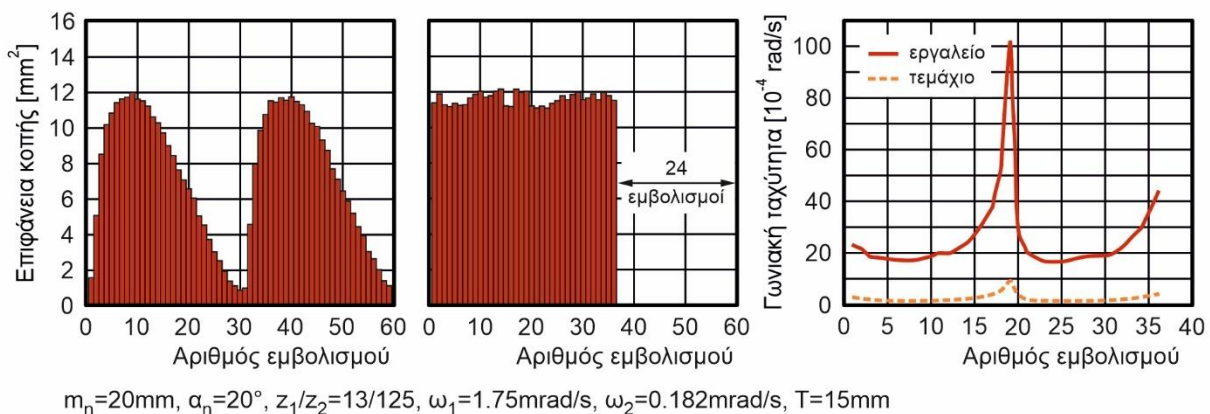
Το μοντέλο του Sulzer χρησιμοποιήθηκε από τον Καθηγητή Κ. Δ. Μπουζάκη [8,9] για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται στην κατεργασία. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίστηκε στην ανάλυση των διατομών των αποβλίπτων στις επιμέρους θέσεις κύλισης της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, κάθε διατομή του αποβλίπτου προσεγγίστηκε μέσω στοιχειωδών τετραπλεύρων, καθένα από τα οποία αντιστοιχούσε σε μία διακριτή θέση της κοπτικής κατατομής. Σε κάθε στοιχειώδη περιοχή εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις των Kienzle και Victor υπολογισμού δυνάμεων κοπής κατά την τόννευση [10], οι οποίες βασίζονται στο πάχος και το πλάτος κάθε στοιχειώδους τμήματος. Οι υπολογισμένες στοιχειώδεις συνιστώσες δυνάμεις αθροίστηκαν διανυσματικά σε ένα σταθερό σύστημα αναφοράς της κοπτικής κατατομής και στη συνέχεια μετασχηματίστηκαν στα υπόλοιπα συστήματα αναφοράς του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε ο υπολογισμός των συνολικών δυνάμεων κοπής ανά θέση κύλισης σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς. Η διαδικασία παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 2.9. Σε οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης, η γεωμετρία κάθε απαραμόρφωτου αποβλίπτου παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του. Για τον λόγο αυτόν, η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόστηκε σε μία μόνο διατομή του αποβλίπτου, καθώς οι δυνάμεις παραμένουν πρακτικά σταθερές κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού. Αυτό δεν ισχύει κατά την πλάνιση με κύλιση

οδοντωτών τροχών πλάγιας οδόντωσης, όπου η γεωμετρία ενός αποβλήτου διαφέρει σε κάθε θέση κατά μήκος της τροχιάς της κοπτικής ακμής. Έτσι, σε περιπτώσεις πλάγιων οδοντώσεων η διαδικασία εφαρμόζεται σε διαφορετικές διατομές κατά μήκος του αποβλήτου, για τον προσδιορισμό της μεταβολής των δυνάμεων κοπής. Στο μοντέλο του Κ. Δ. Μπουζάκη εφαρμόστηκαν τρεις τομές, στην αρχή, στο μέσο και στο τέλος του μήκους του αποβλήτου. Η μεθοδολογία υπολογισμού επιβεβαιώθηκε πειραματικά, τόσο για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε ένα μόνο δόντι, όσο και για τις συνολικές δυνάμεις που προκύπτουν από ταυτόχρονη εμπλοκή των δοντιών, στο σύστημα που βρίσκεται στο κέντρο του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 2.9: Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής κατά Κ. Δ. Μπουζάκη

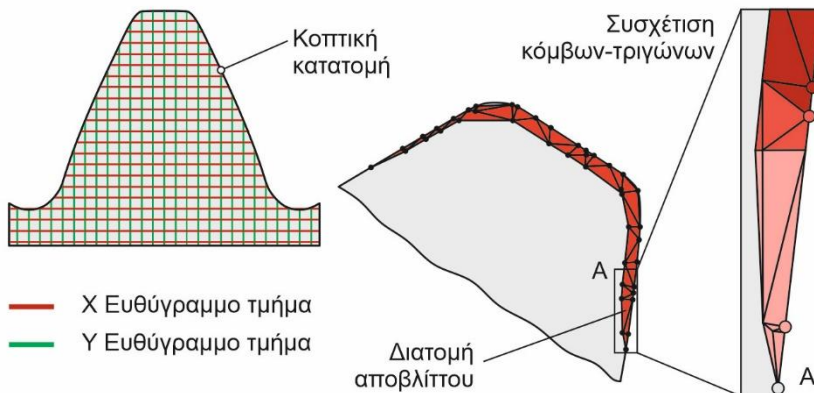
Ο Li και άλλοι [11] ανέπτυξαν ένα μοντέλο πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας της συμβατικής κατεργασίας. Στη μέθοδο που προτείνεται, διατηρείται σταθερή η επιφάνεια της διατομής του αποβλήτου που αφαιρείται σε κάθε εμβολισμό του κοπτικού εργαλείου, έτσι ώστε να μειωθεί ο αριθμός των εμβολισμών που απαιτούνται για να γίνει κατεργασία ενός αυλακιού σε ορισμένο βάθος κοπής. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια κοπής ορίζεται ως η μέγιστη επιφάνεια που αφαιρείται με τον συμβατικό τρόπο κοπής, γεγονός που εξασφαλίζει τη μέγιστη αποδοτικότητα της κατεργασίας. Η αφαίρεση σταθερής ποσότητας υλικού απαιτεί τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου σε κάθε εμβολισμό. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μία εφαρμογή της μεθόδου σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο κοπής, σχετικά με τις επιφάνειες κοπής και τις γωνιακές ταχύτητες σε κάθε εμβολισμό.



Σχήμα 2.10: Αποτελέσματα μοντέλου κοπής κατά Li et al.

Στο μοντέλο αυτό παρατηρείται ότι η διατήρηση σταθερής επιφάνειας κοπής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των εμβολισμών κατά 24. Η μείωση αυτή ισοδυναμεί με αύξηση της αποδοτικότητας κατά 40%, ποσοστό αξιόλογο ιδιαίτερα για κατεργασίες με κοπτικά εργαλεία μεγάλης διαμέτρου, όπου δεν εφαρμόζονται υψηλές γωνιακές ταχύτητες λόγω της μεγάλης τους αδράνειας. Ως μειονέκτημα της μεθόδου αναφέρονται οι απότομες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις γωνιακές ταχύτητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου, όπως παρουσιάζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα του σχήματος 2.10. Οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε ταλαντώσεις που μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στην εργαλειομηχανή. Η ορθή λειτουργία της μεθόδου επαληθεύτηκε μέσω προσομοίωσης με το λογισμικό VERICUT.

Ο Katz και άλλοι [12–14] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, χρησιμοποιώντας μία μέθοδο διακριτής μοντελοποίησης μέσω του λογισμικού Module Works, η οποία βασίζεται στη μέθοδο αναπαράστασης μέσω ευθύγραμμων τμημάτων (dixel). Πρόκειται για μέθοδο αναπαράστασης επιφανειών και όγκων, η οποία χρησιμοποιεί παράλληλα ευθύγραμμα τμήματα για να προσδιορίσει την αρχή και το τέλος της γεωμετρίας που περιγράφεται. Η χρήση ευθύγραμμων τμημάτων σε τρεις κατευθύνσεις x , y και z επιτρέπουν την αναπαράσταση τρισδιάστατων στερεών, και συμβάλλουν στην υψηλή γεωμετρική ακρίβεια (Multi-dixel). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε χρονικά βήματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θέσεις και κατευθύνσεις του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίστηκε, με βάση τη λειτουργία της λογικής αφαίρεσης, το υλικό που αφαιρείται από την τροχιά που διαγράφει το κοπτικό εργαλείο στον χώρο, το οποίο αντιστοιχεί στη γεωμετρία του απαράμορφωτου αποβλήτου στην εκάστοτε θέση. Για τον προσδιορισμό της διατομής του αποβλήτου πραγματοποιήθηκε τομή στο



Σχήμα 2.11: Αναπαράσταση κοπτικού εργαλείου και διακριτοποίηση αποβλήτου κατά Erkorkmaz et al.

μέσο του και για την αναπαράστασή της χρησιμοποιήθηκαν ευθύγραμμα τμήματα σε δύο μόνο κατευθύνσεις x και y , των οποίων τα άκρα ορίζουν κόμβους στο περίγραμμα της κοπτικής ακμής. Ο υπολογισμός της επιφάνειας του αποβλήτου, έγινε με τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay και ακολούθησε απαλοιφή των περιττών τριγώνων μέσω της μεθόδου alpha-shape. Κάθε κόμβος συ-

σχετίστηκε με ένα ή περισσότερα τρίγωνα, των οποίων οι επιφάνειες συναθροίστηκαν στον υπολογισμό του συνολικού εμβαδού της διατομής. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η αναπαράσταση του κοπτικού εργαλείου με τη μέθοδο multi-dixel, η διατομή ενός αποβλήτου έπειτα από τριγωνοποίηση, καθώς και η συσχέτιση κόμβων-τριγώνων στην εν λόγω γεωμετρία.

Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής βασίστηκε στο μοντέλο λοξής κοπής, όπου για κάθε κόμβο στην επιφάνεια του αποβλήτου υπολογιστήκαν τρεις συνιστώσες δυνάμεις, σύμφωνα με τις σχέσεις (2.2) - (2.4). Οι συνιστώσες δυνάμεις μετασχηματίστηκαν και αθροίστηκαν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

$$F_t = K_{tc} \cdot \alpha + K_{te} \cdot b \quad (2.2)$$

$$F_f = K_{fc} \cdot \alpha + K_{fe} \cdot b \quad (2.3)$$

$$F_r = K_{rc} \cdot \alpha + K_{re} \cdot b \quad (2.4)$$

Όπου:

F_t : κύρια δύναμη κοπής [N]

F_f : δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης [N]

F_r : δύναμη απώθησης [N]

α : η επιφάνεια που σχετίζεται με τον κόμβο υπολογισμού [mm²]

b : το μήκος της κοπτικής ακμής που σχετίζεται με τον κόμβο υπολογισμού [mm]

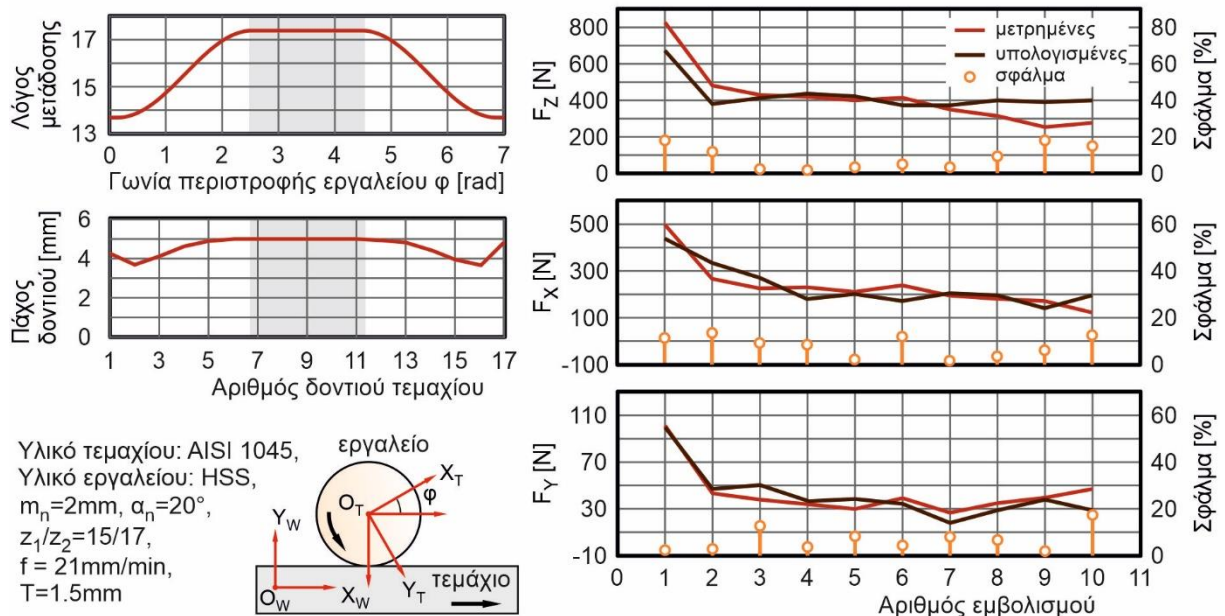
K_c, K_e : ειδικές αντιστάσεις κοπής [N/mm²], [N/mm]

Για την επαλήθευση της κατατομής της γεωμετρίας του τεμαχίου σε κάθε χρονικό βήμα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Verzahlanalyse της Liebherr, ενώ για την επαλήθευση των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με την εργαλειομηχανή Liebherr LSE500. Για τη μέτρηση των δυνάμεων που αναπτύχθηκαν, χρησιμοποιήθηκε το δυναμόμετρο Kistler 9255A. Οι προβλέψεις του μοντέλου ήταν ικανοποιητικές με το μέσο σφάλμα να κυμαίνεται μεταξύ 5% και 11%.

Ο Zheng και άλλοι [15] ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την κατεργασία πλάνισης με κύλιση μη κυλινδρικών οδοντώσεων. Η μέχρι τότε έρευνα στην κατεργασία μη κυλινδρικών οδοντώσεων εστιάζονταν στη μέθοδο του φραιζαρίσματος με κύλιση, η οποία όμως έχει περιορισμούς ως προς την εφαρμογή της σε εσωτερικές οδοντώσεις, καθώς και εξωτερικές μη κυλινδρικές οδοντώσεις με κοίλες αρχικές καμπύλες. Στο μοντέλο τους περιγράφονται δύο διαφορετικές μέθοδοι για την κατεργασία μη κυλινδρικών οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση. Στην πρώτη μέθοδο διατηρήθηκε σταθερή η γωνία περιστροφής του τεμαχίου, γεγονός το οποίο είχε ως συνέπεια μεταβαλλόμενες περιοχές κοπής σε κάθε βήμα, οι οποίες οδηγούσαν σε διαφορετικούς βαθμούς τραχύτητας στις επιφάνειες των δοντιών του τεμαχίου και ήταν σε θέση να προκαλέσουν σημαντικές φθορές στο κοπτικό εργαλείο και στην περιστρεφόμενη άτρακτο. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων προτάθηκε μία δεύτερη μέθοδος κοπής, όπου διατηρείται σε κάθε βήμα σταθερό το μήκος τόξου στην αρχική καμπύλη του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το οποίο επιτυγχάνεται με σταθερή γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου.

Ο Xu και άλλοι [16] ανέπτυξαν ένα προσομοιωτικό μοντέλο πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων για την κατασκευή ενός οδοντωτού κανόνα μεταβλητού λόγου μετάδοσης με τη χρήση του λογισμικού Matlab. Στο μοντέλο τους αρχικά γίνεται διακριτοποίηση των θέσεων που τοποθετείται το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε διαδοχικά βήματα κοπής και στη συνέχεια υπολογίζονται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κοπής. Ο κανόνας που κατασκευάστηκε ακολούθησε το διάγραμμα διαφορετικών λόγων μετάδοσης, όπως απεικονίζεται αριστερά του [σχήματος 2.12](#), οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Επομένως, απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή κατασκευή του ήταν η διαφοροποίηση της κοπτικής κατατομής του εργαλείου, ανάλογα με τη θέση περιστροφής που αυτό βρισκόταν. Συγκεκριμένα, το πάχος του δοντιού της κοπτικής κατατομής μειωνόταν όσο το κοπτικό εργαλείο πλησίαζε τα άκρα του οδοντωτού κανόνα, ενώ αντίθετα παρέμενε σταθερό όσο το κοπτικό εργαλείο βρισκόταν στο κέντρο του. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής βασίστηκε στο μοντέλο λοξής κοπής. Έτσι, για κάθε θέση κύλισης, με βάση

το εμβαδόν και το μήκος της εξωτερικής περιφέρειας της γεωμετρίας του αποβλίπτου, υπολογίστηκαν τρεις συνιστώσες δυνάμεις σύμφωνα με τις σχέσεις (2.1) – (2.3), οι οποίες μετασχηματίστηκαν στο σταθερό σύστημα του τεμαχίου. Το μοντέλο επαληθεύτηκε μέσω πειραμάτων με τη χρήση της εργαλειομηχανής YHZ5132 και του δυναμόμετρου Kistler 9257B. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται δεξιά στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Αποτελέσματα μοντέλου κοπής κατά Xu et al. Διάγραμμα σχέσης μετάδοσης οδοντωτού κανόνα συναρτήσει της γωνίας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου (αριστερά). Αποτελέσματα υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων κοπής (δεξιά)

Ο Κύην και άλλοι [17] εξέτασαν την επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων στη φθορά του κοπτικού εργαλείου και στις δυνάμεις που αναπτύσσονται, για κατεργαζόμενα τεμάχια ωστενιτοποιημένου χυτοσιδήρου σφαιροειδούς γραφίτη (Austempered Ductile Iron). Στόχος τους ήταν η εύρεση των παραμέτρων κατεργασίας που οδηγούν σε αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου. Για τον σκοπό αυτόν, αρχικά ερευνήθηκε η επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής μέσω δοκιμαστικών πειραμάτων ανάλογων με την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων. Χρησιμοποιήθηκε κοπτικό εργαλείο πλάνισης με κύλιση μεγάλης διαμέτρου, από ταχυχάλυβα ASP 900 με επικάλυψη AlCrN, το οποίο είχε μόνο έξι δόντια. Αυτό εξασφάλιζε τη μεγάλη απόσταση μεταξύ διαδοχικών δοντιών, και κατά συνέπεια το γεγονός ότι μόνο ένα δόντι συμμετέχει κάθε φορά στην κατεργασία. Αντί για κυλινδρικό τεμάχιο χρησιμοποιήθηκε περιστρεφόμενη μπάρα δοκιμών από ADI 900. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται αριστερά του [σχήματος 2.13](#). Τα σετ πειραμάτων έγιναν για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών της πρόωσης (0.10mm, 0.15mm, 0.20mm) και της ταχύτητας κοπής (10m/min, 20 m/min, 30m/min, 40m/min), ενώ το βάθος κοπής παρέμεινε σταθερό και ίσο με 6mm. Η πρόωση ισοδυναμούσε με το μέγιστο πάχος του αποβλίπτου. Ως όριο του πλάτους ζώνης φθοράς στην περιοχή κεφαλής και στις παρειές του κοπτικού εργαλείου ορίστηκαν τα 150mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, τόσο η αύξηση της πρόωσης αλλά και της ταχύτητας κοπής, οδηγούσε σε μεγαλύτερη φθορά του κοπτικού εργαλείου και ταχύτερη μείωση του χρόνου ζωής του, όπως παρουσιάζεται στα δεξιά του σχήματος 2.13. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχαν και οι μετρημένες δυνάμεις κοπής, οι οποίες έδειξαν ανοδική συμπεριφορά με την αύξηση της πρόωσης, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητα υλικού που αφαιρείται.

Αντιθέτως, οι δυνάμεις παρουσίασαν μειωμένες τιμές για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας κοπής, γεγονός που οφείλεται στις αυξημένες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, οι οποίες επιτρέπουν την ομαλότερη και ταχύτερη διέλευσή του μέσα από το υλικό.



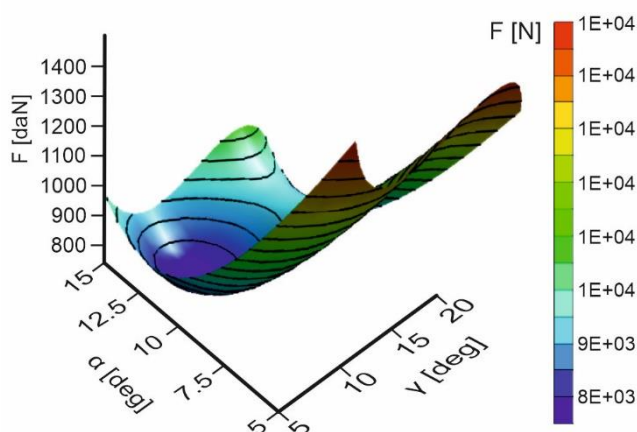
Σχήμα 2.13: Πειραματική διάταξη κατά Kühn et al. Κατανομή φθοράς του κοπτικού εργαλείου για διαφορετικές τιμές πρόωσης και ταχύτητας κοπής

Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο βέλτιστος συνδυασμός πρόωσης και ταχύτητας κοπής ήταν 0.10mm και 20m/min αντίστοιχα. Με βάση τις τιμές αυτές, πραγματοποιήθηκε πείραμα πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων με την εργαλειομηχανή Liebherr LS500E και με τη χρήση του ίδιου κοπτικού εργαλείου. Συνολικά κατασκευάστηκαν 25 οδοντωτοί τροχοί, οι οποίοι αντιστοιχούσαν σε χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου 1.38m/δόντι, χρόνο σημαντικά μικρότερο από τον αναμενόμενο με βάση τα πειράματα στη μπάρα δοκιμών. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στο μεγαλύτερο μήκος των αποβλήτων σε σχέση με τα απόβλητα του δοκιμαστικού πειράματος, το οποίο οδηγούσε σε υψηλότερες θερμικές καταπονήσεις του κοπτικού εργαλείου.

2.3.2 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Ο Datta και άλλοι [18] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων στο κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού. Για τη μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν μόνο τρία κοπτικά δόντια, όσα δηλαδή μπορούν να βρίσκονται σε ταυτόχρονη εμπλοκή με το τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Για την πλεγματοποίηση του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία 10 κόμβων και η προσομοίωση έγινε για κοπτικό εργαλείο μέτρου οδόντωσης 4mm και θετική γωνία αποβλήτου. Λόγω έλλειψης υπολογιστικών πόρων η προσομοίωση έγινε σε τέσσερις διακριτές θέσεις κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην κεφαλή των κοπτικών δοντιών, η οποία και εισέρχεται πρώτη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο λόγω της θετικής γωνίας αποβλήτου.

Ο Rui-Li και άλλοι [19] ανέπτυξαν ένα μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού σε εσωτερικούς οδοντωτούς τροχούς. Συγκεκριμένα, ερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας αποβλήτου και της γωνίας ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις που αναπτύσσονται. Για τη μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκε ένας κυκλικός τομέας του, αποτελούμενος από 5 δόντια και για την πλεγματοποίηση του εργαλείου και του



Σχήμα 2.14: Μοντέλο πρόβλεψης συνισταμένης δύναμης κατά Rui-Li et al.

των γωνιών ελευθερίας και αποβλίπτου, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της συνισταμένης δύναμης. Με τη χρήση της μεθοδολογίας επιφανειακής απόκρισης (Response Surface Methodology) αναπτύχθηκε πολυώνυμο το οποίο συσχετίζει τη συνισταμένη δύναμη με τη γωνία αποβλίπτου και τη γωνία ελευθερίας σύμφωνα με τη σχέση (2.5). Διαγραμματικά η σχέση αυτή παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.14](#).

$$F = 35739.35 - 2871.95 \cdot \gamma - 38.73 \cdot \alpha + 7.52 \cdot \gamma \cdot \alpha + 242.27 \cdot \gamma^2 + 117.688 \cdot \alpha^2 - 6.309 \cdot \gamma^3 + 0.408 \cdot \alpha^3 \quad (2.5)$$

Τέλος, με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών νησίδων (Multi-island Genetic Algorithm), έγινε ελαχιστοποίηση του πολυωνύμου της συνισταμένης δύναμης, προσφέροντας τις βέλτιστες τιμές για τις γωνίες ελευθερίας και αποβλίπτου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου μείωσε τη συνισταμένη δύναμη κατά 34.87%.

Οι Zhao και άλλοι [20] διερεύνησαν τις συνθήκες που επηρεάζουν την παραμόρφωση οδοντωτών τροχών εσωτερικής οδόντωσης με λεπτά τοιχώματα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τέτοιοι οδοντωτοί τροχοί βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα μετάδοσης κίνησης (high power transmission systems), αλλά λόγω των λεπτών τοιχωμάτων τους είναι επιρρεπείς σε παραμορφώσεις κατά την κατεργασία τους. Αρχικά έγινε πλήθος προσομοιώσεων με τη χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, για την εξέταση της επίδρασης των συνθηκών κοπής στη μέση κύρια δύναμη κοπής και στη μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο. Ως υλικό του τεμαχίου ορίστηκε ανοξείδωτος χάλυβας 42CrMo, ενώ για το κοπτικό εργαλείο ταχυχάλυβας S390 με επικάλυψη κράματος τιτανίου TiAlN. Κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για ένα μόνο αυλάκι με τη χρήση εργαλείου ενός κοπτικού δοντιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πρόωση κύλισης είχε τη μεγαλύτερη επιρροή στην κύρια δύναμη κοπής, η οποία αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές της πρόωσης. Παρόμοια συμπεριφορά είχε και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο με τη μεγαλύτερη επίδραση σε αυτή να έχουν η πρόωση κύλισης και η ταχύτητα κοπής.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πλήθος πειραμάτων με σκοπό την εξέταση της επίδρασης των συνθηκών κοπής στην παραμόρφωση του τεμαχίου μετά την κατεργασία του. Ως παραμόρφωση ορίστηκε η διαφορά της κυκλικότητας της εξωτερικής περιφέρειας του τεμαχίου, πριν

και μετά την κατεργασία του. Για τη μέτρηση της κυκλικότητας χρησιμοποιήθηκε η μετρητική μηχανή CMM COORD3. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

Πείραμα	v_c [DS/min]	f_c [mm/DS]	T [mm]	f_r [mm/DS]	Διαφορά Κυκλικότητας [μ m]
1	140	0.8	3	0.0015	15.9
2	140	1.4	4	0.002	-5.1
3	140	2	5	0.0025	-20
4	170	2	3	0.002	-22.3
5	170	0.8	4	0.0025	-6.2
6	170	1.4	5	0.0015	-6.8
7	200	1.4	3	0.0025	-35.4
8	200	2	4	0.0015	-1.6
9	200	0.8	5	0.002	-6.1

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα μοντέλου κοπής κατά Xu et al.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων η ακτινική πρόωση είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στην παραμόρφωση του τεμαχίου, με αύξηση της τιμής της να οδηγεί σε καλύτερες τιμές παραμόρφωσης του τεμαχίου. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσίασε η ταχύτητα κοπής, ενώ η αύξηση της πρόωσης κύλισης και του βάθους κοπής οδηγούσε σε διαφορετική μεταβολή της παραμόρφωσης του τεμαχίου. Τέλος, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και με τη χρήση της μεθόδου της βηματικής παλινδρόμησης (stepwise regression analysis), αναπτύχθηκε σχέση της παραμόρφωσης του τεμαχίου συναρτήσει της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και της ακτινικής πρόωσης. Η σχέση επαληθεύτηκε μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, με τα προβλεπόμενα αποτελέσματα να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

2.3.3 Βελτιστοποίηση κοπτικών εργαλείων

Έκτος από τις μελέτες που προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την κατεργασία με διάφορες μεθόδους και να εξάγουν συμπεράσματα με βάση τα παραγόμενα αποτελέσματα, ένα τμήμα της ερευνητικής δραστηριότητας εστιάζεται στη μελέτη της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιες μελέτες έχουν στόχο να μειώσουν τα γεωμετρικά σφάλματα στην τελική γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου, προτείνοντας τροποποιήσεις στη γεωμετρία της κοπτικής ακμής.

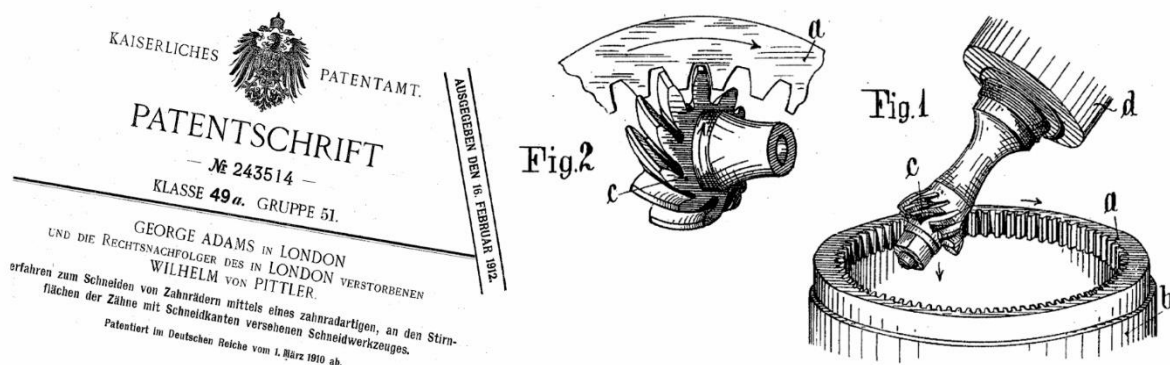
Χαρακτηριστική τέτοια μελέτη αποτελεί η εργασία από τον Huang και τους συνεργάτες του [21], οι οποίοι προσπάθησαν να εξαλείψουν τα γεωμετρικά σφάλματα που προκαλούνται από κοπτικά εργαλεία ελικοειδούς οδόντωσης, τα οποία κατασκευάζονται με συμβατικές μεθόδους [22]. Για τον σκοπό αυτόν προτάθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο διόρθωσης των σφαλμάτων, το οποίο βασίστηκε στην υψηλή ακρίβεια της μεθόδου Isoform για κατασκευή εργαλείων από τη Gleason [23]. Οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν αποσκοπούσαν στη μείωση των σφαλμάτων που μεταφέρονται στη γωνία πίεσης και στις παρειές των τελικών κατεργαζόμενων τεμαχίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αποκλίσεις της δεξιάς και αριστερής παρειάς του τελικού αυλακίου από τις θεωρητικές καμπύλες, μειώθηκαν από περίπου 10 μ m και 15 μ m, στα 0.075 μ m.

Οι Μάτε και Hollanda [24] πρότειναν ένα νέο μοντέλο κοπτικού εργαλείου πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, το οποίο αποτελεί σημαντική βελτίωση των συμβατικών εργαλείων κοπής. Με σκοπό τη διατήρηση των αστοχιών της γεωμετρίας στα συμβατικά εργαλεία κοπής σε αποδεκτά επίπεδα, συχνά επιλέγονται μικρές τιμές στις κατασκευαστικές γωνίες αποβλίττου και στις

πλάγιες γωνίες ελευθερίας [25]. Στο προτεινόμενο μοντέλο έγινε χρήση κυλινδρικών εργαλείων κοπής σε αντίθεση με τα συχνά χρησιμοποιούμενα κωνικά εργαλεία, γεγονός το οποίο προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή της γωνίας αποβλίπτου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αστοχίες της νέας κοπτικής κατατομής ήταν μηδενικές στην περιοχή της κεφαλής, ενώ στις παρειές της κατατομής παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση του σφάλματος για μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου κεφαλής.

2.4 Κατεργασία οδοντώσεων με αποφλοίωση με κύλιση

Η κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων παρουσιάζεται για πρώτη φορά το 1910 από τον Γερμανό εφευρέτη Wilhelm von Pittler [26]. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που υποβλήθηκε (σχήμα 2.15) είχε σκοπό να αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα της κατασκευής εσωτερικών οδοντωτών τροχών και έμοιαζε αρχικά με την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων που ήταν ήδη γνωστή εκείνη την εποχή [25]. Η έρευνα στην προτεινόμενη κατεργασία εντάθηκε ιδιαίτερα μεταξύ των δεκαετιών του 1950 και 1980, όμως οι προσπάθειες πρακτικής εφαρμογής της αποδείχθηκαν ανεπιτυχείς για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας και αποδοτικότητας, με τις εργαλειομηχανές και μεθόδους που ήταν τότε διαθέσιμες. Οι υψηλές γωνιακές ταχύτητες που απαιτούνται στην κατεργασία ήταν η αιτία για την πρόκληση ταλαντώσεων στις μηχανές, ταλαντώσεις που ήταν αδύνατο να ελαχιστοποιηθούν με τα διαθέσιμα μέσα της εποχής. Για τον λόγο αυτόν, σε συνδυασμό με την ανάγκη για υλικά υψηλής αντοχής στα κοπτικά εργαλεία [27], η επιτυχής εφαρμογή της κατεργασίας καθυστέρησε περίπου 100 χρόνια από την εφεύρεσή της, με το πρώτο ολοκληρωμένο κέντρο κατεργασίας για αποφλοίωση με κύλιση να παρουσιάζεται το 2007 από την Profilator GmbH & Co. [28].



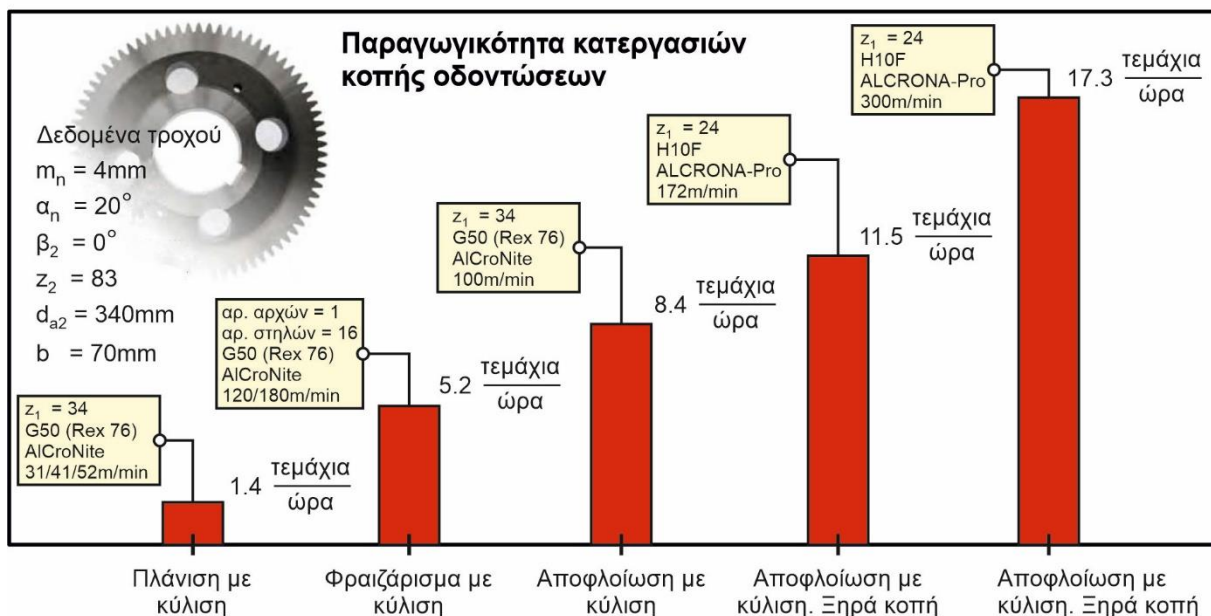
Σχήμα 2.15: Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων από τον Wilhelm von Pittler

Η κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων αποτελεί την πιο σύγχρονη και αποδοτικότερη μέχρι σήμερα κατεργασία για κοπή οδοντώσεων. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της κατεργασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες κατεργασίες οδοντώσεων, είναι η συνεχόμενη αφαίρεση υλικού που τη χαρακτηρίζει, γεγονός που ελαχιστοποιεί τους νεκρούς χρόνους της κατεργασίας και αυξάνει την παραγωγικότητά της. Τα βασικά πλεονεκτήματα της κατεργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Υψηλή παραγωγικότητα ως αποτέλεσμα των υψηλών γωνιακών ταχυτήτων κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου και της απουσίας νεκρών χρόνων κατεργασίας.
- Δυνατότητα κατεργασίας χωρίς τη χρήση υγρών κοπής.
- Δυνατότητα κατεργασιών εκχόνδρισης και φινιρίσματος χωρίς την ανάγκη για αλλαγή του κοπτικού εργαλείου μεταξύ των κατεργασιών. Εξάλειψη των σφαλμάτων που προκύπτουν από επανατοποθέτηση του εργαλείου.

- Χαμηλότερη αρχική επένδυση σε σχέση με τις υπόλοιπες κατεργασίες κοπής οδοντώσεων. Η κατεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων και ως εκ τούτου δεν απαιτούνται εξειδικευμένες εργαλειομηχανές.

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα σύγκρισης της παραγωγικότητας μεταξύ των κοινών κατεργασιών κοπής οδοντώσεων για την κατεργασία ενός εξωτερικού οδοντωτού τροχού ευθείας οδόντωσης [29]. Συγκρίνονται οι κατεργασίες της πλάνισης με κύλιση και του φραιζαρίσματος με κύλιση σε σχέση με τρεις παραλλαγές της κατεργασίας της αποφλοίσωσης με κύλιση. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ξηράς κοπής με διαφορετικές ταχύτητες κοπής και διαφορετικό υλικό και επικάλυψη του κοπτικού εργαλείου από τις υπόλοιπες κατεργασίες, καθώς και μία περίπτωση με χρήση υγρών κοπής και ίδιο υλικό κοπτικού εργαλείου με τις άλλες κατεργασίες. Σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές αποδείχθηκε ότι στις κατεργασίες ξηράς κοπής επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγικότητα, μικρότερη φθορά στο κοπτικό εργαλείο και καλύτερη ποιότητα στην τελική επιφάνεια του τεμαχίου για την κατεργασία αποφλοίσωσης με κύλιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διευκόλυνση της πλαστικής παραμόρφωσης των αποβλίπων από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην ξηρά κοπή. Σε κάθε περίπτωση η κατεργασία αποφλοίσωσης με κύλιση αποδεικνύεται ταχύτερη από την πλάνιση και το φραιζάρισμα με κύλιση και συγκεκριμένα έχει 6-12 και 1.6-3.3 φορές μεγαλύτερη παραγωγικότητα από τις δύο αντίστοιχες κατεργασίες κοπής οδοντώσεων.

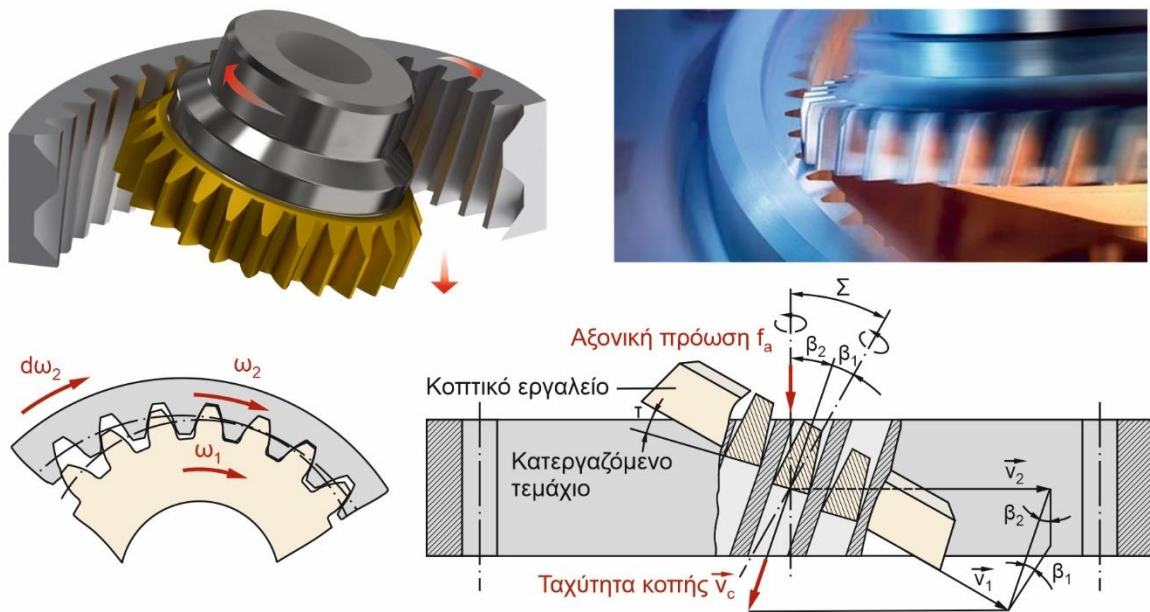


Σχήμα 2.16: Σύγκριση παραγωγικότητας μεταξύ των κατεργασιών κοπής οδοντώσεων

Η κινηματική της κατεργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα 2.17. Το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο υπό γωνία κλίσης Σ . Έτσι οι άξονες του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου δεν είναι πλέον παράλληλοι μεταξύ τους, όπως στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων. Η γωνία κλίσης Σ έχει άμεση σχέση με τις γωνίες ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου και προκύπτει ως το άθροισμα ή την αφαίρεση αυτών, αναλόγως αν πρόκειται για κατεργασία εξωτερικής ή εσωτερικής οδόντωσης. Έτσι:

$$\Sigma = \begin{cases} \beta_1 + \beta_2, & z_2 > 0 \\ \beta_1 - \beta_2, & z_2 < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Στην παραπάνω σχέση θεωρείται ότι οι γωνίες ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου έχουν την ίδια κατεύθυνση. Από την ίδια σχέση προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα κοπτικό εργαλείο ευθείας οδόντωσης μπορεί να κατεργαστεί μόνο οδοντωτούς τροχούς πλάγιας οδόντωσης. Αντίθετα, με τη χρήση ενός κοπτικού εργαλείου πλάγιας οδόντωσης, είναι δυνατή η κατεργασία οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης, αλλά και πλάγιας οδόντωσης με την κατάλληλη ρύθμιση της γωνίας Σ . Το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφονται γύρω από τους άξονές τους, σύμφωνα με την ίδια σχέση μετάδοσης που ισχύει στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων.



Σχήμα 2.17: Κινηματική της αποφλοίσωσης με κύλιση οδοντώσεων

Οι φορές περιστροφής είναι όμοιες σε κατεργασίες εσωτερικών οδοντώσεων και αντίθετες σε κατεργασίες εξωτερικών οδοντωτών τροχών. Η κατεργασία πραγματοποιείται σε διαδοχικά περάσματα, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικά βάθη κοπής. Έτσι, το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται αρχικά σε απόσταση όπου εφάπτονται οι κύκλοι κεφαλής κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου και στη συνέχεια μετατοπίζεται ακτινικά σε κατάλληλη απόσταση για κάθε πέρασμα, μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού βάθους του αυλακιού. Σε κάθε πέρασμα το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται σε απόσταση ασφαλείας πάνω από το κατεργαζόμενο τεμάχιο και στη συνέχεια μετατοπίζεται στη διεύθυνση του κατεργαζόμενου τεμαχίου με τη βοήθεια της αξονικής πρόωσης f_a σε όλο το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στις κατεργασίες πλάγιων οδοντώσεων πρέπει να προστεθεί μία επιπλέον περιστροφή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, περιστροφή που εξαρτάται από την αξονική πρόωση της κατεργασίας:

$$d\omega_2 = \frac{2 \cdot f_a \cdot \tan \beta_2}{d_{02}} \quad (2.7)$$

Ο συνδυασμός της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και της γωνίας κλίσης Σ είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία της ταχύτητας κοπής v_c , εφόσον η γωνία Σ είναι επαρκής. Για τον λόγο αυτόν η γωνία Σ ορίζεται συνήθως ως μεγαλύτερη από 10° και μικρότερη από 30° , με συνηθέστερη τιμή αυτή των 20° , καθώς υψηλές τιμές της οδηγούν σε συγκρούσεις μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι η ταχύτητα κοπής v_c προκύπτει ως τη

διανυσματική διαφορά των περιφερειακών ταχυτήτων v_1 και v_2 του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου αντίστοιχα:

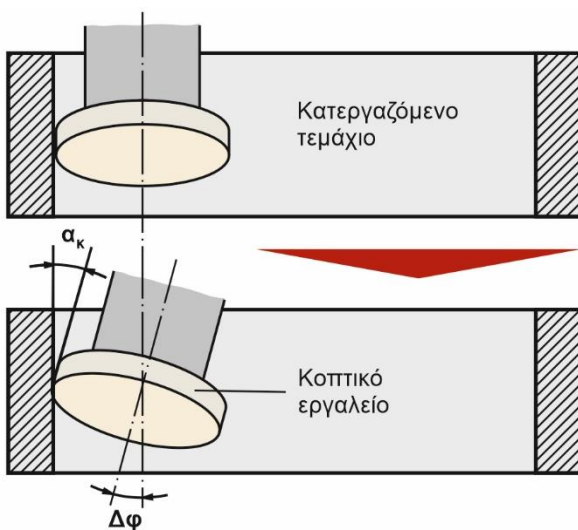
$$\vec{v}_c = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad (2.8)$$

Οι τρεις ανεξάρτητες κινήσεις, των οποίων ο σωστός συγχρονισμός είναι απαραίτητος για την επίτευξη κατεργασίας υψηλής ακρίβειας και συνολικά περιγράφουν την κινηματική της κατεργασίας είναι:

- Περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ως προς τον άξονά του με γωνιακή ταχύτητα ω_1 .
- Περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου ως προς τον άξονά του με γωνιακή ταχύτητα ω_2 . Επιπλέον περιστροφή του τεμαχίου κατά $d\omega_2$ σε κατεργασίες πλάγιων οδοντώσεων.
- Κατακόρυφη κίνηση μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου στη διεύθυνση του άξονα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, σύμφωνα με την αξονική πρόωση f_a .

Η διάταξη της κατεργασίας όπως περιγράφηκε παραπάνω οδηγεί στην συνεχόμενη αφαίρεση υλικού και σχηματισμό αποβλίπτων από τα κοπτικά δόντια. Σε αντίθεση με την κατεργασία πλάνισης με κύλιση όπου ένα κοπτικό δόντι τοποθετείται σε διαφορετικές θέσεις κύλισης για την κατεργασία ενός αυλακιού, στην αποφλοίωση με κύλιση κάθε δόντι κατεργάζεται με ένα κοινό τρόπο το αυλάκι του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αποβλίπτων όμοιας γεωμετρίας από όλα τα κοπτικά δόντια σε διαφορετικά αυλάκια, με την προϋπόθεση ότι το κοπτικό εργαλείο βρίσκεται σε σταθερό βάθος κοπής εντός του αυλακιού. Έτσι, στην αποφλοίωση με κύλιση οι αντίστοιχες θέσεις κύλισης της πλάνισης με κύλιση, ενσωματώνονται όλες μαζί σε θέσεις περιστροφής που τοποθετείται ένα κοπτικό δόντι στην τροχιά που διανύει. Η παραπάνω διαδικασία είναι ο βασικός λόγος της αυξημένης απόδοσης της κατεργασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες κατεργασίες κοπής οδοντώσεων.

Τα κοπτικά εργαλεία της κατεργασίας έχουν κατασκευαστικά πολλές ομοιότητες με τα αντίστοιχα εργαλεία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Συγκεκριμένα τα συμβατικά κοπτικά

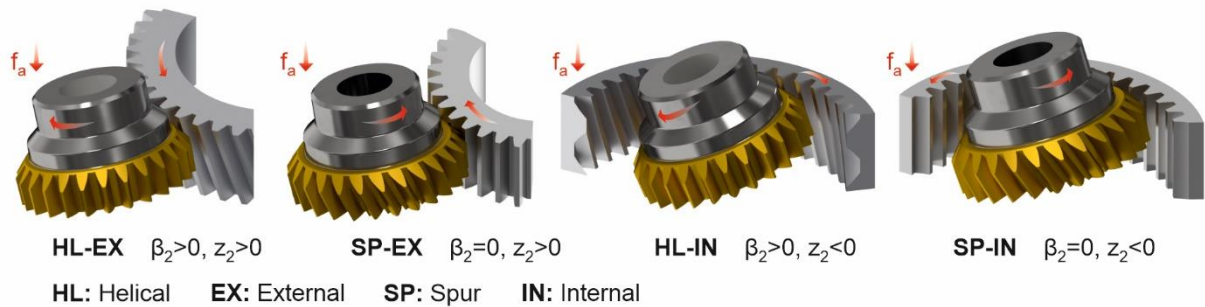


Σχήμα 2.18: Δημιουργία γωνίας ελευθερίας μέσω κινηματικής

εργαλεία πλάνισης με κύλιση χρησιμοποιούνται συχνά και στην αποφλοίωση με κύλιση με ικανοποιητικά αποτελέσματα [29]. Σε αντίθεση με την πλάνιση με κύλιση όπου ένα κοπτικό εργαλείο με συγκεκριμένο μέτρο οδοντώσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία οδοντωτών τροχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στην αποφλοίωση με κύλιση η γεωμετρία της κοπτικής ακμής στην επιφάνεια αποβλίπτου εξαρτάται τόσο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, αλλά και από τις συνθήκες της κατεργασίας. Στην κατεργασία χρησιμοποιούνται τόσο κωνικά όσο και κυλινδρικά κοπτικά εργαλεία. Στα κωνικά κοπτικά εργαλεία οι γωνίες ελευθερίας εξασφαλίζουν την αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ των παρειών του κοπτικού εργαλείου και του

κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Αντίθετα, στα κυλινδρικά κοπτικά εργαλεία λόγω απουσίας των γωνιών ελευθερίας, αυτές δημιουργούνται μέσω κατάλληλης τροποποίησης της κινηματικής της κατεργασίας. Η πιο συχνή τακτική είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου κατά γωνία $\Delta\phi$ [30], η οποία δημιουργεί την απαιτούμενη γωνία ελευθερίας στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.18](#).

Αντίστοιχα, όπως και στην κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, η αποφλοίωση με κύλιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία εσωτερικών και εξωτερικών οδοντωτών τροχών, με ευθεία ή πλάγια οδόντωση. Οι διαφορετικές παραλλαγές της κατεργασίας παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.19](#).



Σχήμα 2.19: Παραλλαγές κατεργασίας της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

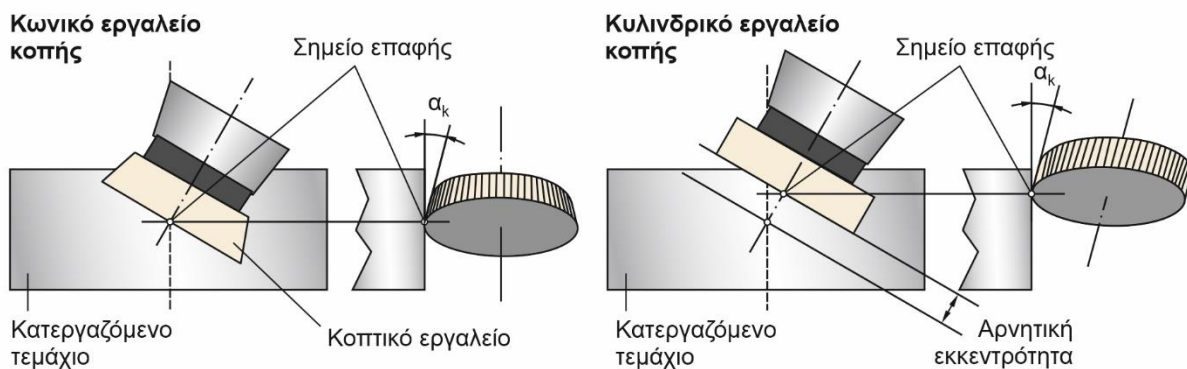
2.5 Έρευνα στην κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

Η μελέτη της κατεργασίας της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξημένης παραγωγικότητας που προσφέρει και της δημιουργίας οδοντωτών τροχών με υψηλή ποιότητα επιφάνειας. Η αποτελεσματική εφαρμογή της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων εξαρτάται από την επίλυση διαφόρων ζητημάτων, τα οποία έχουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον και προκύπτουν κυρίως λόγω της σύνθετης φύσης της κατεργασίας. Παρ' ότι η κατεργασία έχει επεκταθεί στις βιομηχανίες οδοντώσεων, μόνο μερικά από αυτά τα ζητήματα έχουν διερευνηθεί, με ιδιαίτερα περιορισμένο αριθμό δημοσιεύσεων πριν το 2010. Από τότε οι ερευνητικές δραστηριότητες έχουν ενταθεί και γίνονται προσπάθειες μελέτης της κατεργασίας και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- Μελέτη της κινηματικής της κατεργασίας μέσω προσομοιωτικών μοντέλων. Σκοπός των συγκεκριμένων μοντέλων είναι ο προσδιορισμός παραμέτρων που είναι δύσκολο να μετρηθούν πειραματικά. Μερικές από αυτές είναι η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων της κατεργασίας, ο υπολογισμός της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και των δυνάμεων κοπής.
- Υπολογισμοί της επίδρασης παραμέτρων στην κατεργασία. Οι μελέτες αυτές στοχεύουν στη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας στη γεωμετρία του τελικού οδοντωτού τροχού και στις συνθήκες της κατεργασίας.
- Μελέτη της γεωμετρίας των κοπτικών εργαλείων. Οι ερευνητικές αυτές προσπάθειες έχουν ως στόχο τη βελτίωση της γεωμετρίας των κοπτικών εργαλείων και την εξάλειψη των σφαλμάτων που προκαλούνται από αυτά στη γεωμετρία του τελικού οδοντωτού τροχού.

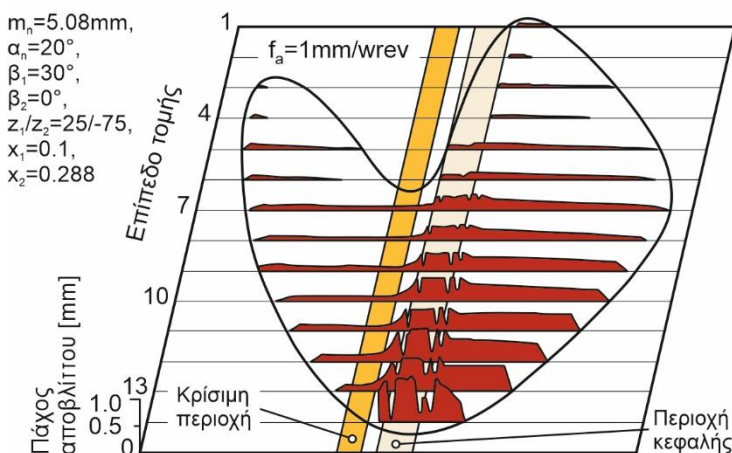
2.5.1 Προσομοιωτικά μοντέλα της κατεργασίας

Ο W. Jansen στη διδακτορική του διατριβή [31] ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε ένα μοντέλο προσομοίωσης για την κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ακολούθησε τη λογική του μοντέλου του Sulzer, η οποία και βασίστηκε στην αναπαράσταση του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου με πολυγωνικές γραμμές. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την υψηλού κόστους διόρθωση της γεωμετρίας των κωνικών κοπτικών εργαλείων έπειτα από κάθε επαναλείανσή τους, προτάθηκε η ταυτόχρονη χρήση δύο διαφορετικών κοπτικών εργαλείων για μία κατεργασία, ενός κυλινδρικού και ενός κωνικού. Η βασική ιδέα ήταν ότι η κύρια κατεργασία εκχόνδρισης θα γινόταν με το κυλινδρικό κοπτικό εργαλείο, ενώ το κωνικό κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιούταν μόνο στην κατεργασία φινιρίσματος. Με τον τρόπο αυτόν το ακριβότερο κωνικό κοπτικό εργαλείο δέχεται λιγότερες καταπονήσεις και ως αποτέλεσμα αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής του. Επειδή στα κυλινδρικά κοπτικά εργαλεία δεν υπάρχουν κατασκευαστικές γωνίες ελευθερίας στις παρειές των δοντιών, η προσθήκη των απαιτούμενων αυτών γωνιών γινόταν μέσω αξονικής μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου, η οποία ονομάζεται εκκεντρότητα. Τα δύο είδη των προτεινόμενων κοπτικών εργαλείων και η σχετική τοποθέτησή τους ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.20](#).



Σχήμα 2.20: Είδη κοπτικών εργαλείων στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων κατά Jansen

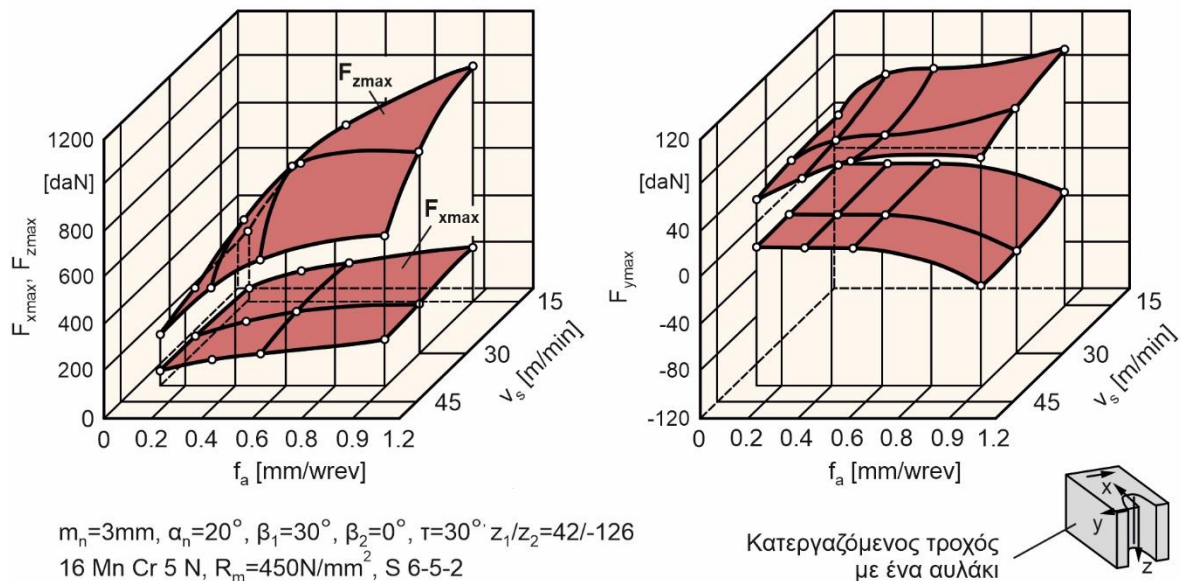
Στα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνεται η ανάλυση του σχηματισμού των अपαραμόρφωτων αποβλίπτων, η εξέταση



Σχήμα 2.21: Διατομές απαραμόρφωτου αποβλίπτου κατά W. Jansen

των παραμέτρων που επηρεάζουν τη φθορά του κοπτικού εργαλείου και ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής. Ο προσδιορισμός ενός απαραμόρφωτου αποβλίπτου, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.21](#), αποτελείται από διαδοχικές διατομές του αποβλίπτου σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα ως προς τον άξονα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Για κάθε διατομή υπολογίζεται το πάχος του αποβλίπτου ως προς το ανάπτυγμα της κοπτικής ακμής και όλες μαζί σε συνδυασμό

προσδιορίζουν τα όρια της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλήτου. Στο διάγραμμα απεικονίζονται η κρίσιμη περιοχή και η περιοχή κεφαλής του κοπτικού εργαλείου. Το μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων βασίστηκε στη μεθοδολογία κατά Κ. Δ. Μπουζάκη και στις εξισώσεις των Kienzle-Victor. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν για έναν ολόκληρο οδοντωτό τροχό, αλλά και για οδοντωτό τροχό με ένα μόνο αυλάκι, επαληθεύτηκαν μέσω της σύγκρισής τους με πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Στο [σχήμα 2.22](#) παρουσιάζεται η επίδραση της αξονικής πρόωσης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, υπολογισμένες στο σύστημα του αυλακιού, για έναν εσωτερικό οδοντωτό τροχό ευθείας οδόντωσης. Οι δυνάμεις αφορούν κατεργαζόμενο τροχό με ένα μόνο αυλάκι. Παρατηρείται ότι αύξηση της αξονικής πρόωσης της κατεργασίας έχει αντίστοιχη επίδραση στην απόλυτη τιμή των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 2.22: Επίδραση της αξονικής πρόωσης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής σύμφωνα με το μοντέλο του W. Jansen

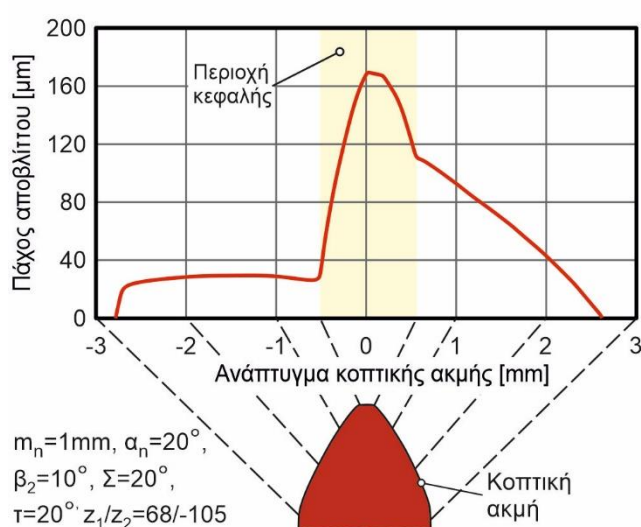
Οι Spath και Hühsmann [32,33] ανέπτυξαν ένα μοντέλο το οποίο προσομοίωνε την κινηματική της κατεργασίας μέσω μετασχηματισμών συστημάτων συντεταγμένων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις δυσκολίες χρήσης κάθε είδους κοπτικού εργαλείου, όπως αυτά παρουσιάστηκαν από τον Jansen, επισημαίνοντας ότι τα κυλινδρικά εργαλεία αποτελούν την προτιμότερη επιλογή έναντι των κωνικών. Το μοντέλο παρείχε τη δυνατότητα προσδιορισμού των γωνιών ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου που παρέχονται μέσω της κατάλληλης τοποθέτησής του σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι γωνίες ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου που προέκυψαν από το προσομοιωτικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση πειραμάτων έτσι ώστε να εξεταστεί η ορθότητα της επιλογής τους. Το μοντέλο υπολόγιζε επιπλέον τις κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των κοπτικών εργαλείων. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν εξετάστηκε η καταπόνηση που δέχεται το κοπτικό εργαλείο στην παρειά εισόδου και εξόδου αλλά και στην περιοχή της κεφαλής. Παρατηρήθηκε ότι η παρειά εισόδου δέχεται τη μικρότερη καταπόνηση, ενώ η μεγαλύτερη φθορά παρουσιάστηκε στην περιοχή της κεφαλής του κοπτικού εργαλείου.

Ο Tachikawa και άλλοι [34] ανέπτυξαν ένα γεωμετρικό μοντέλο το οποίο προέβλεπε το σφάλμα που παρουσιάζεται στην τελική γεωμετρία των παρειών εσωτερικών οδοντωτών τροχών. Το μοντέλο επαληθεύτηκε μέσω πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην εργαλειομηχανή 6 αξόνων Klingelnberg GmbH C29, ενώ η ακρίβεια στις παρειές της τελικής οδόντωσης

μετρήθηκε με τη χρήση της μετρητικής μηχανής Klingelnberg GmbH P26. Το μοντέλο αποδείχθηκε ότι υπολογίζει ικανοποιητικά το τελικό σφάλμα.

Ο Klocke και άλλοι επέκτειναν το λογισμικό SPARTapro που είχε αρχικά αναπτυχθεί για την προσομοίωση της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων [35], ώστε να υποστηρίξει επιπλέον και την κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων [36]. Το λογισμικό αυτό, το οποίο βελτιώνεται συνεχώς από το εργαστήριο Werkzeugmaschinenlabor του Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule του Aachen, έχει αναπτυχθεί στη γλώσσα Matlab και φιλοδοξεί στη βελτιστοποίηση των κατεργασιών οδοντώσεων που υποστηρίζει.

Το λογισμικό υπολογίζει το μήκος των απαραμόρφωτων αποβλίπων και το πάχος τους συναρτήσει του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής, πραγματοποιώντας τομές σε διαφορετικά επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αποτέλεσμα ενός τέτοιου υπολογισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.23. Το λογισμικό χρησιμοποιή-



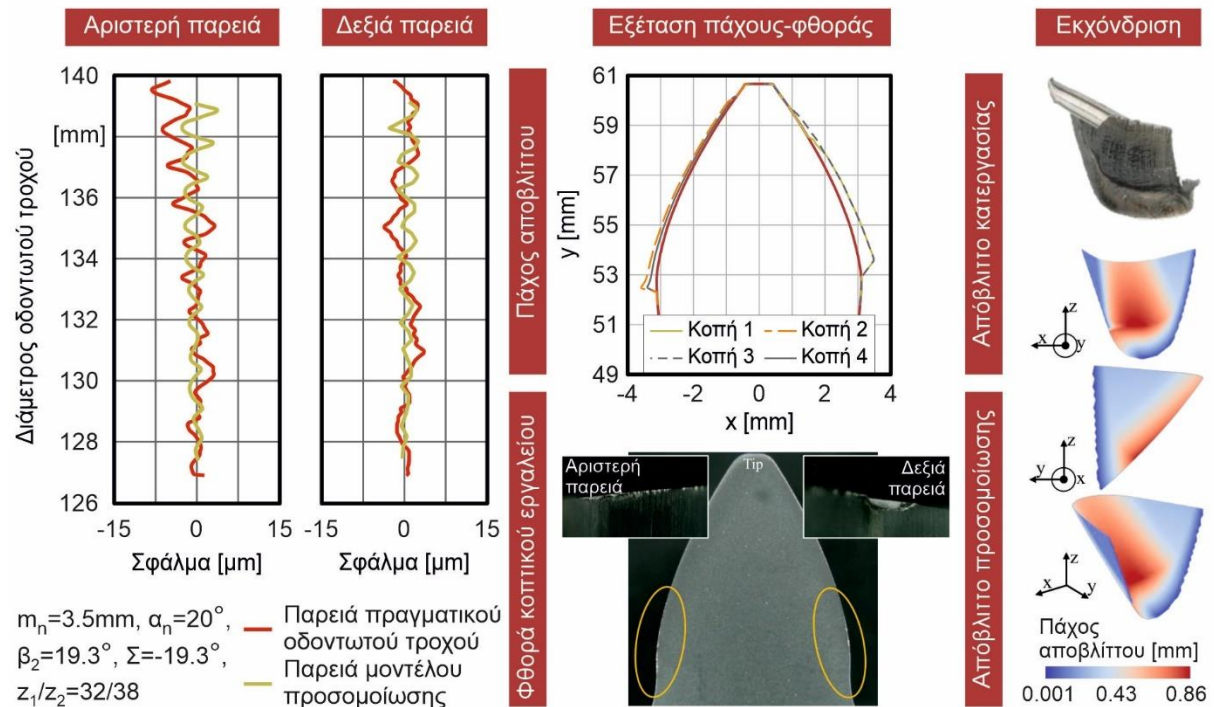
Σχήμα 2.23: Υπολογισμός πάχους αποβλίτου μέσω του SpartaPro

του τελικού οδοντωτού τροχού. Τα υπολείμματα αυτά αποδόθηκαν στις υψηλές αρνητικές τιμές των γωνιών αποβλίτου, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, αλλά και στην ασύμμετρη γεωμετρία των αποβλίπων.

Ο Janßen και άλλοι [37] επικεντρώθηκαν στη γενικευμένη επαλήθευση του λογισμικού SPARTapro, η οποία χωρίστηκε σε τρία βήματα. Αρχικά εξετάστηκε η γεωμετρία των παρειών του οδοντωτού τροχού, μέσω της σύγκρισής τους με τη γεωμετρία των παρειών πραγματικών οδοντωτών τροχών. Έτσι πραγματοποιήθηκε πείραμα κατεργασίας εξωτερικού οδοντωτού τροχού στο κέντρο κατεργασίας Gleason 300PS. Η γεωμετρία των παρειών μετρήθηκε στο μετρητικό σύστημα Klingelnberg P16. Για την εύρεση των αποκλίσεων ως προς τη θεωρητική καμπύλη και για τις συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GearAnalyzer, όπου και αποδείχθηκε ότι η προσομοιωμένη γεωμετρία προσεγγίζει ικανοποιητικά την αντίστοιχη μετρημένη. Στη συνέχεια εξετάστηκε η ορθότητα της αναλογικής σχέσης μεταξύ του πάχους των αποβλίπων και της φθοράς που παρουσιάζεται στα κοπτικά εργαλεία. Μελετήθηκε η φθορά του κοπτικού εργαλείου για κατεργασία φινιρίσματος τεσσάρων περασμάτων, όπου και διαπιστώθηκε ότι αυτή αυξάνεται στις περιοχές μέγιστου πάχους αποβλίτου, το οποίο και αντιστοιχούσε στα σημεία μέγιστης καμπυλότητας των παρειών του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, τα

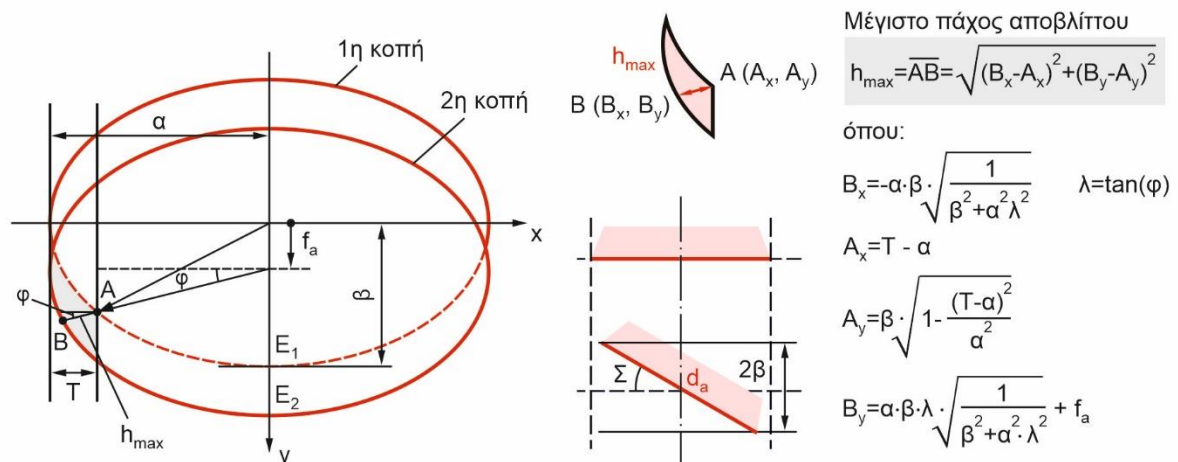
θηκε για την εκτέλεση προσομοιώσεων με διαφορετικούς συνδυασμούς γεωμετρίας και τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου, ώστε να εξεταστεί ο τρόπος που μεταβάλλονται το μέγιστο πάχος του αποβλίτου, η ταχύτητα κοπής και η γωνία αποβλίτου. Στη συνέχεια της έρευνάς τους πραγματοποιήθηκε πλήθος πειραμάτων με τη χρήση κοπτικού εργαλείου ενός μόνο δοντιού, όπου και επαληθεύτηκε η αναλογική σχέση μεταξύ της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και του μέγιστου πάχους του αποβλίτου, όπως αυτό προέκυψε από το λογισμικό SPARTapro. Μετά το πέρας της εκτέλεσης των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι τμήματα των αποβλίπων παραμένουν με τη μορφή συγκολλητών δεσμών (υπολείμματα ψευδόκοπης) στα αυλάκια

απόβλιττα που προέκυψαν από το λογισμικό συγκρίθηκαν με πραγματικά απόβλιττα για κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος. Η σύγκριση έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα με τη γεωμετρία και το περίγραμμα των πραγματικών αποβλίττων να προσεγγίζει τα απόβλιττα της προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμορφώσεις που συμβαίνουν στην πραγματική κατεργασία. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης σε κάθε στάδιο παρουσιάζονται στο σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24: Μεθοδολογία επαλήθευσης του λογισμικού SPARTapro κατά Janßen et al.

Ο Bergs και άλλοι [38] ανέπτυξαν μια αναλυτική αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό του αναμενόμενου μέγιστου πάχους των αποβλίττων της κατεργασίας. Για την επαλήθευση της μεθόδου, οι τιμές υπολογισμού συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό SPARTapro. Η μεθοδολογία βασίστηκε στον γεωμετρικό υπολογισμό του μέγιστου πάχους του αποβλίττου σε δύο διαστάσεις, με βάση δύο διαδοχικές θέσεις του κοπτικού εργαλείου στη διεύθυνση της αξονικής πρόωσης.



Σχήμα 2.25: Υπολογισμός μέγιστου πάχους αποβλίττου κατά Bergs et al.

Η μεθοδολογία παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα 2.25, με το κοπτικό εργαλείο να αναπαρίσταται ως έλλειψη σε πλάγια όψη. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε για δύο οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης, έναν εξωτερικό και έναν εσωτερικό. Οι παράμετροι της κατεργασίας που μεταβλήθηκαν για τους σκοπούς των συγκρίσεων ήταν η αξονική πρόωση και το βάθος κοπής. Το βάθος κοπής υπολογίστηκε από τη διαίρεση του ύψους του δοντιού με τον αριθμό περασμάτων που επιλέχθηκε (3 – 8), ενώ για την αξονική πρόωση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 0.1 - 0.5mm/wrev. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκρίσεων η αναλυτική αριθμητική μέθοδος προσέγγισε ικανοποιητικά το μέγιστο πάχος των αποβλίπτων του λογισμικού SPARTApro, σε ποσοστά που κυμάνθηκαν μεταξύ 98% έως 99.9%.

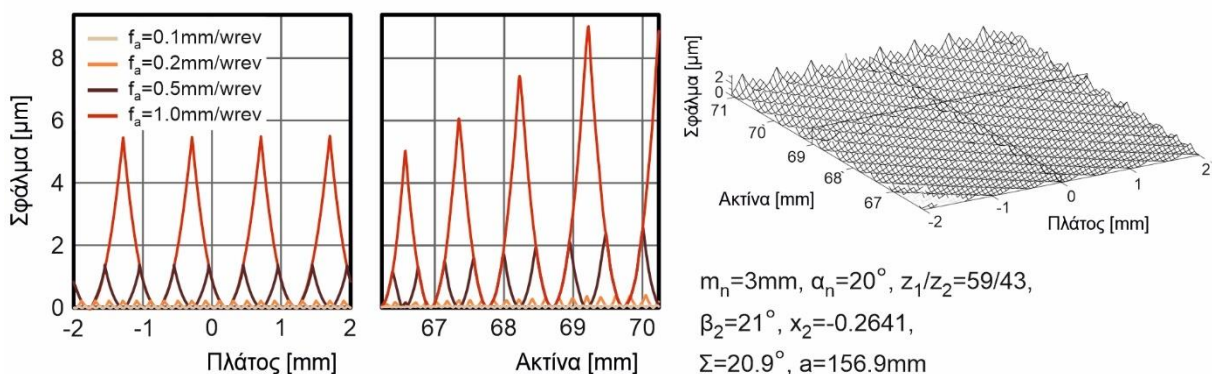
Η σημαντική επίδραση των υψηλών αρνητικών τιμών των γωνιών αποβλίπτου στη φθορά των κοπτικών εργαλείων, επισημάνθηκε και από τον Kimme και τους συνεργάτες του [39]. Στην έρευνά τους αναπτύχθηκε ένα μοντέλο μέσω του οποίου μελετήθηκαν οι διακυμάνσεις των γωνιών αποβλίπτου και των γωνιών ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου σε κάθε χρονική στιγμή της κατεργασίας, προκειμένου να εξεταστεί η επίδρασή τους στη φθορά του. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι οι γωνίες αυτές επηρεάζονται σημαντικά, τόσο από το βάθος κοπής που επιλέγεται, αλλά και από την αξονική πρόωση της κατεργασίας. Για τον λόγο αυτόν και προκειμένου να αποφευχθεί η πρόωρη φθορά των κοπτικών εργαλείων, οι ερευνητές πρότειναν τη χρήση στρατηγικών κοπής με πολλαπλά διαδοχικά περάσματα, όπου σε κάθε πέρασμα επιλέγεται διαφορετική σχετική τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Ο Vargas και άλλοι [40] τόνισαν επίσης την παρουσία υψηλών αρνητικών τιμών στις γωνίες αποβλίπτου και μελέτησαν επιπλέον το πως αυτές επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται. Για τον σκοπό αυτόν ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο το οποίο βασίστηκε στη μεθοδολογία του μοντέλου του Hühsmann [33] για την προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής βασίστηκε στις εξισώσεις των Kienzle και Victor, στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια της διατομής του αποβλίπτου και το υλικό που χρησιμοποιείται στην κατεργασία. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στον υπολογισμό των δυνάμεων, οι εξισώσεις αυτές επεκτάθηκαν προκειμένου επιπλέον να συνυπολογίζονται η επίδραση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και κυρίως οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στις γωνίες αποβλίπτου. Για την επιλογή του κατάλληλου συντελεστή που λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις των γωνιών αποβλίπτου, δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού του από τη βιβλιογραφία. Στην πρώτη μέθοδο θεωρείται ότι οι δυνάμεις κοπής μεταβάλλονται κατά 1% για κάθε μεταβολή μοίρας στη γωνία αποβλίπτου [41], ενώ στη δεύτερη μέθοδο το ποσοστό μεταβολής ορίζεται σε 1.5% [42]. Οι ερευνητές πραγματοποίησαν δύο ομάδες πειραμάτων προκειμένου να εντοπίσουν τη βέλτιστη από τις δύο μεθόδους υπολογισμού του συντελεστή της γωνίας αποβλίπτου. Τα πειράματα περιλάμβαναν κατεργασίες σε πλάγιες και ευθείες οδοντώσεις με διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας και στρατηγικών κοπής. Όλα τα πειράματα διεξάχθηκαν με κοπτικό εργαλείο ενός κοπτικού δοντιού σε κέντρο κατεργασίας INDEX V300 Sonder, ενώ οι δυνάμεις κοπής μετρήθηκαν σε σταθερό σύστημα στο κέντρο του οδοντωτού τροχού με δυναμόμετρο Kistler. Τα αποτελέσματα των μετρημένων δυνάμεων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχα υπολογισμένες από το μοντέλο δυνάμεις, τόσο λαμβάνοντας υπόψη τους δύο συντελεστές της γωνίας αποβλίπτου, αλλά και αγνοώντας εντελώς την επίδρασή της στον υπολογισμό των δυνάμεων. Σύμφωνα με τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, το μέγιστο σφάλμα μειώθηκε από 47% σε 32% όταν η γωνία αποβλίπτου λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των δυνάμεων. Αναφορικά με τους συντελεστές της γωνίας αποβλίπτου, αποδείχθηκε ότι με την πρώτη μέθοδο προσεγγίζονται καλύτερα οι

μετρημένες δυνάμεις σε οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης, ενώ η δεύτερη μέθοδος είναι πιο κατάλληλη για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής σε πλάγιες οδοντώσεις.

Σε συνέχεια της έρευνάς τους οι Vargas και Schulze [43] επικεντρώθηκαν στη βελτίωση των αριθμητικών υπολογισμών για την ταχύτητα κοπής, την ελάχιστη γωνία αποβλίπτου που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, καθώς και το μέγιστο πάχος των αποβλίπτων. Η γνώση των συγκεκριμένων παραμέτρων συμβάλλει στον ευκολότερο καθορισμό του αριθμού περασμάτων της κατεργασίας, της ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και της αξονικής πρόωσης. Προσπάθειες για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών έχουν ήδη πραγματοποιηθεί [31,38,44], αλλά βασίζονται στην απλοποιημένη δισδιάστατη αναπαράσταση της κατεργασίας, αγνοώντας την τρισδιάστατη φύση της και την επιρροή της κλίσης του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο «μοναδικού» σημείου (single point model), το οποίο βασίστηκε στην τροχιά που ακολουθεί το μέσο της κεφαλής του κοπτικού εργαλείου στον τρισδιάστατο χώρο. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη νέων σχέσεων υπολογισμού των προαναφερόμενων παραμέτρων. Για την επαλήθευση των νέων σχέσεων συγκρίθηκαν οι τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από τις νέες σχέσεις με τις έως τώρα μεθόδους υπολογισμού τους. Ως μέτρο σύγκρισης ορίστηκε το σφάλμα των υπολογισμών από τις αντίστοιχες τιμές τους, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας που αναπτύχθηκε σε προγενέστερη εργασία των ερευνητών [40]. Διαπιστώθηκε ότι οι νέες σχέσεις προσεγγίζουν με πολύ καλύτερη ακρίβεια τις τιμές του προσομοιωτικού μοντέλου, με το μέγιστο σφάλμα για την ταχύτητα κοπής, την ελάχιστη γωνία αποβλίπτου και το μέγιστο πάχος αποβλίπτου να μην ξεπερνά το 12.1%, 16.2% και 25.5% αντίστοιχα.

Ο Trübswetter και άλλοι [45] μελέτησαν τη μικροδομή στις επιφάνειες των παρειών του αυλακιού σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν κατεργαστεί μέσω της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων. Η ποιότητα της μικροδομής των παρειών έχει σημαντική επίδραση στην παρουσία θορύβου κατά την εμπλοκή οδοντωτών τροχών. Στη συγκεκριμένη έρευνα αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να εξεταστεί η επίδραση της αξονικής πρόωσης στη μικροδομή των παρειών και πως αυτή συσχετίζεται με την παρουσία θορύβου. Η μικροδομή των παρειών μελετήθηκε σε διαστήματα ίσα με την αξονική πρόωση σε όλο το πλάτος του οδοντωτού τροχού. Στο σχήμα 2.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για ένα εξωτερικό οδοντωτό τροχό πλάγιως οδόντωσης, όπου αναλύεται η μικροδομή της επιφάνειας της παρειάς ενός αυλακιού. Μελετήθηκαν 4 διαφορετικές τιμές της αξονικής πρόωσης, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της κατεργασίας παρέμειναν σταθερές.



Σχήμα 2.26: Μικροδομή της επιφάνειας της παρειάς εξωτερικού οδοντωτού τροχού κατά Trübswetter et al.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, είναι φανερό η αναλογική σχέση της αξονικής πρόωσης με το τελικό σφάλμα, τόσο συναρτήσει της ακτίνας του οδοντωτού τροχού, αλλά και συναρτήσει του πλάτους του. Συγκεκριμένα, αύξηση της αξονικής πρόωσης οδηγεί σε μεγαλύτερες αποκλίσεις, με το μέγιστο σφάλμα να μην υπερβαίνει τα 8μm για τη μεγαλύτερη τιμή της αξονικής πρόωσης. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η ειδική μικροδομή στις επιφάνειες των παρειών έχει θετική επίδραση στη μείωση του παραγόμενου θορύβου, ενώ αρνητική επίδραση μπορεί να παρουσιαστεί σε συγκεκριμένες συχνότητες.

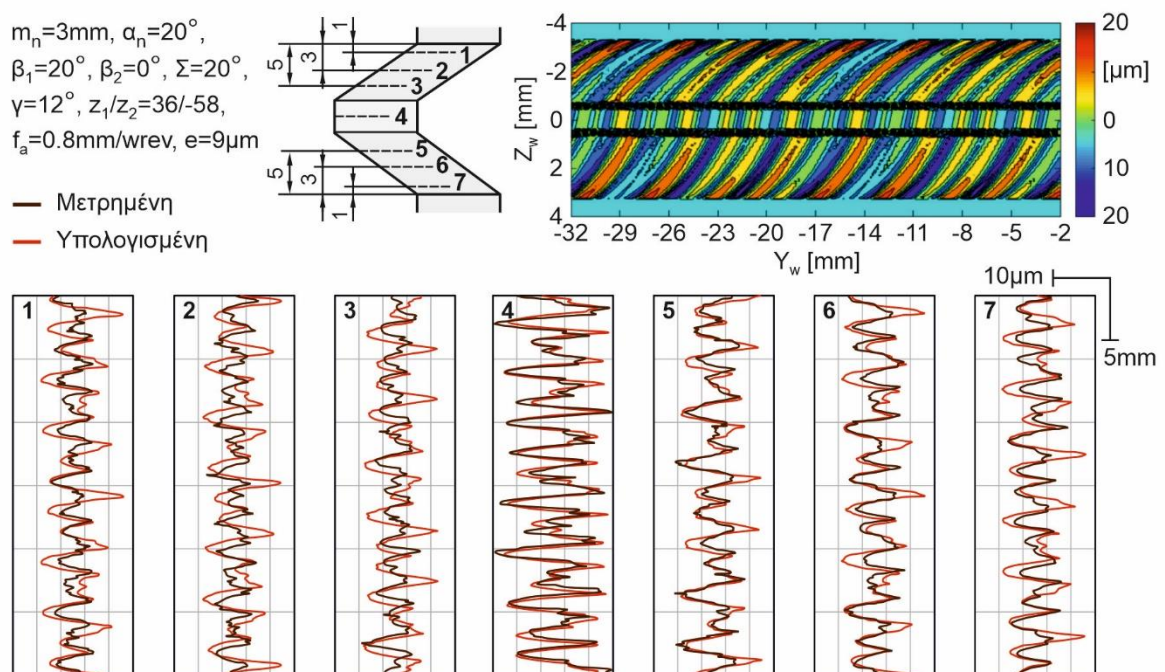
Ο McCloskey και άλλοι [46] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας με σκοπό τον προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίπτων και των δυνάμεων κοπής. Για την ανάπτυξη του μοντέλου ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε από τον Katz και τους συνεργάτες του [13], για την ανάπτυξη ενός μοντέλου διακριτής μοντελοποίησης στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων. Το μοντέλο επαληθεύτηκε πειραματικά στο κέντρο κατεργασίας NT5400DCG της DMG MORI και για τη μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε το ασύρματο μετρητικό σύστημα SPIKE της pro-micron, το οποίο τοποθετήθηκε απευθείας πάνω στο κοπτικό εργαλείο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 30 πειράματα με διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών των συνθηκών κατεργασίας και οι δυνάμεις κοπής μετρήθηκαν στο σύστημα του κοπτικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά με το μέσο σφάλμα μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων δυνάμεων να μην ξεπερνά το 10%.

Σε αντίστοιχη μέθοδο διακριτής μοντελοποίησης μέσω ευθύγραμμων τμημάτων σε τρεις διαστάσεις (Triple-dexel representation), βασίστηκε το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Inui και τους συνεργάτες του [47]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η αναπαράσταση του τρισδιάστατου χώρου γίνεται από κύβους ορισμένων διαστάσεων, οι οποίες ορίζουν και την ακρίβεια της προσομοίωσης. Έτσι, η γεωμετρία τόσο του κατεργαζόμενου τεμαχίου αλλά και της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου οριοθετείται από ένα σύνολο κύβων και πολυγώνων. Τα πολύγωνα αναπαριστούν τις εξωτερικές επιφάνειες των γεωμετριών και προκύπτουν από τις τομές των μοντέλων με κύβους του τρισδιάστατου χώρου. Για τη δημιουργία των πολυγώνων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Marching Cubes [48]. Η λειτουργία της λογικής αφαίρεσης χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίπτων και του κατεργαζόμενου τεμαχίου έπειτα από κάθε πέρασμα του κοπτικού εργαλείου σε συγκεκριμένο βάθος κοπής.

Σε συνέχεια της έρευνάς τους το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής και την ανάπτυξης μίας μεθόδου προσδιορισμού των ειδικών παραμέτρων κοπής μέσω προσομοιώσεων [49]. Συγκεκριμένα ο υπολογισμός των δυνάμεων βασίστηκε στο μοντέλο λοξής κοπής και λαμβάνει υπόψη τόσο το πάχος των διατομών του απαραμόρφωτου αποβλίπτου, αλλά και τη γωνία αποβλίπτου σε κάθε θέση της κοπτικής κατατομής, όπως προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στοχεύει στον υπολογισμό των ειδικών παραμέτρων κοπής μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, στην οποία εξετάζονται διαφορετικές τιμές των παραμέτρων μέχρις ότου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων δυνάμεων. Για την επαλήθευση του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής και της αξιοπιστίας της παραπάνω μεθόδου, πραγματοποιήθηκε πείραμα κατεργασίας εσωτερικού οδοντωτού τροχού σε 3 διαδοχικά περάσματα (1.25mm, 0.5mm, 0.5mm). Χρησιμοποιήθηκε κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων και το κοπτικό εργαλείο τοποθετήθηκε σε γωνία 20° ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου ήταν χαλυβας JIS-SCM415, ενώ του κοπτικού εργαλείου ταχυχάλυβας HRC66-68. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για διαφορετικούς συνδυασμούς της αξονικής πρόωσης (0.05 έως 0.3mm/wrev) και μετρήθηκαν οι συνιστώσες δυνάμεις X και Z στο σύστημα στο κέντρο του κατεργαζόμενου

τεμαχίου. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των μετρημένων και υπολογισμένων δυνάμεων, όπου διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο σφάλμα δεν ξεπερνούσε το 15%.

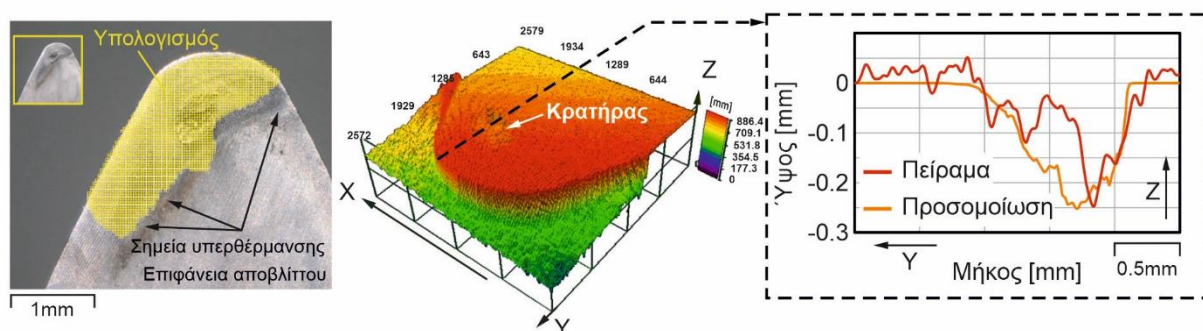
Εκτεταμένη έρευνα σχετική με την κατεργασία της αποφλοίσωσης με κύλιση οδοντώσεων έχει διεξαχθεί από τον Ren και τους συνεργάτες του. Η αρχική ερευνητική τους δραστηριότητα [50] επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός κινηματικού μοντέλου της κατεργασίας, με σκοπό την ανάλυση της επίδρασης του σφάλματος εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου και της αξονικής πρόωσης στην τραχύτητα των παρειών του τελικού αυλακιού. Η τραχύτητα υπολογίστηκε και πειραματικά για 6 διαφορετικούς συνδυασμούς της αξονικής πρόωσης (0.4 και 0.8mm/wrev) και του σφάλματος εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου (1μm, 4μm, 9μm). Οι μετρήσεις της τραχύτητας έγιναν στο μέσο της αριστερής παρειάς, της δεξιάς παρειάς και της περιοχής ποδός του αυλακιού σε συνολική απόσταση 30mm στο πλάτος του οδοντωτού τροχού. Οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του μοντέλου υπολογισμού, όπου διαπιστώθηκε ότι οι υπολογισμένες τιμές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το σφάλμα εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου είχε τη μεγαλύτερη επιρροή στην αύξηση του δείκτη R_z για την τραχύτητα των παρειών του αυλακιού, ενώ η επιρροή της αξονικής πρόωσης για τις τιμές 0.4 και 0.8mm/wrev ήταν μεγαλύτερη, μόνο όταν το σφάλμα εκκεντρότητας ήταν μικρότερο από 1.4 και 2.3μm αντίστοιχα. Μια αναλυτική περίπτωση σύγκρισης των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών της τραχύτητας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.27, όπου και συγκρίνονται οι μετρήσεις της τραχύτητας σε επτά διαφορετικές θέσεις της περιοχής του αυλακιού.



Σχήμα 2.27: Σύγκριση τραχύτητας των παρειών ενός αυλακιού κατά Ren et al.

Το αρχικό μοντέλο κινηματικής επεκτάθηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει τον προσδιορισμό των απαραιτόρων αποβλήτων της κατεργασίας, των οποίων η γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό διαφόρων χαρακτηριστικών κοπής [51]. Σκοπός των ερευνών ήταν η πρόβλεψη της φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλήτου, ή οποία πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια. Αρχικά για κάθε διακριτή θέση της κοπτικής κατατομής υπολογίστηκαν η ενεργός γωνία αποβλήτου, η ταχύτητα κοπής καθώς και το βάθος κοπής στην εκάστοτε θέση. Οι τιμές

που υπολογίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κατανομής των θερμοκρασιών και τάσεων στην επιφάνεια αποβλίπτου με τη βοήθεια του λογισμικού AdvantEdge. Ακολούθησε ο υπολογισμός του βάθους κρατήρα βασιζόμενος στην κατανομή των θερμοκρασιών και τάσεων σύμφωνα με υπάρχουσα μεθοδολογία από τη βιβλιογραφία [52]. Η μεθοδολογία αυτή επεκτάθηκε έτσι ώστε η επιφάνεια επαφής αποβλίπτου-κοπτικού εργαλείου να λαμβάνεται επιπλέον υπόψη στον υπολογισμό. Το μοντέλο επαληθεύτηκε μέσω πειράματος πέντε περασμάτων, όπου συγκρίθηκε η γεωμετρία των πραγματικών αποβλίπτων με την αντίστοιχη των απαραμόρφωτων αποβλίπτων. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε πείραμα με κοπτικό εργαλείο ενός δοντιού προκειμένου να αξιολογηθεί ο θεωρητικός υπολογισμός της φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίπτου. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, τόσο ως προς την επιφάνεια (σχήμα 2.28), αλλά και το βάθος κρατήρα με το σφάλμα να μην ξεπερνά το 5%.



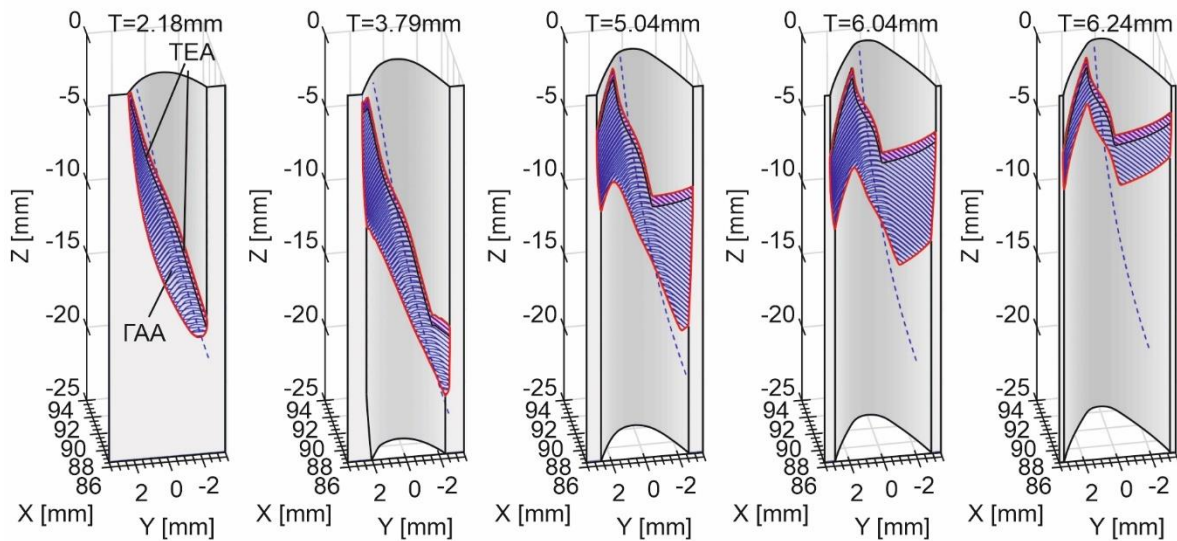
$$m_n=3\text{mm}, \alpha_n=20^\circ, z_1/z_2=36/-58, \beta_1=20^\circ, \beta_2=0^\circ, \Sigma=20^\circ, \gamma=12^\circ, f_a=0.8\text{mm/wrev}$$

Σχήμα 2.28: Σύγκριση της επιφάνειας και του βάθους φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίπτου κατά Ren et al.

Η μεθοδολογία προσδιορισμού των απαραμόρφωτων αποβλίπτων αναλύθηκε διεξοδικά σε μέτεπειτα ερευνητική δραστηριότητα [53]. Ο προσδιορισμός των αποβλίπτων έγινε μέσω τομών πολυγωνικών γραμμών και η έρευνα επικεντρώθηκε στη μελέτη της τοπολογίας των αποβλίπτων σε κατεργασία πολλών περασμάτων. Παρατηρήθηκε ότι η σταδιακή αύξηση του βάθους κοπής οδηγούσε στο σχηματισμό αποβλίπτων με πιο πολύπλοκη γεωμετρία και μικρότερο πάχος. Ιδιαίτερα στα τελευταία περάσματα που ισοδυναμούν με κατεργασία φινιρίσματος, το μοντέλο προσδιόριζε επιτυχώς τη γεωμετρία των αποβλίπτων, των οποίων το πάχος προσέγγιζε τα $0.55\mu\text{m}$.

Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη μελέτη των συγκρούσεων που εμφανίζονται ανάμεσα στις παρειές των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και στο αυλάκι του οδοντωτού τροχού [54]. Στόχος ήταν ο υπολογισμός των ελάχιστων κατασκευαστικών πλάγιων γωνιών ελευθερίας που πρέπει έχει το κοπτικό εργαλείο προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιες συγκρούσεις σε όλα τα διαδοχικά περάσματα της κατεργασίας. Στη μέθοδο ελέγχου των συγκρούσεων χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο το τελικό αυλάκι του οδοντωτού τροχού σε συγκεκριμένο βάθος, όπως αυτό προσδιορίστηκε αρχικά από το μοντέλο. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε εκ νέου η τροχιά του κοπτικού εργαλείου, όπου επιπλέον της δισδιάστατης κοπτικής ακμής λήφθηκαν υπόψη και οι επιφάνειες των παρειών του κοπτικού εργαλείου, όπως αυτές προκύπτουν σύμφωνα με τη δεδομένη πλάγια γωνία ελευθερίας. Η περιοχή σύγκρουσης προσδιορίστηκε από τα σημεία επαφής μεταξύ της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου και του αυλακιού. Με βάση τη δεδομένη πλάγια γωνία ελευθερίας και προκειμένου να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη για την αποφυγή των συγκρούσεων, η τροχιά αναπροσαρμόστηκε σταδιακά, αυξάνοντας την πλάγια γωνία ελευθερίας κατά τον εντοπισμό μιας περιοχής σύγκρουσης. Διαπιστώθηκε ότι η

παραπάνω μεθοδολογία ήταν αποτελεσματική στην πρόβλεψη των συγκρούσεων, ενώ είχε εφαρμογή και σε διαφορετικά προφίλ κοπτικών κατατομών.

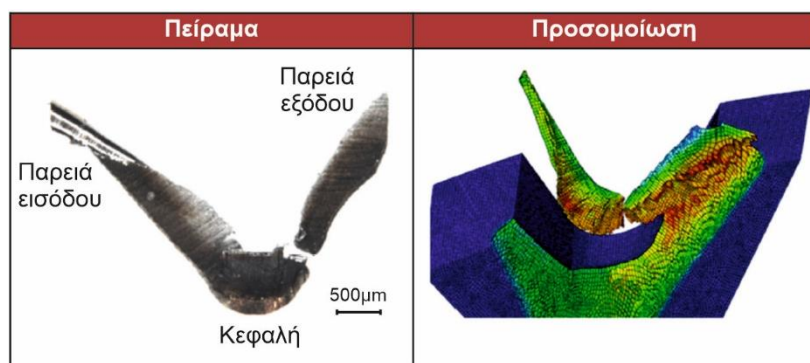


$m_n=3\text{mm}$, $\alpha_n=20^\circ$, $z_1/z_2=36/-58$, $\beta_1=20^\circ$, ΓΑΑ: Γεωμετρία απαραμόρφωτου αποβλίπτου
 $\beta_2=0^\circ$, $\Sigma=20^\circ$, $\gamma=12^\circ$, $f_a=0.8\text{mm/wrev}$ ΤΕΑ: Τμήμα επιφάνειας αυλακιού

Σχήμα 2.29: Σχηματισμός παρειών αυλακιού σε κατεργασία 5 περασμάτων εσωτερικού οδοντωτού τροχού

Στην πιο πρόσφατη ερευνητική τους δραστηριότητα [55] μελετήθηκε η ακεραιότητα των παρειών εισόδου και εξόδου του αυλακιού, το οποίο δημιουργείται σε κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση πολλαπλών περασμάτων. Διαπιστώθηκε ότι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακεραιότητα των παρειών του αυλακιού ήταν η τοπική γωνία αποβλίπτου και το πάχος αποβλίπτου, οι οποίοι παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις κατά την κατεργασία. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η παρειά εξόδου επιδέχεται πιο έντονες πλαστικές παραμορφώσεις από την παρειά εισόδου, γεγονός που αποδόθηκε στο μεγαλύτερο μέσο πάχος αποβλίπτου σε εκείνη την περιοχή και κατά συνέπεια στην εμφάνιση μεγαλύτερων δυνάμεων. Επιπλέον αποδείχθηκε ότι γεωμετρικά μόνο οι τοπικές παράμετροι κοπής που βρίσκονται στην περιοχή των ορίων του αποβλίπτου συμβάλλουν στον σχηματισμό των επιφανειών του αυλακιού. Η περιοχή αυτή εξαρτάται από την αξονική και την ακτινική πρόωση της κατεργασίας και είναι ανεξάρτητη της ακτινικής πρόωσης των προηγούμενων περασμάτων. Στο [σχήμα 2.29](#) παρουσιάζεται κατεργασία κοπής 5 περασμάτων και απεικονίζεται η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων σε κάθε πέραςμα και η περιοχή αποβλίπτου που συμβάλλει στο σχηματισμό των επιφανειών του αυλακιού.

Ο Schulze και άλλοι [56] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ABAQUS μέσω του οποίου προσομοιώθηκε η κινηματική της κατεργασίας και μελετήθηκαν οι μηχανισμοί σχηματισμού των αποβλίπτων. Στα αποτελέσματα του μοντέλου συμπεριλαμβάνονταν η κατανομή των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, οι δυνάμεις κοπής και η γεωμετρία των αποβλίπτων.



Σχήμα 2.30: Επαλήθευση αποβλίπτου κατά Schulze et al.

Το μοντέλο επαληθεύτηκε πειραματικά ως προς τη γεωμετρία των αποβλίπτων (σχήμα 2.30) και την κατανομή των πειραματικών και υπολογισμένων θερμοκρασιών. Η διαφορά της μέγιστης θερμοκρασίας μεταξύ πειραματικών και υπολογισμένων τιμών ήταν 13K, γεγονός που αποδόθηκε στην προσομοίωση ενός μόνο κοπτικού δο-

ντιού, σε αντίθεση με ένα πλήρη οδοντωτό τροχό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα που εκπονήθηκε.

2.5.2 Βελτιστοποίηση κοπτικών εργαλείων

Η σύνθετη κινηματική της κατεργασίας και η πολύπλοκη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων οδηγούν συχνά σε αστοχίες στην τελική γεωμετρία του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και σε συγκρούσεις μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτό έχει ως συνέπεια τη χαμηλή ποιότητα του τελικού οδοντωτού τροχού αλλά και την πρόωρη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Αρκετές μελέτες έχουν εστιάσει στη διερεύνηση των αιτιών που προκαλούν τα εν λόγω προβλήματα αλλά και στην εξάλειψή τους, προτείνοντας τροποποιήσεις στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και στις παραμέτρους της κατεργασίας.

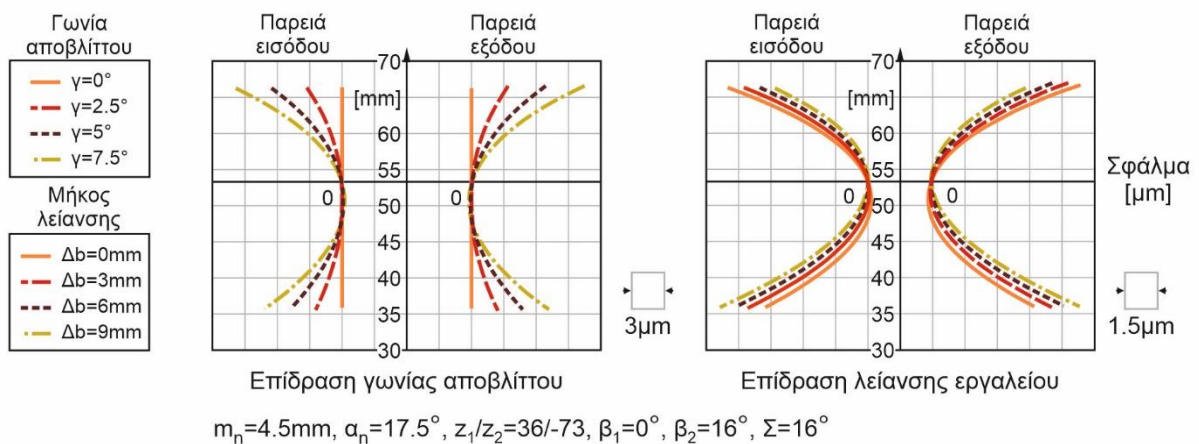
Ο Guo και άλλοι [57] πρότειναν μία μεθοδολογία κατασκευής κοπτικού εργαλείου πλάγιας οδόντωσης, το οποίο σε σχέση με τα συμβατικά κοπτικά εργαλεία οδηγούσε σε μείωση των συγκρούσεων μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου και βελτίωση της ανομοιόμορφης κατανομής φθοράς στο κοπτικό εργαλείο. Στη νέα μέθοδο κατασκευής, η επιφάνεια αποβλίπτου βρίσκεται στο κάθετο επίπεδο (normal plane) του κοπτικού εργαλείου και όχι στο μετωπικό επίπεδο (transverse plane), όπως συμβαίνει στα συμβατικά κοπτικά εργαλεία, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει τη διατήρηση ίσων πλάγιων γωνιών ελευθερίας κατά την επαναλαβάνη του κοπτικού εργαλείου. Με σκοπό τη μείωση των σφαλμάτων που μεταφέρονται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο λόγω της γωνίας αποβλίπτου, προτάθηκε μία μέθοδος διόρθωσης της γωνίας πίεσης του κοπτικού εργαλείου. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων το νέο κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε σε λογισμικό προσομοίωσης της κατεργασίας, όπου μετρήθηκε ότι το μέγιστο σφάλμα στην παρειά του αυλακιού δεν ξεπερνούσε τα 3μm.

Οι ερευνητές ασχολήθηκαν επίσης με τα σφάλματα που μεταφέρονται στη γεωμετρία του τελικού τεμαχίου κατά τη χρήση κοπτικών εργαλείων πλάνισης με κύλισης [58]. Επισήμαναν ότι όταν το κοπτικό εργαλείο έχει θετική γωνία αποβλίπτου ή γωνία ελευθερίας κεφαλής, εμφανίζονται αποκλίσεις στην κατατομή του κοπτικού δοντιού οι οποίες μεταφέρονται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για τη διόρθωση των προβλημάτων αυτών πρότειναν μία μεθοδολογία η οποία βασίστηκε στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κέντρου κατεργασίας. Σε αριθμητική εφαρμογή της συγκεκριμένης έρευνας διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο σφάλμα μειώθηκε από 15.9μm σε λιγότερο από 1μm, επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Σε συνέχεια της έρευνάς τους μελετήθηκε η κινηματική της κατεργασίας και πως σχετίζονται οι παράμετροι της κατεργασίας, του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου με την

τελική ποιότητα των επιφανειών του αυλακιού [59]. Διαπιστώθηκε ότι η ποιότητα των επιφανειών βελτιώνεται όταν αυξάνεται η κλίση μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου αλλά και με τη χρήση στρατηγικών πολλών περασμάτων. Επιπλέον αποδείχθηκε ότι ο λόγος του αριθμού δοντιών κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των επιφανειών. Συγκεκριμένα, για άρτιο αριθμό δοντιών οδοντωτού τροχού, η βέλτιστη ποιότητα επιτυγχάνεται για κατεργασία με κοπτικό εργαλείο υποδιπλάσιου αριθμού δοντιών από τον οδοντωτό τροχό. Αντίστοιχα, για περιττό αριθμό δοντιών, η βέλτιστη ποιότητα εμφανίζεται με τη χρήση κοπτικού εργαλείου το οποίο έχει αριθμό δοντιών ίσο με τα 2/3 των δοντιών του κατεργαζόμενου τροχού.

Ο Guo και άλλοι [60] μελέτησαν τα σφάλματα που μεταφέρονται στη γεωμετρία των οδοντωτών τροχών οι οποίοι προκύπτουν από κατεργασία με συμβατικά κοπτικά εργαλεία. Με βάση μαθηματικούς υπολογισμούς βρέθηκε ότι η κατασκευαστική γωνία αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου έχει σημαντική επίδραση στο τελικό σφάλμα, αύξηση της οποίας έχει αρνητική επίδραση σε αυτό. Σχετικά με τα συμβατικά κωνικά κοπτικά εργαλεία διαπιστώθηκε ότι η επαναλείανσή τους οδηγεί σε αύξηση του σφάλματος στη γεωμετρία του τελικού οδοντωτού τροχού, ανάλογο του μήκους λείανσης του κοπτικού εργαλείου. Αποτελέσματα των υπολογισμών του σφάλματος της τελικής γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.31](#). Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα κυλινδρικά κοπτικά εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα και να επιτευχθεί κατεργασία υψηλής ακρίβειας. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται αναπροσαρμογή της θέσης του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη γωνία ελευθερίας.



Σχήμα 2.31: Υπολογισμοί σφάλματος παρειών του αυλακιού, συναρτήσεως της γωνίας αποβλίττου και του μήκους λείανσης του κοπτικού εργαλείου κατά Guo et al.

Αντικείμενο μελέτης των ίδιων ερευνητών αποτέλεσε η επίδραση των σφαλμάτων τοποθέτησης και εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου στη γεωμετρία του οδοντωτού τροχού [61]. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε το σφάλμα στο προφίλ του τελικού αυλακιού το οποίο προκαλείται από αποκλίσεις της ακτινικής τοποθέτησης και της γωνίας κλίσης Σ του κοπτικού εργαλείου. Διαπιστώθηκε ότι αποκλίσεις έως 0.3mm και 0.3° αντίστοιχα, έχουν αμελητέα επίδραση στο τελικό σφάλμα, το οποίο δεν υπερβαίνει τα 1.5μm. Αντιθέτως, το σφάλμα εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου αλλά και ο αριθμός των δοντιών του, βρέθηκε ότι έχουν σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της τελικής κατατομής της οδόντωσης. Σχετικά με τον αριθμό των δοντιών του κοπτικού εργαλείου, υπολογίστηκε ότι όσο αυτός προσεγγίζει τον λόγο z_2/n , όπου n θετικός ακέραιος, τόσο καλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στην κατεργασία.

Ο Uriu και άλλοι [62] διερεύνησαν την επίδραση της γωνίας κλίσης Σ του κοπτικού εργαλείου στις στιγμιαίες συνθήκες της κατεργασίας. Η έρευνα βασίστηκε στη μέθοδο υπολογισμού των στιγμιαίων συνθηκών της κατεργασίας που αναπτύχθηκε από τον Moriawaki και τους συνεργάτες του [63]. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι διακυμάνσεις της γωνίας αποβλίπτου, του βάθους κοπής και της ταχύτητας κοπής στην κατεργασία, για διαφορετικές τιμές της γωνίας ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου και κατά συνέπεια της γωνίας κλίσης του κοπτικού εργαλείου. Η μελέτη έγινε για κατεργασία εξωτερικού οδοντωτού τροχού με γωνία ελίκωσης 15° και εξετάστηκαν οι περιπτώσεις όπου η γωνία Σ ορίζεται ως 10° , 20° και 30° . Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι οι υψηλές τιμές της γωνίας Σ οδηγούσαν σε μικρότερα βάθη κοπής, σε χαμηλότερες τιμές της γωνίας αποβλίπτου αλλά και σε υψηλότερες τιμές της ταχύτητας κοπής. Επομένως, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τιμή των 20° για τη γωνία Σ , εξισορροπεί τις συνθήκες της κατεργασίας επεκτείνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, εκπονήθηκαν πειράματα της κατεργασίας με δύο διαφορετικά κοπτικά εργαλεία, για τα οποία η γωνία Σ ορίστηκε 20° και -20° . Σε μετρήσεις φθοράς που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι, όταν το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται υπό κλίση αντίθετης κατεύθυνσης της γωνίας ελίκωσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου, υπόκειται σε λιγότερες καταπονήσεις και παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες φθορές.

Ο Guo και άλλοι [64] διερεύνησαν την απόδοση των κοπτικών εργαλείων αποφλοίωσης με κύλιση. Οι υψηλές αρνητικές τιμές της γωνίας αποβλίπτου που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της κοπής, αλλά και οι χαμηλές τιμές της γωνίας ελευθερίας στην παρειά εξόδου του κοπτικού εργαλείου, αποτελούν σύμφωνα με τους ερευνητές τους βασικούς παράγοντες πρόκλησης φθοράς στα κοπτικά εργαλεία, ιδιαίτερα σε κατεργασίες ενός περάσματος. Για τον λόγο αυτόν πρότειναν τη χρήση στρατηγικών πολλαπλών περασμάτων, ώστε το κοπτικό εργαλείο να αφαιρεί λιγότερο υλικό σε κάθε πέρασμα και κατά συνέπεια να μην εμφανίζονται μεγάλες αρνητικές τιμές της γωνίας αποβλίπτου. Ακόμα και στις στρατηγικές πολλαπλών περασμάτων υπολογίστηκε ότι η παρειά εξόδου υπόκειται σε μεγαλύτερο φορτίο και μεγαλύτερη φθορά από την παρειά εισόδου. Προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή φθοράς μεταξύ των δύο παρειών, προτάθηκε μία παραλλαγή της στρατηγικής πολλαπλών περασμάτων, όπου σε κάθε διαδοχικό πέρασμα το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται επιπλέον γύρω από τον άξονά του, μεταφέροντας έτσι μέρος της κοπής στην παρειά εισόδου και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου.

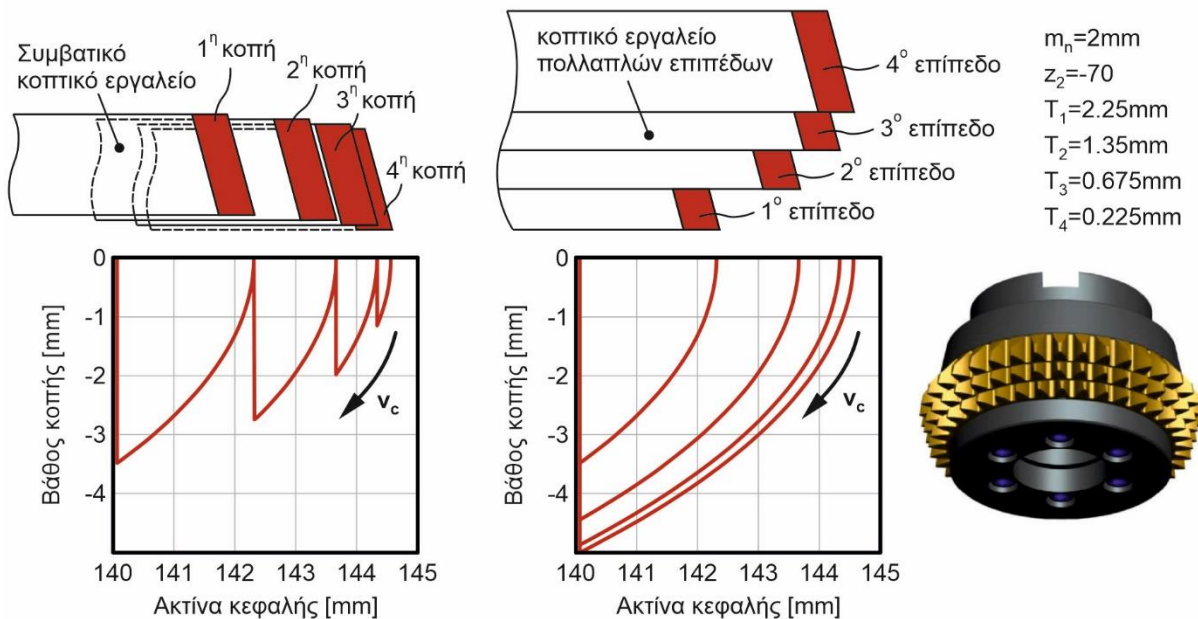
Οι Shih και Li [65] ανέπτυξαν μία αριθμητική μέθοδο για την εξάλειψη των σφαλμάτων που οφείλονται στη γεωμετρία των παρειών των δοντιών κωνικών κοπτικών εργαλείων. Στη μέθοδο που αναπτύχθηκε, οι παρειές του κωνικού κοπτικού εργαλείου προκύπτουν από έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τις κατατομές του κοπτικού εργαλείου από ένα σύνολο οδοντωτών τροχών σταδιακά μειωμένων μετατοπίσεων κατατομής. Το σύνολο των κατατομών του κοπτικού εργαλείου που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό της συνολικής παρειάς του κωνικού κοπτικού εργαλείου με τις προβλεπόμενες γωνίες ελευθερίας. Σε αριθμητικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ορθότητας της προτεινόμενης μεθόδου, βρέθηκε ότι το μέσο σφάλμα στις παρειές του τελικού οδοντωτού τροχού μειώνεται από $7.3\mu\text{m}$ στα $0\mu\text{m}$, σε σχέση με τα συμβατικά κωνικά κοπτικά εργαλεία. Σε περαιτέρω ανάλυση μετά από επαναλείανση του κοπτικού εργαλείου το μέσο σφάλμα δεν ξεπερνούσε τα $0.3\mu\text{m}$. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάστηκε στη συνέχεια και στα κυλινδρικά κοπτικά εργαλεία, με την ανάπτυξη μίας επιπλέον αριθμητικής μεθόδου κατασκευής τους [66]. Η μέθοδος βασίστηκε στην αξονική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου για την αποφυγή των συγκρούσεων και τη δημιουργία γεωμετρίας χωρίς σφάλματα. Η επαλήθευση της μεθόδου

έγινε μέσω προσομοίωσης στο λογισμικό Vericut, όπου διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο σφάλμα στις παρειές του κατεργαζόμενου τεμαχίου δεν ξεπερνούσε τα 30μm.

Ο Balabanon και άλλοι [67] διερεύνησαν της επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της κοπτικής ακμής στη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Μελετήθηκαν 4 διαφορετικές τιμές της ακτίνας καμπυλότητας στο εύρος 10-25μm. Αρχικά έγινε μοντελοποίηση της φθοράς μέσω του λογισμικού ANSYS, χρησιμοποιώντας κοπτικό εργαλείο με επικάλυψη AlTiCN και κατεργαζόμενο τεμάχιο χάλυβα 41CrAlMo7 με σκληρότητα 241-287HB. Τα αποτελέσματα, τα οποία επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά, έδειξαν ότι οι βέλτιστες τιμές της ακτίνας καμπυλότητας ήταν στο εύρος των 15-18μm, με το κοπτικό εργαλείο να χρησιμοποιείται επιτυχώς για την κατεργασία 60 τεμαχίων.

Ο Astashchenko και Gilanov [68] προσπάθησαν να καθορίσουν τον βέλτιστο συνδυασμό υλικού και επικάλυψης του κοπτικού εργαλείου, για την κατεργασία ενός εσωτερικού οδοντωτού τροχού από χάλυβα 34CrAlMo5 και σκληρότητας 241-287HB. Η μελέτη έγινε μέσω μίας σειράς πειραμάτων για τα οποία χρησιμοποιήθηκε το κέντρο κατεργασίας αποφλοιώσης με κύλιση 300 PS της Gleason. Για κάθε συνδυασμό υλικού και επικάλυψης του κοπτικού εργαλείου πραγματοποιήθηκαν 10 πειράματα. Αποδείχθηκε ότι τα κοπτικά εργαλεία υλικού ASP2052 είχαν τη μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τα κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα P6M5K5.

Ο Arndt και άλλοι [69] ασχολήθηκαν με τη σύγκριση των κατεργασιών ξηράς κοπής και με τη χρήση υγρών κοπής και πως αυτές επηρεάζουν τον χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου και την ποιότητα επιφάνειας των παρειών του τελικού οδοντωτού τροχού. Στα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκε κοπτικό εργαλείο με ένα μόνο κοπτικό δόντι καρβιδίου K30 και επίστρωσης AlCrN και κατεργαζόμενο τεμάχιο από χάλυβα 31CrMoV9. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές στρατηγικές κοπής, όπου διαπιστώθηκε ότι η ξηρά κοπή μπορεί να αυξήσει τον χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου έως και 3 φορές, γεγονός το οποίο εξαρτάται από την ταχύτητα κοπής αλλά και από τη σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 2.32: Παράδειγμα κατεργασίας τεσσάρων περασμάτων με συμβατικό κοπτικό εργαλείο και κοπτικό εργαλείο πολλαπλών επιπέδων δοντιών κατά Guo et al.

Ο Guo και άλλοι [70] πρότειναν τη χρήση ενός κοπτικού εργαλείου αποφλοίωσης με κύλιση, το οποίο αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα δοντιών, σε αντίθεση με τα κοινά κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην πλάνιση και την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων. Το κοπτικό εργαλείο που προτάθηκε έχει παρόμοια δομή με το αντίστοιχο της Mitsubishi MHI [71], με τη διαφορά ότι αποτελείται από αποσπώμενα επίπεδα κοπτικών δοντιών, διευκολύνοντας έτσι την επαναλειάνσή τους. Το πλεονέκτημα του νέου κοπτικού εργαλείου έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται ένα μόνο πέρασμα για την κατεργασία ενός αυλακιού, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της κατεργασίας, σε αντίθεση με τα πολλαπλά διαδοχικά περάσματα που πραγματοποιούνται με τα συμβατικά κοπτικά εργαλεία. Συγκεκριμένα, τα πολλαπλά επίπεδα δοντιών επιτρέπουν την ολοκλήρωση της κατεργασίας σε ένα μόνο πέρασμα, αντιστοιχώντας κάθε επίπεδο σε κατεργασία συγκεκριμένου περάσματος. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.32 σε σχέση με τη συμβατική κατεργασία κοπής διαδοχικών περασμάτων.

Οι ερευνητές διερεύνησαν τις συνθήκες κοπής σε σύγκριση με τα συμβατικά κοπτικά εργαλεία, όπου διαπιστώθηκε ότι τα προτεινόμενα κοπτικά εργαλεία υπόκεινται σε δυσμενέστερες συνθήκες κατεργασίας, λόγω των υψηλότερων αρνητικών γωνιών αποβλίπτου και του πάχους αποβλίπτου που εμφανίζονται, παράμετροι που οδηγούν σε πρόωρη φθορά των δοντιών. Ως διόρθωση του εν λόγω φαινομένου προτάθηκε η μείωση της πρόωσης της κατεργασίας, η αύξηση της γωνίας κλίσης Σ του κοπτικού εργαλείου και η χρήση κοπτικού εργαλείου με μεγαλύτερο αριθμό δοντιών.

Η μέθοδος σχεδιασμού του προτεινόμενου κοπτικού εργαλείου πολλαπλών επιπέδων αναλύθηκε διεξοδικά σε συνέχεια της έρευνας τους [72]. Επισημάνθηκε ότι για την αποφυγή των συγκρούσεων το κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει βαρελοειδή γεωμετρία [73], ενώ η παρουσία επιπέδων έχει μεγαλύτερη ευελιξία, ιδιαίτερα στην κατεργασία αποπεράτωσης που πραγματοποιείται από το τελευταίο επίπεδο δοντιών. Το κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση πειραμάτων εξωτερικών και εσωτερικών οδοντωτών τροχών, με σκοπό την επαλήθευση της αποδοτικότητας και της ακρίβειας που προσφέρει. Η κατεργασία εξωτερικής οδόντωσης ολοκληρώθηκε σε 2 περάσματα και η κατεργασία εσωτερικής οδόντωσης σε 1 μόνο πέρασμα, σε αντίθεση με τα 6 και 3 περάσματα που απαιτήθηκαν στην αντίστοιχη κατεργασία με συμβατικό κοπτικό εργαλείο. Έτσι η αποδοτικότητα αυξήθηκε κατά 33%. Τέλος, μετρήθηκε η ποιότητα των παρειών του τελικού οδοντωτού τροχού μέσω του μετρητικού κέντρου οδοντώσεων Klingelnberg P26. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η ποιότητα των τελικών οδοντωτών τροχών ήταν αντίστοιχη της κατεργασίας με συμβατικό κοπτικό εργαλείο. Συγκεκριμένα και μόνο για την εξωτερική οδόντωση διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο σφάλμα της αριστερής παρειάς ήταν 19.2 μ m, το οποίο αποδόθηκε σε πιθανό σφάλμα συναρμολόγησης του κοπτικού εργαλείου πολλαπλών επιπέδων.

2.6 Συνεισφορά της διατριβής

Με βάση τις ερευνητικές προσεγγίσεις που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ενώ έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις κατεργασίες οδοντώσεων της πλάνισης και της αποφλοίωσης με κύλιση, δεν υπάρχει κάποιο ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης των εν λόγω κατεργασιών, το οποίο να αξιοποιεί τις υπολογιστικές δυνατότητες ενός εμπορικού πακέτου CAD. Αντίστοιχα μοντέλα που αξιοποιούν ένα σύστημα CAD έχουν παρουσιαστεί για την κατεργασία της διάτρησης και του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων [74–78]. Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής έρχεται να καλύψει αυτό ακριβώς το ερευνητικό κενό, με τη χρήση ενός συστήματος CAD για να την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου λογισμικού προσομοίωσης των δύο κατεργασιών κοπής οδοντώσεων που

μελετώνται. Η υψηλή γεωμετρική ακρίβεια που προσφέρεται σε ένα τέτοιο περιβάλλον, αποτελεί επιπλέον καινοτομία της παρούσας εργασίας, καθώς το λογισμικό που αναπτύσσεται είναι σε θέση να προσομοιώσει την τρισδιάστατη κινηματική των κατεργασιών με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, εξαλείφοντας τυχόν αποκλίσεις και σφάλματα που προκύπτουν λόγω διακριτοποιήσεων της κατατομής του κοπτικού εργαλείου, της τροχιάς που αυτή ακολουθεί ή της γεωμετρίας του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού.

Στα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων στερεών αποβλίπτων για τις δύο κατεργασίες καθώς και η τρισδιάστατη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου στα ενδιάμεσα στάδια των κατεργασιών. Με βάση την τρισδιάστατη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων υπολογίζονται στη συνέχεια σημαντικές πληροφορίες, όπως το πάχος και η επιφάνεια του αποβλίπτου σε επιμέρους θέσεις της κοπτικής κατατομής, αλλά κυρίως οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται σε τέσσερα διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Ο υπολογισμός των δυνάμεων βασίζεται στο μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων των Kienzle και Victor, σύμφωνα με το πάχος και το ύψος των επιμέρους διατομών του απαραμόρφωτου αποβλίπτου, δεδομένα που προκύπτουν μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας στο σύστημα CAD. Ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται για ένα μόνο κοπτικό δόντι αλλά και έναν ολόκληρο οδοντωτό τροχό, λαμβάνοντας υπόψη την εμπλοκή των δοντιών μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσα από ένα ολοκληρωμένο και φιλικό περιβάλλον γραφικής διεπαφής χρήστη, το οποίο προσφέρει δυνατότητες εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων και αποτελεσμάτων και δεν απαιτεί καμία αλληλεπίδραση του χρήστη με το περιβάλλον του συστήματος CAD που χρησιμοποιήθηκε.

Ουσιαστικής σημασίας είναι η επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε, η οποία πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια: το **πρώτο στάδιο** περιλαμβάνει τη σύγκριση της γεωμετρίας των παρειών του αυλακίου του τελικού οδοντωτού τροχού που προκύπτει από το μοντέλο προσομοίωσης, με θεωρητικές σχέσεις που περιγράφουν την αναμενόμενη γεωμετρία τους. Το **δεύτερο στάδιο** περιλαμβάνει τη σύγκριση της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίπτων με την αντίστοιχη γεωμετρία, όπως αυτή έχει ήδη υπολογιστεί από υπάρχοντα μοντέλα. Το **τρίτο στάδιο** για την επαλήθευση του μοντέλου αφορά τον έλεγχο της ορθότητας των υπολογισμών των δυνάμεων κοπής, με αντίστοιχα πειραματικά μετρημένες δυνάμεις, όπως ανακτώνται από τη βιβλιογραφία.

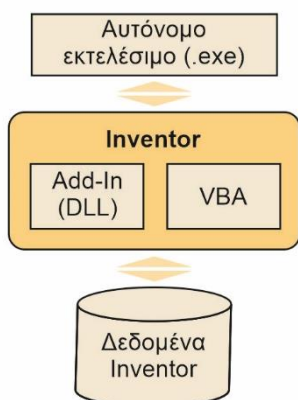
Ο απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων των κατεργασιών στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Έτσι, το λογισμικό που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση πλήθους προσομοιώσεων και ανάλυσης της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, ως προς την επίδραση αυτής στις δυνάμεις κοπής που υπολογίστηκαν.



Μοντέλο προσομοίωσης

3.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου

Για την προσομοίωση των δύο κατεργασιών οδοντώσεων που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκε ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD και συγκεκριμένα το Autodesk Inventor 2020. Στο περιβάλλον του συγκεκριμένου λογισμικού, όπως και στα περισσότερα συστήματα CAD, προσφέρεται ένα σύνολο από λειτουργίες που στοχεύουν στη δημιουργία τρισδιάστατων στερεών μοντέλων. Οι λειτουργίες αυτές, σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια που προσφέρεται από τα λογισμικά CAD, αποτελούν σημαντικό βοηθητικό εργαλείο στη μοντελοποίηση των κατεργασιών οδοντώσεων. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι λειτουργίες της λογικής αφαίρεσης και τομής (Boolean operations), αλλά και η δημιουργία τρισδιάστατων επιφανειών από ένα σύνολο δισδιάστατων προφίλ σε διαφορετικά επίπεδα στον χώρο (Loft). Στο λογισμικό Autodesk Inventor παρέχεται μία ολοκληρωμένη διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (API), η οποία επιτρέπει τον χειρισμό του λογισμικού μέσω ενός προγράμματος. Με τον τρόπο αυτόν μπορούν να δημιουργηθούν εξατομικευμένα προγράμματα, τα οποία εκτελούν μέσω κώδικα ένα σύνολο από τις λειτουργίες του λογισμικού CAD/CAM και παράγουν με αυτοματοποιημένο τρόπο αποτελέσματα, τα οποία συχνά θα ήταν αδύνατο να επιτευχθούν με τον παραδοσιακό διαδραστικό τρόπο χρήσης του λογισμικού. Η συγκεκριμένη διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών, αποτέλεσε το βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη του λογισμικού προσομοίωσης της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3.1: Μέθοδοι προγραμματισμού μέσω API

Ο προγραμματισμός στο περιβάλλον του Inventor μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, οι οποίοι παρουσιάζονται διαγραμματικά στο [σχήμα 3.1](#). Ο πιο απλός τρόπος χειρισμού του λογισμικού μέσω προγραμματισμού είναι το περιβάλλον VBA (Visual Basic for Applications), το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο στο λογισμικό. Το περιβάλλον αυτό χρησιμοποιείται συνήθως για τη συγγραφή προγραμμάτων (macros) που αυτοματοποιούν απλές διαδικασίες. Στα πλεονεκτήματα χρήσης του συγκαταλέγονται η ταυτόχρονη εκτέλεσή του με τις διεργασίες του Inventor προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη απόδοση, το φιλικό περιβάλλον χρήσης του, ενώ δεν απαιτείται η επιπλέον αγορά λογισμικού. Εναλλακτική επιλογή του περιβάλλοντος VBA είναι η δημιουργία ενός προσθέτου (Add-In) και εισαγωγή του στο περιβάλλον του Inventor. Το πρόσθετο είναι ένα είδος προγράμματος, το οποίο μπορεί να δημιουργηθεί σε διάφορες υποστηριζόμενες γλώσσες προγραμματισμού και η εκτέ-

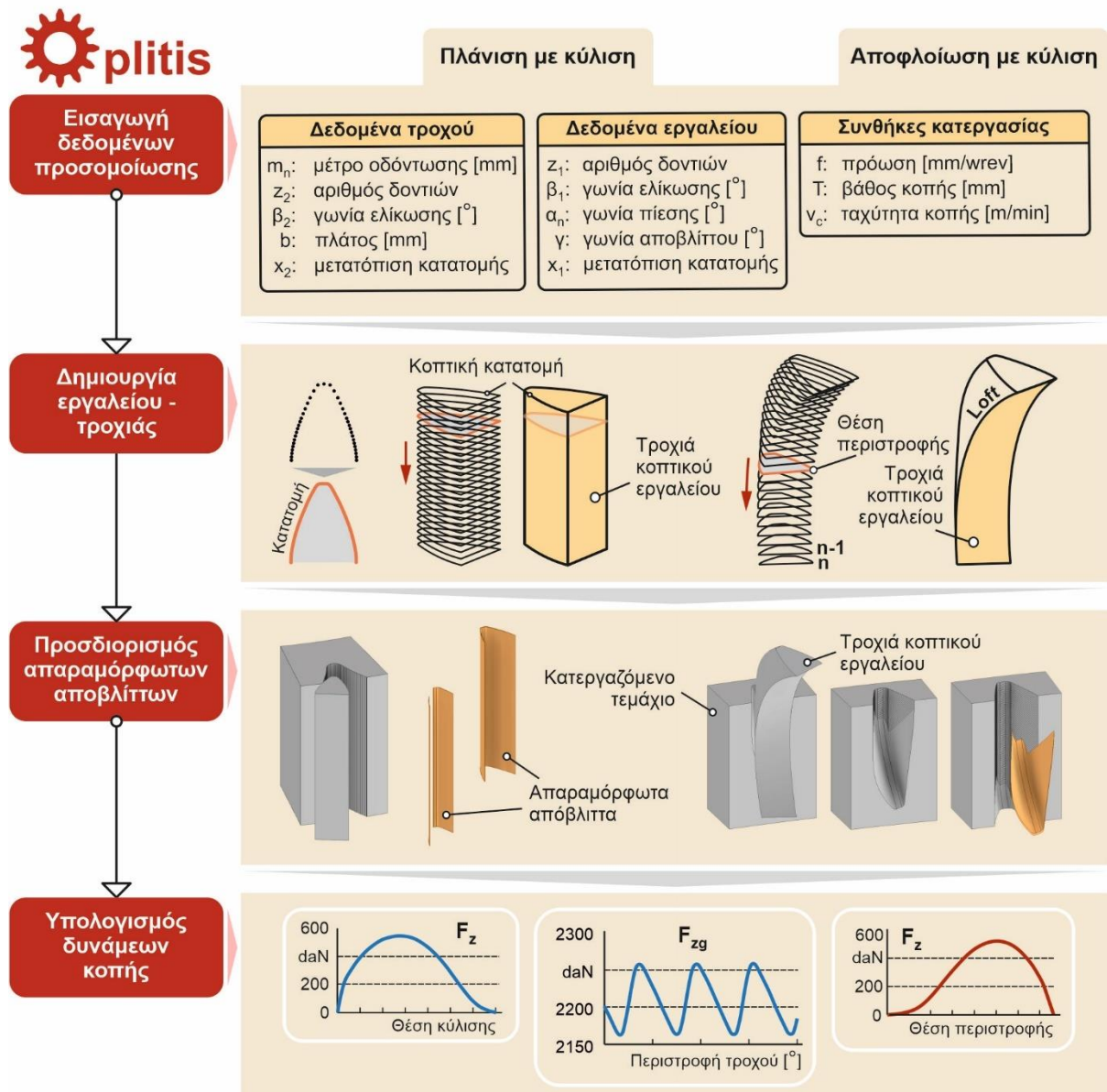
λεσή του γίνεται αυτόματα κατά την εκκίνηση του Inventor. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός αυτόνομου εκτελέσιμου (αρχείο .exe), το οποίο έχει συνήθως μία ξεχωριστή γραφική διεπαφή και ενδείκνυται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η χρήση λειτουργιών του Inventor, χωρίς την αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτό. Η χρήση ενός αυτόνομου εκτελέσιμου επιφέρει ένα υπολογιστικό κόστος καθώς εκτελείται σε ξεχωριστή διεργασία από το Inventor.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η δημιουργία ενός προσθέτου για το περιβάλλον του Inventor. Η ανάπτυξη του κώδικα έγινε στο περιβάλλον ανάπτυξης Microsoft Visual Studio Community 2019 σε γλώσσα Visual Basic .NET. Το συγκεκριμένο περιβάλλον επιλέχθηκε επειδή διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη και οργάνωση κώδικα μεγάλων εφαρμογών, την εύκολη αποσφαλμάτωσή του και τη δυνατότητα δημιουργίας γραφικών διεπαφών χρήστη, μέσα από

ένα σύνολο εργαλείων που προσφέρονται. Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε η δημιουργία μίας αυτόνομης εφαρμογής είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους της προσομοίωσης των κατεργασιών κοπής οδοντώσεων, γεγονός που θα αύξανε σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

3.2 Δομή του μοντέλου προσομοίωσης

Προκειμένου να επιτευχθεί η ορθή προσομοίωση των δύο κατεργασιών, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο βοηθητικών λειτουργιών που διατίθεται στο περιβάλλον του Inventor, για τη μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου, του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης σύμφωνα με την κινηματική της κάθε κατεργασίας. Η προσομοίωση κάθε κατεργασίας ακολουθεί εν γένει την ίδια δομή, η οποία παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Δομή του μοντέλου προσομοίωσης

Η προσομοίωση χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους στάδια, όπου η επιτυχής εκτέλεση του ενός εξαρτάται άμεσα από την ορθή εκτέλεση του προηγούμενου. Για τον λόγο αυτόν είναι κρίσιμη η επαλήθευση κάθε βήματος, είτε μέσω αριθμητικής επιβεβαίωσης, είτε μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα που έχουν προκύψει από άλλα προσομοιωτικά μοντέλα. Σε κάθε στάδιο εφαρμόζονται τροποποιήσεις σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε κατεργασίας. Συνοπτικά αναφέρονται τα εξής στάδια:

- Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης: Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτέλεση κάθε προσομοίωσης αποτελεί η εισαγωγή των δεδομένων, τα οποία δίνονται από τον χρήστη. Τα δεδομένα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τεμαχίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου και τις συνθήκες κατεργασίας.
- Δημιουργία κοπτικού εργαλείου - τροχιάς: Μετά το πέρας εισαγωγής των δεδομένων ακολουθεί η δημιουργία της κατατομής του κοπτικού εργαλείου, η οποία παράγεται από ένα σύνολο σημείων στο επίπεδο. Με βάση την κινηματική της κάθε κατεργασίας δημιουργείται η τρισδιάστατη τροχιά κάθε κοπτικού δοντιού. Στην τροχιά συμπεριλαμβάνονται όλες οι κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην κατεργασία, δηλαδή η περιστροφή του τροχού, η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου και η πρόωση της κατεργασίας.
- Προσδιορισμός απαραμόρφωτων αποβλίπτων: Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίπτων, για τον οποίο προηγείται η δημιουργία της αρχικής μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τα απόβλιττα προσδιορίζονται από την κινηματική της κάθε κατεργασίας, σύμφωνα με την οποία η τροχιά του κοπτικού εργαλείου τοποθετείται σε κατάλληλες θέσεις ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής: Στο τελευταίο βήμα γίνεται ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής σύμφωνα με τη μέθοδο υπολογισμού των Kienzle και Victor. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων χρησιμοποιείται η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων.

3.3 Δημιουργία κατατομής των κοπτικών εργαλείων

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθόδου μοντελοποίησης της κοπτικής κατατομής, η οποία αποτελεί και το πρώτο βήμα της προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2, οι παρειές της κοπτικής κατατομής αποτελούν τμήματα της εξελιγμένης καμπύλης του κύκλου. Οι παρειές αυτές μαζί με την κεφαλή της κοπτικής κατατομής, αποτελούν τα μόνα τμήματα του κοπτικού εργαλείου που εμπλέκονται στη διαδικασία κοπής. Επομένως τα τμήματα αυτά είναι τα μόνα που απαιτείται να μοντελοποιηθούν όσον αφορά τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπτικής κατατομής βασίζονται στο πρότυπο DIN3972 II [79], όπου μεταξύ άλλων προσδιορίζονται το ύψος κεφαλής, το ύψος ποδός και το πάχος στον αρχικό κύκλο της κοπτικής κατατομής. Στο [σχήμα 3.3](#) παρουσιάζεται η γεωμετρική διαδικασία υπολογισμού της κοπτικής κατατομής, σύμφωνα με τις παραμετρικές εξισώσεις (3.1) και (3.2) από τις οποίες προκύπτουν οι θέσεις των σημείων της εξελιγμένης καμπύλης του κύκλου:

$$x = r_b \cdot (\sin\psi - \psi \cdot \cos\psi) \quad (3.1)$$

$$y = r_b \cdot (\cos\psi + \psi \cdot \sin\psi) \quad (3.2)$$

υπολογισμό της κατατομής. Σημειώνεται ότι η κοπτική κατατομή δεν αποτελεί μία απλή πολυγωνική γραμμή, αλλά μία καμπύλη B-Spline η οποία σχεδιάζεται με βάση τα σημεία που δίνονται στο σύστημα CAD. Η διαδικασία δημιουργίας της κοπτικής κατατομής, όπως περιγράφηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ευθείας οδόντωσης και μηδενικής γωνίας αποβλίπτου γ . Στις περιπτώσεις κατεργασίας ελικοειδών οδοντώσεων θα πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα και η γεωμετρία της κοπτικής κατατομής. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου, χρησιμοποιείται ο φανταστικός αριθμός δοντιών z_v [1], ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$z_v = \frac{z_1}{\cos^3 \beta_1} \quad (3.4)$$

όπου z_1 ο αριθμός των δοντιών του ελικοειδούς κοπτικού εργαλείου και β_1 η γωνία ελίκωσης του κοπτικού εργαλείου. Η τιμή που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση αντιστοιχεί στον αριθμό των δοντιών ενός ισοδύναμου κοπτικού εργαλείου ευθείας οδόντωσης. Η κατατομή του ισοδύναμου αυτού κοπτικού εργαλείου θα έχει την ίδια γεωμετρία με την κατατομή του ελικοειδούς κοπτικού εργαλείου στο κάθετο επίπεδο στις παρειές των δοντιών του.

Στις περιπτώσεις όπου η γωνία αποβλίπτου είναι διαφορετική του μηδενός, διαφοροποιείται και πάλι ο υπολογισμός της κοπτικής κατατομής. Συγκεκριμένα παράγεται αρχικά η κοπτική κατατομή σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Η κατατομή αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη δημιουργία ενός στερεού μοντέλου. Τέλος πραγματοποιείται τομή στο στερεό υπό γωνία ίση με τη γωνία αποβλίπτου. Η γεωμετρία που προκύπτει από την τομή του στερεού με το επίπεδο αποτελεί την τελική κατατομή του κοπτικού εργαλείου. Η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Προσδιορισμός κοπτικής κατατομής με βάση τη γωνία αποβλίπτου

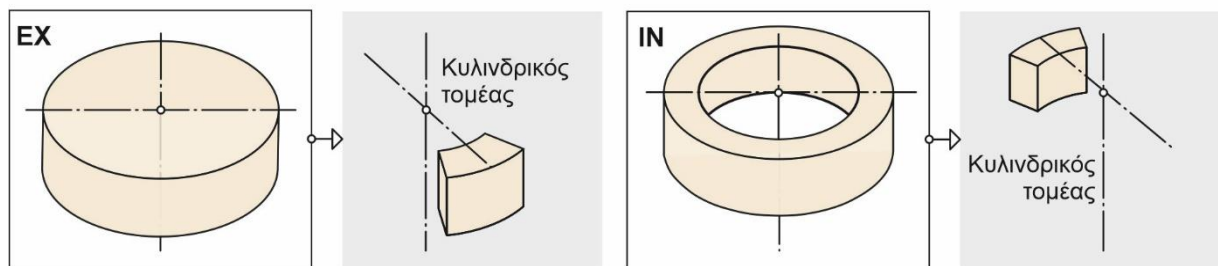
Ο υπολογισμός της κοπτικής κατατομής σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία αναφέρεται σε κοπτικά εργαλεία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Παραδοσιακά τα κοπτικά αυτά εργαλεία χρησιμοποιούνται και για την κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων [29]. Επομένως η μεθοδολογία κατασκευής της κοπτικής κατατομής είναι ίδια και για τις δύο κατεργασίες του παρόντος μοντέλου. Η πλήρης αυτοματοποίηση κατασκευής της κοπτικής ακμής δίνει περιορισμένη ευελιξία στον χρήστη για περαιτέρω τροποποίησή της. Για τον λόγο αυτόν, το μοντέλο υποστηρίζει τη δυνατότητα εισαγωγής μίας προσαρμοσμένης κοπτικής ακμής, η οποία δίνεται μέσω αρχείου κειμένου που περιέχει τις συντεταγμένες των σημείων της.

3.4 Μοντελοποίηση της κινηματικής των κατεργασιών

Για την προσομοίωση της κινηματικής της κάθε κατεργασίας, απαιτείται ένα σύνολο από δεδομένα τα οποία αποτελούν και την είσοδο των αλγορίθμων μοντελοποίησης. Τα δεδομένα του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι κοινά και για τις δύο κατεργασίες. Αυτά είναι το μέτρο

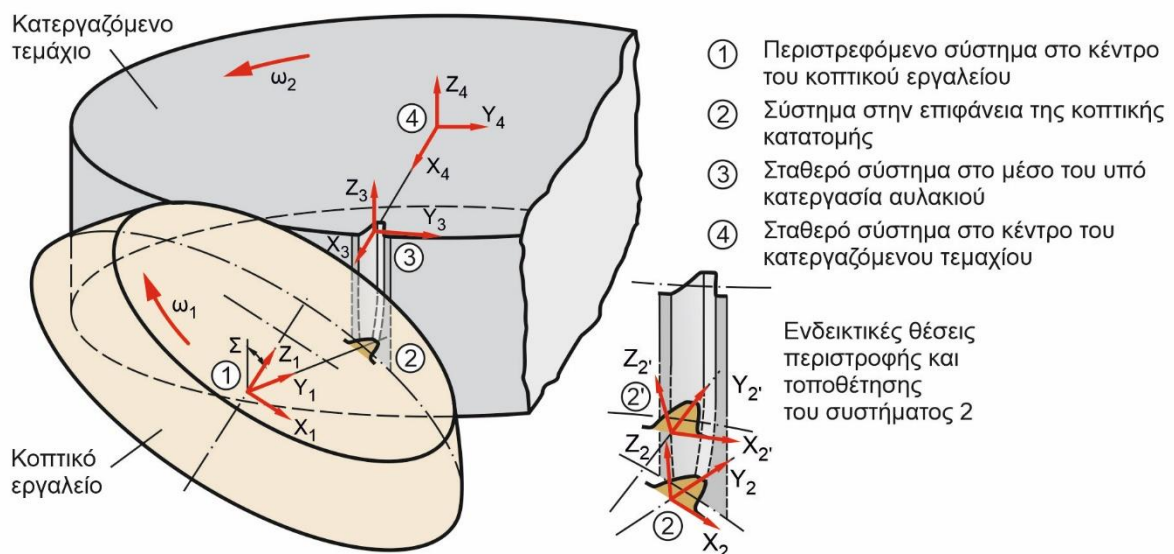
οδόντωσης (m_n), ο αριθμός των δοντιών (z_2), η γωνία ελίκωσης (β_2), η γωνία πίεσης (α_n), το πλάτος του οδοντωτού τροχού (b) και η μετατόπιση κατατομής (x_2). Δεδομένα του κοπτικού εργαλείου αποτελούν ο αριθμός των δοντιών (z_1), η γωνία αποβλήτου (γ) και η μετατόπιση κατατομής (x_1), ενώ αποκλειστικά για την κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων προσδιορίζεται και η γωνία ελίκωσης (β_1). Τέλος το βάθος κοπής (T) αποτελεί κοινή παράμετρο σχετική με τις συνθήκες κοπής και για τις δύο κατεργασίες. Συγκεκριμένα για την πλάνιση με κύλιση προσδιορίζεται η πρόωση κύλισης (f_w), ενώ για την αποφλοίωση με κύλιση η αξονική πρόωση (f_a).

Σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει τη μορφή ενός κυλίνδρου, ο οποίος έπειτα από διαδοχικά περάσματα αποκτά τη μορφή του επιθυμητού οδοντωτού τροχού. Λόγω της συμμετρίας των οδοντωτών τροχών και κατά συνέπεια της όμοιας γεωμετρίας σε κάθε αυλάκι, η προσομοίωση πραγματοποιείται για ένα μόνο αυλάκι, το οποίο αρκεί για να προσδιοριστούν όλες οι πληροφορίες που υπολογίζονται από το μοντέλο. Έτσι, το κατεργαζόμενο τεμάχιο δημιουργείται αρχικά ως ένας κυλινδρικός τομέας, εξοικονομώντας ταυτόχρονα υπολογιστικούς πόρους σε σχέση με τη δημιουργία ενός ολόκληρου κυλίνδρου. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται παραδείγματα της αρχικής μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου για περιπτώσεις κατεργασίας εξωτερικού και εσωτερικού οδοντωτού τροχού.



Σχήμα 3.6: Δημιουργία αρχικής μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου ως κυλινδρικό τομέα

Για τη μοντελοποίηση των κατεργασιών χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα συστήματα συντεταγμένων. Τα συστήματα αυτά είτε παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, είτε κινούνται σύμφωνα με την κινηματική της κάθε κατεργασίας.



Σχήμα 3.7: Συστήματα συντεταγμένων του μοντέλου προσομοίωσης

Το πρώτο σύστημα συντεταγμένων βρίσκεται στο κέντρο του κοπτικού εργαλείου. Επομένως ο άξονας Z_1 ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, ο άξονας Y_1 δείχνει προς το μέσον της κοπτικής κατατομής που εξετάζεται, ενώ ο άξονας X_1 είναι κάθετος στους δύο προηγούμενους. Το δεύτερο σύστημα συντεταγμένων, του οποίου οι άξονες έχουν τις ίδιες κατευθύνσεις με το σύστημα 1, βρίσκεται στην επιφάνεια της κοπτικής κατατομής. Το σύστημα 3 βρίσκεται στο μέσον του κατεργαζόμενου αυλακιού και παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο άξονας Z_3 είναι παράλληλος στη διεύθυνση του αυλακιού, ο άξονας X_3 δείχνει προς το μέσον του αυλακιού που εξετάζεται, ενώ ο άξονας Y_3 είναι κάθετος στους δύο προηγούμενους. Τέλος το σταθερό σύστημα 4 βρίσκεται στο κέντρο του κατεργαζόμενου τροχού με τον άξονα Z_4 να ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του κατεργαζόμενου τροχού και τον άξονα X_4 να έχει την ίδια κατεύθυνση με τον άξονα X_3 . Τα συστήματα συντεταγμένων που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται και για τις δύο κατεργασίες στο σχήμα 3.7.

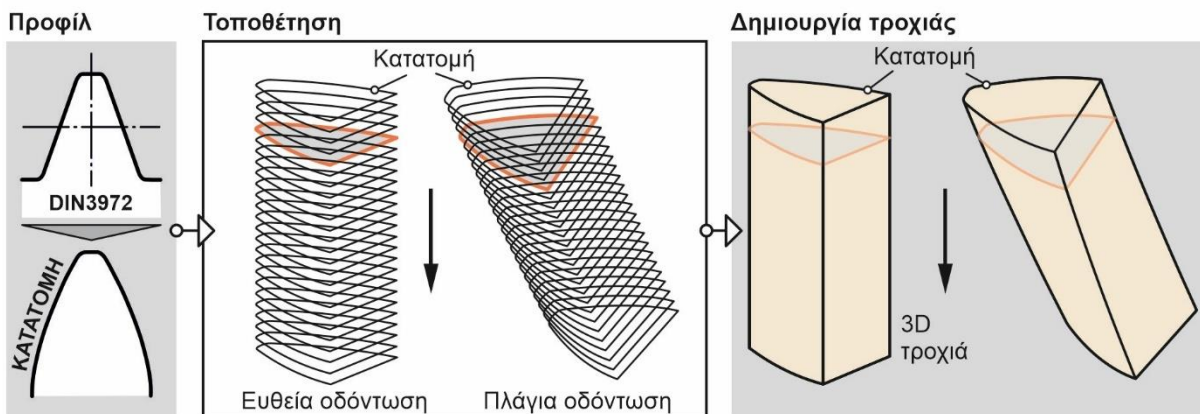
Πριν τη μοντελοποίηση της κινηματικής κάθε κατεργασίας, τα συστήματα 2 και 4 δημιουργούνται έτσι ώστε να εφάπτονται οι κύκλοι κεφαλής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Επομένως, η απόσταση α μεταξύ των κέντρων του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{m_n \cdot z_2}{2 \cdot \cos \beta_2} + m_n + x_2 \cdot m_n + \frac{m_n \cdot z_1}{2 \cdot \cos \beta_1} + 1.25 \cdot m_n + x_1 \cdot m_n \quad (3.5)$$

Στις επόμενες ενότητες θα γίνει αναλυτική περιγραφή της μοντελοποίησης της κινηματικής κάθε κατεργασίας στο σύστημα CAD.

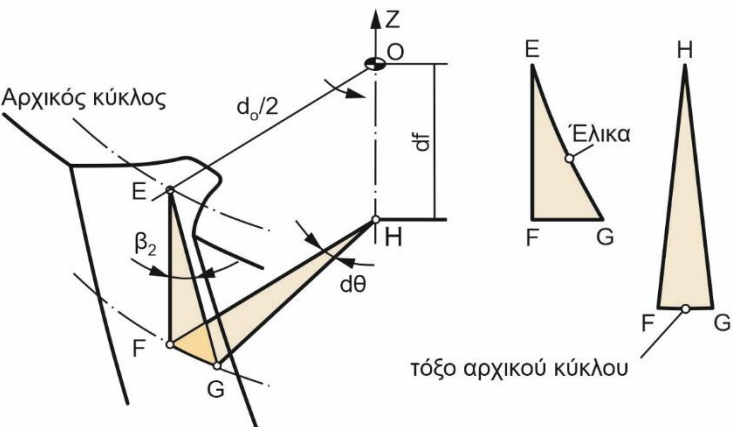
3.4.1 Πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας της κοπτικής κατατομής και της αρχικής μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου ακολουθεί η δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου. Για την απλοποίηση της μοντελοποίησης της κινηματικής αλλά και την ταχύτερη εκτέλεση της προσομοίωσης όλες οι κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην κατεργασία μεταφέρονται στο κοπτικό εργαλείο. Επομένως, το κατεργαζόμενο τεμάχιο παραμένει ακίνητο σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η τροχιά του κοπτικού εργαλείου μοντελοποιείται στο περιβάλλον CAD ως ένα τρισδιάστατο στερεό, στο οποίο περιέχονται όλες οι εμπλεκόμενες κινήσεις της κατεργασίας. Η τροχιά αυτή αντιστοιχεί σε έναν εμβολισμό που πραγματοποιεί το κοπτικό εργαλείο και δημιουργείται από την τοποθέτηση αντιγράφων της κοπτικής κατατομής σε διαδοχικές θέσεις.



Σχήμα 3.8: Δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου για ευθείες και πλάγιες οδοντώσεις στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Στη συνέχεια, το σύνολο των κατατομών αυτών ενώνονται για τη δημιουργία ενός στερεού, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.8](#). Στις περιπτώσεις ευθείας οδόντωσης η τροχιά του κοπτικού εργαλείου αντιστοιχεί σε μία κατακόρυφη καθοδική κίνηση σε όλο το μήκος του κατεργαζόμενου τεμαχίου, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην πολύ υψηλότερη ταχύτητα ενός εμβολισμού σε σχέση με την περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι, τα αντίγραφα της κοπτικής κατατομής τοποθετούνται σε παράλληλα μεταξύ τους επίπεδα σε όλο το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο αριθμός των επιπέδων n_i αποτελεί παράμετρο της κατεργασίας και δίνεται ως είσοδος πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Στις περιπτώσεις κατεργασίας πλάγιων οδοντώσεων η τροχιά που διανύει η κοπτική κατατομή θα πρέπει να ακολουθήσει τη διεύθυνση της έλικας του αυλακιού, σύμφωνα με τη γωνία ελίκωσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι, κατά τη δημιουργία της τροχιάς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας επιπλέον συντελεστής διόρθωσης $d\theta$, ο οποίος εισάγει μία επιπρόσθετη περιστροφή ως προς το κέντρο του κοπτικού εργαλείου σε κάθε αντίγραφο κοπτικής κατατομής που τοποθετείται. Ο συντελεστής διόρθωσης υπολογίζεται για δεδομένη μετατόπιση df κατά μήκος του άξονα περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 3.6. Η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.9](#).

$$d\theta = \frac{2 \cdot df \cdot \sin\beta_2}{m_n \cdot z_1} \quad (3.6)$$


Από το τρίγωνο EFG:
 $\widehat{FG} = df \cdot \tan\beta_2 \quad (1)$
 Από το τρίγωνο HFG:
 $\widehat{FG} = d\theta \cdot r_o \quad (2)$
 $(1), (2) \Rightarrow d\theta = \frac{df \cdot \tan\beta_2}{r_o}$
 $\Rightarrow d\theta = \frac{2df \cdot \sin\beta_2}{m_n \cdot z_1}$

Σχήμα 3.9: Υπολογισμός του συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης

Ο αριθμός των επιπέδων n_i που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της τροχιάς έχει άμεσο αντίκτυπο στην ακρίβεια του τρισδιάστατου στερεού της και κατά συνέπεια στο τελικό αυλάκι που δημιουργείται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια επηρεάζεται μόνο στις περιπτώσεις κατεργασίας πλάγιων οδοντώσεων, όπου απαιτείται η επιπλέον περιστροφή των κατατομών που δημιουργούν την τροχιά. Σε ευθείες οδοντώσεις η ακρίβεια δεν εξαρτάται από τον αριθμό των επιπέδων εφόσον η τροχιά ακολουθεί ευθεία καθοδική πορεία.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2, στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων κάθε κοπτικό δόντι είναι υπεύθυνο για την κατεργασία ενός ολόκληρου αυλακιού. Αυτό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου σε διαφορετικές θέσεις ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο, οι οποίες ονομάζονται θέσεις κύλισης. Σε κάθε θέση κύλισης το κοπτικό δόντι μέσω ενός εμβολισμού αφαιρεί ένα απόβλιττο από το κατεργαζόμενο αυλάκι. Οι θέσεις κύλισης προκύπτουν άμεσα από τα δεδομένα της περίπτωσης κατεργασίας, μέσω του υπολογισμού της συχνότητας των διαδοχικών εμβολισμών του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο

τεμάχιο. Η σημαντικότερη παράμετρος που ορίζει τον αριθμό των θέσεων κύλισης που απαιτούνται για τον σχηματισμό ενός αυλακιού είναι η πρόωση κύλισης f_w . Η πρόωση κύλισης ορίζεται ως το τμήμα τόξου στον αρχικό κύκλο που περιστρέφεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο ανά εμβολισμό του τελευταίου (mm/DS). Επομένως, το βήμα περιστροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων κύλισης προκύπτει από τις σχέσεις (3.7) και (3.8) ως εξής:

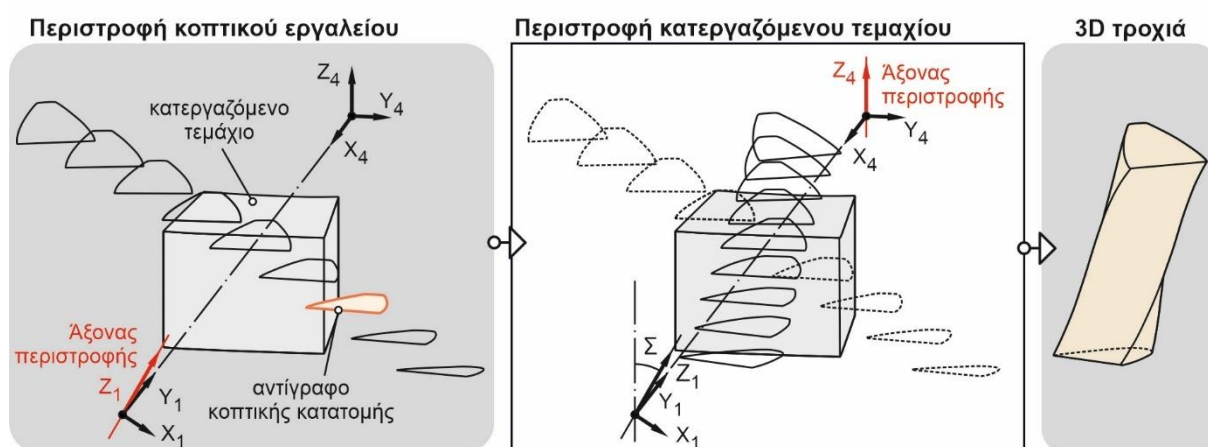
$$\theta_1 = \frac{2 \cdot f_w}{m_n \cdot z_1} \quad (3.7)$$

$$\theta_2 = \frac{2 \cdot f_w}{m_n \cdot z_2} \quad (3.8)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι μεγάλη τιμή της πρόωσης κύλισης οδηγεί σε μεγαλύτερο βήμα περιστροφής, λιγότερες θέσεις κύλισης και συνεπώς μικρότερη ακρίβεια στο παραγόμενο αυλάκι. Η αρίθμηση των θέσεων κύλισης προκύπτει από τη σχετική τοποθέτηση του κοπτικού δοντιού ως προς το κατεργαζόμενο αυλάκι. Ως θέση 0 ορίζεται η θέση κύλισης για την οποία το κοπτικό δόντι και η σχετική τροχιά του βρίσκονται στο μέσον του αυλακιού και κατά συνέπεια στο μέγιστο βάθος κατεργασίας. Όλες οι υπόλοιπες θέσεις κύλισης ορίζονται ως προς τη θέση 0. Συγκεκριμένα οι θέσεις κύλισης πριν τη θέση 0 έχουν αρνητική αρίθμηση, ενώ όλες οι επόμενες από αυτήν έχουν θετική αρίθμηση. Συνεπώς, η αμέσως προηγούμενη θέση αριθμείται ως -1 και η αμέσως επόμενη ως 1.

3.4.2 Αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Η μοντελοποίηση της κινηματικής στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων ακολουθεί τις ίδιες παραδοχές με την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων. Έτσι το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι ακίνητο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και όλες οι κινήσεις μεταφέρονται στο κοπτικό εργαλείο. Για τη δημιουργία της τρισδιάστατης τροχιάς που διανύει η κοπτική κατατομή, εμπλέκονται τρεις κινήσεις: η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονα του, η αντίστοιχη περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και η αξονική πρόωση της κατεργασίας. Έτσι η τροχιά δημιουργείται από αντίγραφα της κοπτικής κατατομής μεταξύ των οποίων εφαρμόζονται βηματικά οι τρεις κινήσεις που αναφέρθηκαν. Οι θέσεις στον τρισδιάστατο χώρο που τοποθετούνται τα αντίγραφα της κοπτικής κατατομής και σχηματίζουν την τροχιά ονομάζονται θέσεις περιστροφής. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Η διαδικασία παραγωγής της τροχιάς είναι όμοια για ευθείες και πλάγιες οδοντώσεις. Το μόνο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η κατάλληλη περιστροφή της κοπτικής κατατομής ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο υπό γωνία Σ , όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (2.6). Η γωνία Σ αναφέρεται στην κλίση του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο υπό κατεργασία και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή επαρκούς ταχύτητας κοπής στην κατεργασία. Η γωνία περιστροφής φ_1 του κοπτικού εργαλείου μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής προκύπτει από τα δεδομένα της προσομοίωσης και ορίζεται ως πολλαπλάσιο του γωνιακού βήματος στον αρχικό κύκλο του κοπτικού εργαλείου. Συγκεκριμένα, ως δεδομένο δίνεται ο παράγοντας k , ο οποίος προσδιορίζει τον αριθμό των διχοτομήσεων του εν λόγω γωνιακού βήματος. Έτσι η γωνία περιστροφής φ_1 υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.9):

$$\varphi_1 = \frac{360}{z_1 \cdot k} \quad (3.9)$$

Με τη βοήθεια της γωνίας περιστροφής φ_1 και της σχέσης μετάδοσης (2.1) μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη γωνία περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου ως:

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 \cdot z_1}{z_2} \quad (3.10)$$

Τέλος, το βήμα αξονικής μετατόπισης προκύπτει από το βήμα περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την αξονική πρόωση της κατεργασίας. Σύμφωνα με τον ορισμό της αξονικής πρόωσης, προκύπτει ότι το κοπτικό εργαλείο μετατοπίζεται αξονικά κατά f_a για μία πλήρη περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Επομένως το αξονικό βήμα df_a μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$df_a = \frac{f_a \cdot \varphi_2}{360} \quad (3.11)$$

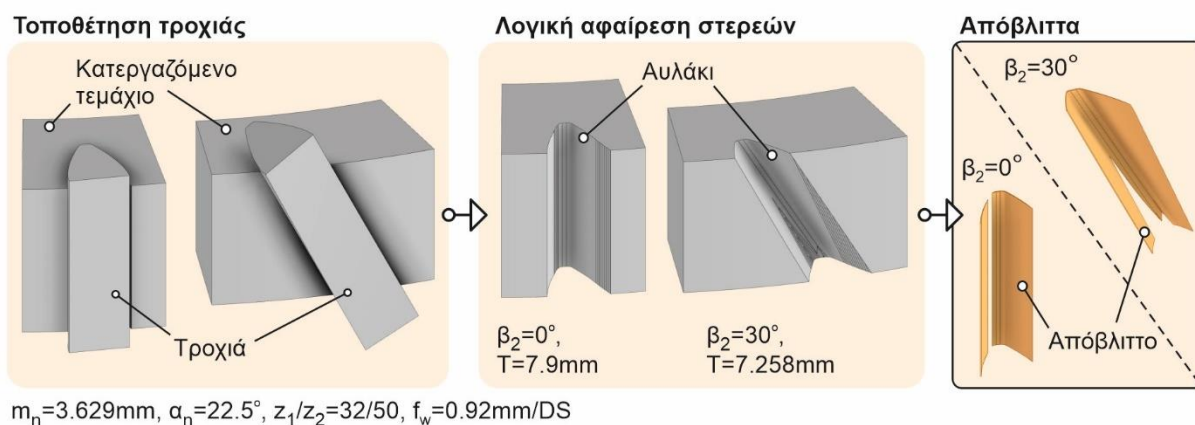
Σε αντίθεση με την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση, στην αποφλοίωση με κύλιση δεν υπάρχουν διαφορετικές θέσεις κύλισης. Τα απόβλιπτα της κατεργασίας είναι όλα όμοια και προκύπτουν από τη συνεχή κίνηση του κοπτικού εργαλείου στον χώρο, χωρίς να απαιτείται η επανατοποθέτησή του ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό είναι και το σημαντικό πλεονέκτημα της κατεργασίας, το οποίο συνεισφέρει στην υψηλή παραγωγικότητά της.

3.5 Προσομοίωση τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλίπτων

Ο προσδιορισμός των τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλίπτων για κάθε κατεργασία προϋποθέτει την κατάλληλη τοποθέτηση της τροχιάς που δημιουργήθηκε ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει, εκτός από τον προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίπτων, τον σχηματισμό των επιμέρους γεωμετριών του αυλακιού του οδοντωτού τροχού. Με την εφαρμογή της λειτουργίας της λογικής αφαίρεσης τρισδιάστατων στερεών αφαιρείται ο κοινός όγκος από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, όπως αυτός προκύπτει από την επαφή των στερεών τροχιάς-κατεργαζόμενο τεμάχιο σε κάθε θέση. Το στερεό που αφαιρείται αντιστοιχεί στο απαραμόρφωτο απόβλιπτο της κατεργασίας στη συγκεκριμένη θέση, ενώ ταυτόχρονα προκύπτει η νέα γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου έπειτα από την αφαίρεση του αποβλίπτου. Η προσομοίωση της συγκεκριμένης διαδικασίας ολοκληρώνεται με τον πλήρη σχηματισμό του αυλακιού. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η διαδικασία αυτή για κάθε κατεργασία και θα μελετηθεί η γεωμετρία των αποβλίπτων που παράγονται.

3.5.1 Απόβλιττα πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων

Η δημιουργία ενός αυλακιού στην πλάνιση με κύλιση περιλαμβάνει το πέρασμα όλων των θέσεων κύλισης (ΘΚ) από ένα αυλάκι. Ξεκινώντας από μία αρχική θέση και γνωρίζοντας τα βήματα περιστροφής θ_1 και θ_2 του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η τροχιά περιστρέφεται διαδοχικά γύρω από τον άξονα του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου αντίστοιχα. Πριν την έναρξη των διαδοχικών περιστροφών εφαρμόζεται ακτινική μετατόπιση της τροχιάς ίση με το βάθος κοπής T που έχει οριστεί. Οι φορές περιστροφής είναι αντίθετες για εξωτερικές οδοντώσεις, ενώ είναι όμοιες για εσωτερικές οδοντώσεις. Σε κάθε θέση κύλισης προσδιορίζεται ένα μοναδικό απόβλιττο, το οποίο έχει ίδια γεωμετρία με το αντίστοιχο απόβλιττο που παράγεται στην ίδια θέση κύλισης σε ένα διαφορετικό αυλάκι. Η διαδικασία παραγωγής των αποβλίττων δεν διαφέρει στις πλάγιες οδοντώσεις, καθώς η επιπλέον περιστροφή που απαιτείται λόγω της γωνίας ελίκωσης έχει ήδη ληφθεί υπόψη κατά τη δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου. Στο [σχήμα 3.11](#) παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού των αποβλίττων για δύο ενδιαμέσες θέσεις κύλισης σε κατεργασία ευθείας και πλάγιας οδόντωσης.

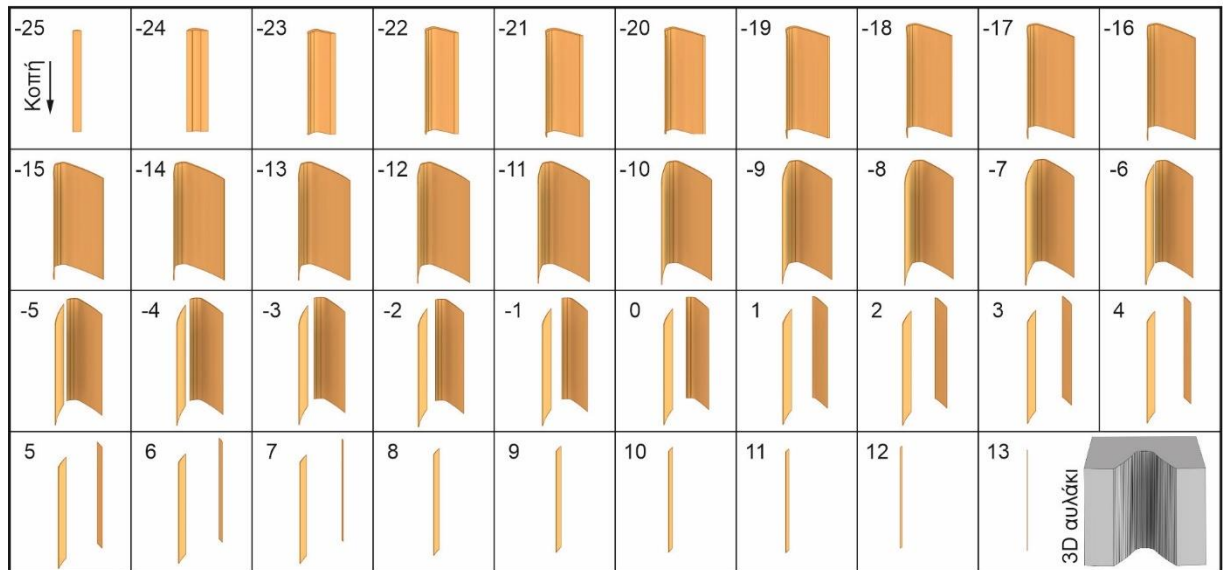


Σχήμα 3.11: Διαδικασία παραγωγής αποβλίττων στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Κατά την κατεργασία του αυλακιού η παρειά της κοπτικής κατατομής που εισέρχεται πρώτη εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου ονομάζεται παρειά εισόδου. Αντίστοιχα, η παρειά που εξέρχεται από το τεμάχιο κατά την ολοκλήρωση της κατεργασίας του αυλακιού ονομάζεται παρειά εξόδου. Ο αριθμός των θέσεων κύλισης με αρνητική αρίθμηση διαφέρει από τον αριθμό των θέσεων κύλισης με θετική αρίθμηση. Συνήθως οι θέσεις κύλισης με αρνητική αρίθμηση είναι περισσότερες, καθώς σε αυτές πραγματοποιείται η μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού, ενώ ταυτόχρονα δύναται να κατεργαστεί από αυτές μέρος του αυλακιού της αντίθετης παρειάς.

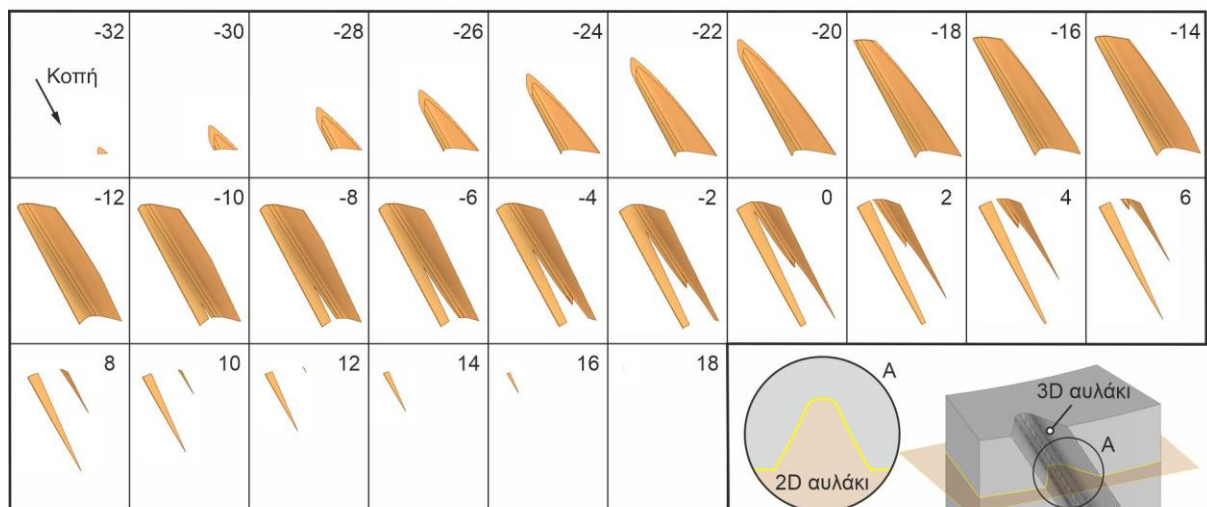
Στο [σχήμα 3.12](#) παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων που παράγονται από μία κατεργασία ευθείας οδόντωσης. Η κατεργασία του αυλακιού ξεκινά με υλικό να αφαιρείται από το μέσον του και το σχηματισμό του αποβλίττου της θέσης κύλισης -25 από την κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Σταδιακά, η παρειά εισόδου της κοπτικής κατατομής εισέρχεται σε μεγαλύτερο βάθος, οδηγώντας στον σχηματισμό αποβλίττων μεγαλύτερου όγκου. Η εμπλοκή εξερχόμενης παρειάς στην κοπή ξεκινά στη θέση κύλισης -23. Η κατεργασία συνεχίζεται με τον σχηματισμό αποβλίττων σταδιακά μικρότερου πάχους, ενώ στη θέση κύλισης -6 παρατηρείται ο διαχωρισμός του αποβλίττου σε δύο υποαποβλίττα. Ο διαχωρισμός αυτός υποδηλώνει την ολοκλήρωση της κατεργασίας σε ένα τμήμα της δεξιάς παρειάς του αυλακιού. Ο διαχωρισμός παραμένει σχεδόν μέχρι το τέλος της κατεργασίας με τον όγκο των υποαποβλίττων να συνεχίζει να μειώνεται. Στη θέση κύλισης 1 η κατεργασία από την κεφαλή της

κοπτικής κατατομής σταματά, ενώ το ίδιο συμβαίνει για την παρειά εισόδου στη θέση κύλισης 8. Η κατεργασία ολοκληρώνεται στις επόμενες 6 θέσεις κύλισης με την παρειά εξόδου να είναι το μόνο τμήμα της κοπτικής κατατομής που εμπλέκεται στην κοπή, από όπου σχηματίζονται αποβλίττα ιδιαίτερα μικρού όγκου.



$$m_n=3.629\text{mm}, \alpha_n=22.5^\circ, z_1/z_2=32/50, \beta_2=0^\circ, f_w=0.92\text{mm/DS}, T=7.9\text{mm}, b=15\text{mm}$$

Σχήμα 3.12: Γεωμετρίες απαραμόρφωτων αποβλίττων για κατεργασία ευθείας οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση



$$m_n=3.629\text{mm}, \alpha_n=22.5^\circ, z_1/z_2=32/50, \beta_2=30^\circ, f_w=0.92\text{mm/DS}, T=7.258\text{mm}, b=20\text{mm}$$

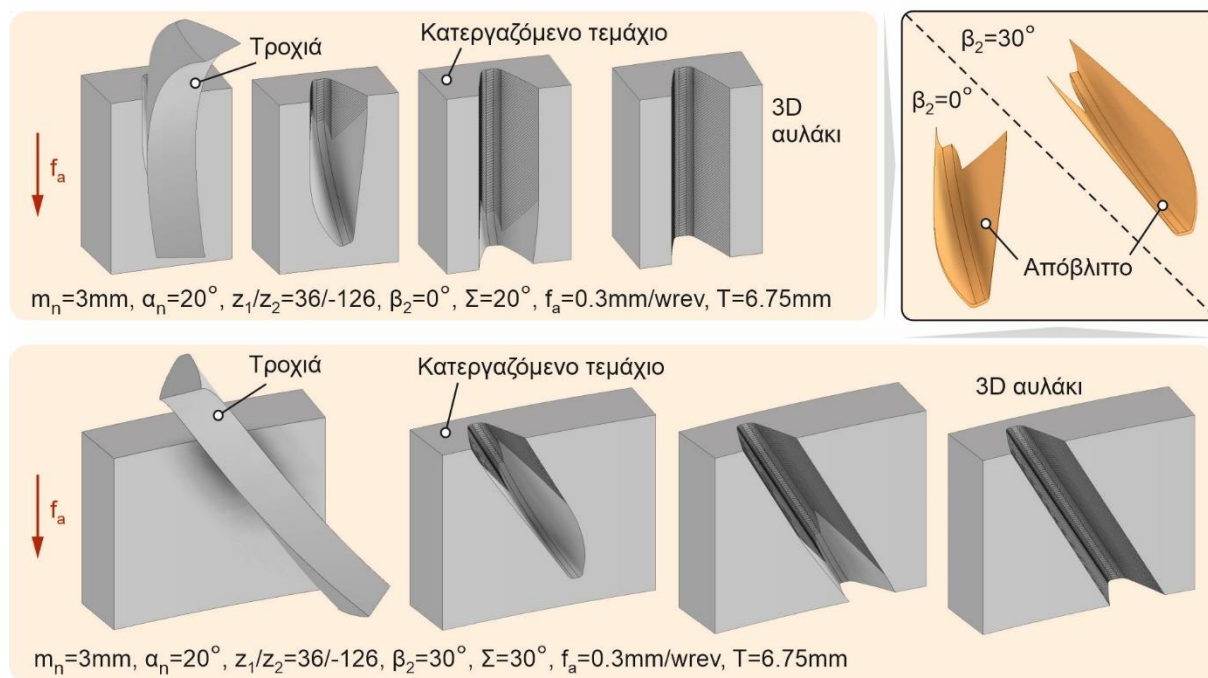
Σχήμα 3.13: Γεωμετρίες απαραμόρφωτων αποβλίττων για κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση

Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων που παράγονται από μία κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης, στην οποία απαιτούνται 51 θέσεις κύλισης για την κατεργασία του αυλακιού σε όλο το πλάτος του οδοντωτού τροχού. Σε αντίθεση με την κατεργασία ευθείας οδόντωσης και λόγω της κατεύθυνσης του εμβολισμού σύμφωνα με τη γωνία ελίκωσης, τα απόβλιττα δεν αντιστοιχούν πάντα σε υλικό που αφαιρείται σε όλο το πλάτος του τροχού. Συγκεκριμένα, η κατεργασία ξεκινά από τη θέση κύλισης -32 με την αφαίρεση υλικού στο κάτω τμήμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σταδιακά ο όγκος των

αποβλίπτων αυξάνεται, ενώ στη θέση κύλισης -20° παρατηρείται αφαίρεση υλικού στο άνω τμήμα του κατεργαζόμενου τεμαχίου για πρώτη φορά. Το τρισδιάστατο αυλάκι μπορεί υποθετικά να χωριστεί σε άπειρα επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους σε όλο το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η διατομή κάθε επιπέδου αποτελεί ένα αυλάκι σε δύο πλέον διαστάσεις, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13, για το αυλάκι που προκύπτει από τη διατομή στο μέσον του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο σχηματισμός ενός τέτοιου αυλακιού σε κάθε επίπεδο προκύπτει μόνο από 37 θέσεις κύλισης, αριθμός μικρότερος από τις συνολικές θέσεις κύλισης που απαιτούνται στην κατεργασία. Έτσι, κάθε απόβλιπτο που δημιουργείται αντιστοιχεί σε διαφορετική θέση κύλισης μεταξύ διαφορετικών τέτοιων επιπέδων, ενώ δεν συνεισφέρει καθόλου στην κατεργασία του αυλακιού ορισμένων επιπέδων. Το γεγονός αυτό επεξηγεί τον μεγαλύτερο αριθμό θέσεων κύλισης που απαιτούνται για τη συνολική κατεργασία σε σχέση με την κατεργασία ευθείας οδόντωσης.

3.5.2 Απόβλιπτα αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

Ο προσδιορισμός των αποβλίπτων στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων αποτελεί πιο απλή διαδικασία σε σχέση με την πλάνιση με κύλιση. Με βάση τον ορισμό της αξονικής πρόωσης για μία ολόκληρη περιστροφή του οδοντωτού τροχού το κοπτικό εργαλείο μετατοπίζεται κατά f_a . Έτσι, στην περίπτωση της προσομοίωσης, η διαδικασία εκτελείται βηματικά με διαδοχικές αξονικές μετατοπίσεις της τροχιάς, ίσες με την αξονική πρόωση της κατεργασίας. Σε κάθε βήμα πραγματοποιείται η λογική αφαίρεση μεταξύ τροχιάς και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο σχηματισμός του τρισδιάστατου αυλακιού ολοκληρώνεται με τη μετατόπιση της τροχιάς σε όλο το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.4.2, στην κατεργασία παράγονται όμοια απόβλιπτα από όλα τα κοπτικά δόντια, με την προϋπόθεση ότι το βάθος κοπής διατηρείται σταθερό. Επομένως, για τη μελέτη της κατεργασίας αρκεί ένα μόνο απόβλιπτο, το οποίο προσδιορίζεται στην πλήρη κοπή της τροχιάς εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η διαδικασία σχηματισμού του αυλακιού και προσδιορισμού του αποβλίπτων για κατεργασίες εσωτερικής οδόντωσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Διαδικασία σχηματισμού αυλακιού και προσδιορισμός αποβλίπτων στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

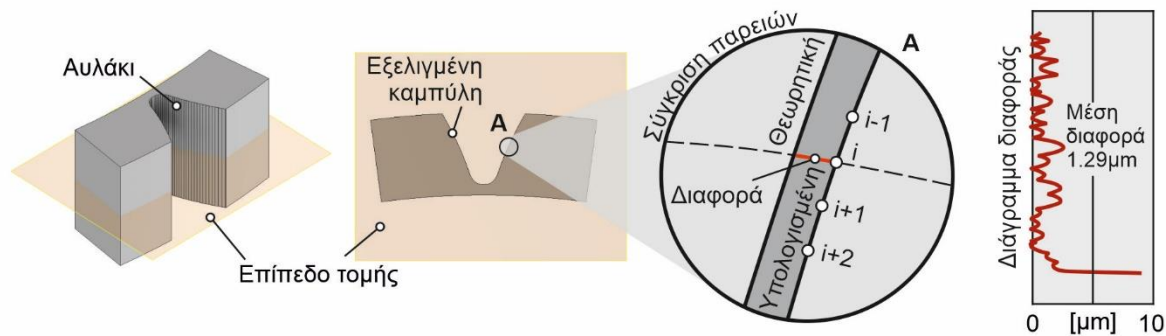
Στην περίπτωση κατεργασίας ελικοειδούς οδόντωσης, εκτός από την αξονική μετατόπιση της τροχιάς, απαιτείται και επιπλέον περιστροφή της γύρω από τον άξονα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε η κατεργασία να ακολουθήσει τη διεύθυνση της γωνίας ελίκωσης του αυλακιού. Η επιπρόσθετη περιστροφή προκύπτει και πάλι σύμφωνα με τη σχέση (3.6) όπου ως df χρησιμοποιείται η αξονική πρόωση f_a της κατεργασίας. Σημειώνεται ότι η επιπρόσθετη περιστροφή, σε αντίθεση με τη μοντελοποίηση της πλάνισης με κύλιση, δεν είχε ληφθεί υπόψη στη δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, γι' αυτό και είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός της σε αυτό το στάδιο της προσομοίωσης.

Όπως προκύπτει από τη γεωμετρία του αποβλίπτου, στην περίπτωση της ευθείας οδόντωσης η κατεργασία ξεκινά από τη βάση της παρειάς εισόδου και συνεχίζει στο τμήμα της παρειάς εξόδου που βρίσκεται κοντά στην κεφαλή της κοπτικής κατατομής. Έπειτα από λίγες θέσεις περιστροφής, η κοπτική κατατομή εμπλέκεται σχεδόν πλήρως στην κοπή, ενώ σταδιακά η κατεργασία ολοκληρώνεται με την κεφαλή της κοπτικής κατατομής να αφαιρεί υλικό κατά την έξοδο της από το τεμάχιο. Η γεωμετρία του αποβλίπτου της ελικοειδούς οδόντωσης προκύπτει με παρόμοιο τρόπο, ο οποίος όμως εξαρτάται από τη φορά της γωνίας ελίκωσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Γενικά η γεωμετρία των αποβλίστων επηρεάζεται από τις συνθήκες κατεργασίας που έχουν επιλεγεί. Συγκεκριμένα, η γωνία κλίσης του κοπτικού εργαλείου έχει άμεσο αντίκτυπο στο μήκος των αποβλίστων που παράγονται. Λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας εμπλοκής κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου, μεγαλύτερες τιμές της γωνίας κλίσης Σ οδηγούν στο σχηματισμό αποβλίστων μεγαλύτερου μήκους. Ανάλογη συμπεριφορά σχετικά με το μήκος των αποβλίστων, παρατηρείται στις κατεργασίες εσωτερικών οδοντώσεων όπου και πάλι η επιφάνεια εμπλοκής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις κατεργασίες εξωτερικών οδοντώσεων. Η αξονική πρόωση της κατεργασίας έχει τη μεγαλύτερη επιρροή όσον αφορά το πάχος των απαραμόρφωτων αποβλίστων. Μεγαλύτερες τιμές της αξονικής πρόωσης επηρεάζουν το βήμα της αξονικής μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου, αυξάνοντας το πάχος των αποβλίστων που παράγονται.

3.6 Επιβεβαίωση της γεωμετρίας της παραγόμενης οδόντωσης

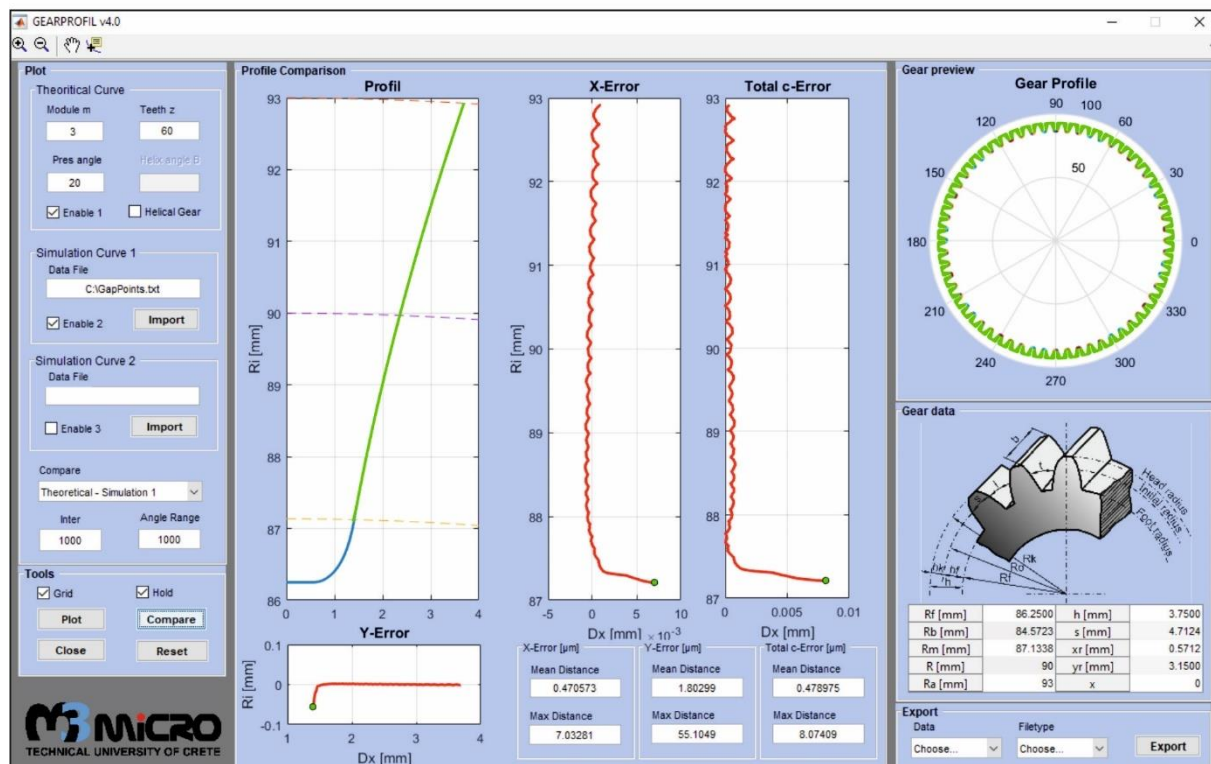
Η επιβεβαίωση της προσομοίωσης της κινηματικής αλυσίδας κάθε κατεργασίας, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, γίνεται με τον έλεγχο της γεωμετρίας του αυλακιού που παράγεται. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σύγκριση των παρειών της παραγόμενης από το μοντέλο οδόντωσης, με τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες που περιγράφουν τη γεωμετρία των παρειών ενός οδοντωτού τροχού. Οι καμπύλες αυτές αποτελούνται από δύο τμήματα: το πρώτο τμήμα, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του βασικού κύκλου και του κύκλου κεφαλής του οδοντωτού τροχού, περιγράφεται από τις εξισώσεις τις εξελιγμένης καμπύλης του κύκλου. Το δεύτερο τμήμα αποτελεί την καμπύλη που περιγράφει το πόδι του κοπτικού δοντιού, της οποίας η γεωμετρία υπολογίζεται σύμφωνα με γνωστές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί από τον H. Petri [80–83].

Τα στάδια της διαδικασίας επαλήθευσης του αυλακιού παρουσιάζονται στο [σχήμα 3.15](#). Αρχικά πραγματοποιείται τομή του τελικού αυλακιού από επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του οδοντωτού τροχού. Στο επίπεδο τομής προκύπτει η γεωμετρία του αυλακιού της οδόντωσης, όπως αυτή προσομοιώθηκε από την κινηματική της κατεργασίας στο μοντέλο. Για τη σύγκριση μεταξύ της υπολογισμένης και της θεωρητικής παρειάς, δημιουργούνται διαδοχικά κύκλοι με κέντρο το κέντρο του οδοντωτού τροχού και ακτίνες που καταλήγουν σε κάθε υπολογισμένο σημείο i της υπολογισμένης παρειάς. Ως διαφορά για κάθε σημείο i ορίζεται το τόξο του κύκλου μεταξύ της θεωρητικής και της υπολογισμένης καμπύλης. Ως τελικό αποτέλεσμα προκύπτει ένα διάγραμμα με τις τιμές της διαφοράς αυτής σε κάθε σημείο.



Σχήμα 3.15: Διαδικασία σύγκρισης μεταξύ θεωρητικής και υπολογισμένης παρειάς του αυλακιού κατεργασμένης οδόντωσης

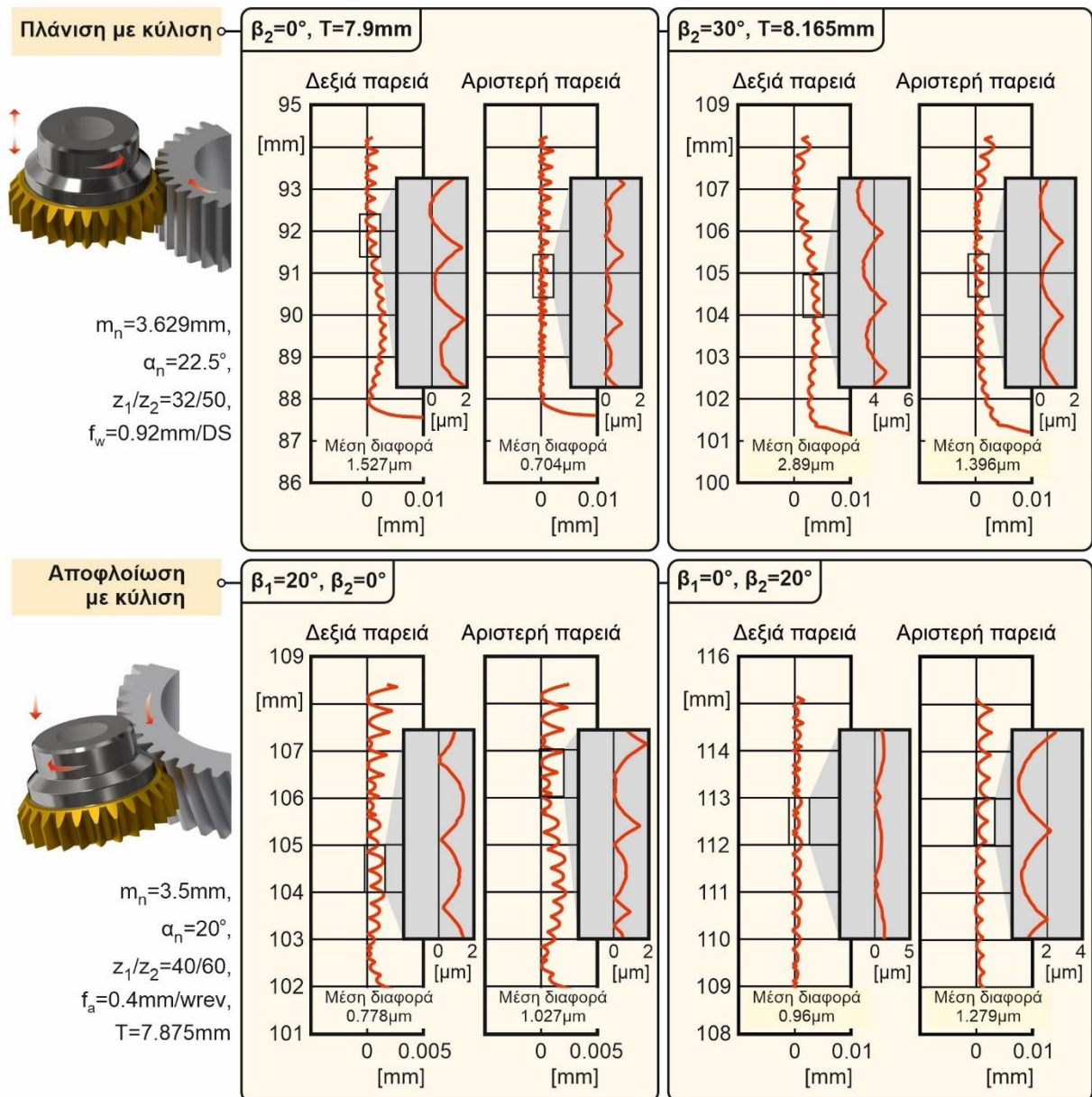
Η εν λόγω διαδικασία σύγκρισης των παρειών του αυλακιού γίνεται με τη χρήση εξωτερικού λογισμικού που αναπτύχθηκε αποκλειστικά για το σκοπό αυτό. Το πρόγραμμα αυτό δέχεται ως δεδομένα το μέτρο οδόντωσης, τη γωνία πίεσης, τον αριθμό των δοντιών και τη γωνία ελίκωσης ενός οδοντωτού τροχού και χρησιμοποιεί θεωρητικές σχέσεις για τον υπολογισμό της παρειάς του. Η είσοδος της υπολογισμένης από το μοντέλο παρειάς δίνεται στο πρόγραμμα με τη μορφή αρχείου κειμένου, το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες κάθε σημείου της παρειάς. Στα αποτελέσματα της σύγκρισης περιλαμβάνονται τα σφάλματα στους άξονες X και Y αλλά και το σφάλμα ως μήκος τόξου κύκλου μεταξύ των δύο παρειών που συγκρίνονται. Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το περιβάλλον του προγράμματος σύγκρισης.



Σχήμα 3.16: Λογισμικό σύγκρισης παρειών οδοντωτού τροχού.

Η ορθή προσομοίωση της κινηματικής των κατεργασιών επαληθεύεται με τα αποτελέσματα των συγκρίσεων που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17. Στα διαγράμματα περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της διαφοράς με τη θεωρητική καμπύλη της παρειάς εισόδου και της παρειάς

εξόδου για κάθε αυλάκι. Για κάθε κατεργασία παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις, μία περίπτωση ευθείας οδόντωσης και μία περίπτωση ελικοειδούς οδόντωσης. Όπως παρατηρείται, οι αποκλίσεις από τις θεωρητικές καμπύλες είναι αμελητέες και στις δύο κατεργασίες, τόσο για την παρειά εισόδου όσο και για την παρειά εξόδου. Το συνολικό μέσο σφάλμα δεν ξεπερνά τα 3μm, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την αποτελεσματική προσομοίωση κάθε κατεργασίας. Εκτός από τη διαφορά μεταξύ θεωρητικής και υπολογισμένης καμπύλης, επιπλέον πληροφορία από κάθε διάγραμμα αποτελεί η γεωμετρική τραχύτητα της παρειάς, όπως αυτή προκύπτει από την κινηματική κάθε κατεργασίας και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια της κοπής. Η επιβεβαίωση της γεωμετρίας του παραγόμενου αυλακιού αποτελεί το πρώτο και σημαντικότερο στάδιο επαλήθευσης του αναπτυσσόμενου μοντέλου. Η επαλήθευση ολοκληρώνεται με τον έλεγχο της γεωμετρίας των αποβλίπτων και την επιβεβαίωση του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, όπως θα παρουσιαστεί στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 3.17: Διαγράμματα διαφοράς των προσομοιωμένων παρειών του αυλακιού με τις θεωρητικές καμπύλες. Διακρίνονται περιπτώσεις ευθείας και πλάγιας οδόντωσης για πλάνιση και αποφλοιώση με κύλιση



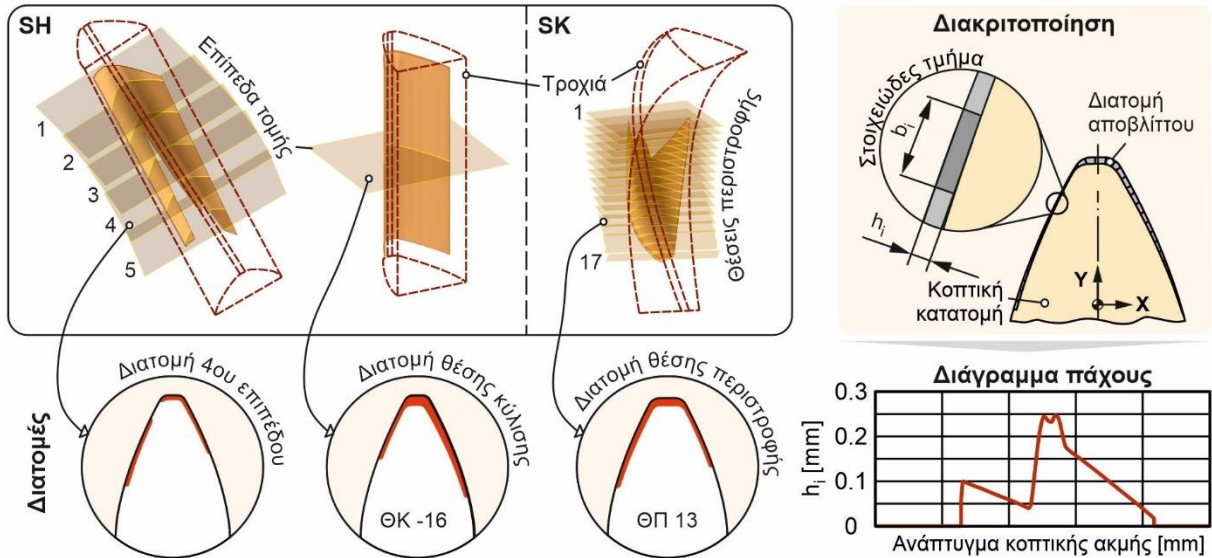
Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής

4.1 Ανάλυση διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίττων

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων, όπως αυτή προσδιορίστηκε σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Συγκεκριμένα η μεθοδολογία υπολογισμού βασίζεται στο πάχος της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Όπως γίνεται αντιληπτό, με εξαίρεση την περίπτωση κατεργασίας ευθείας οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση, οι γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές κατά μήκος του πλάτους της οδόντωσης. Για τον λόγο αυτόν και με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση του πάχους των αποβλίττων, η γεωμετρία τους υπόκειται σε ένα σύνολο από τομές με τα επίπεδα των θέσεων περιστροφής της κοπτικής κατατομής. Για κάθε τέτοια τομή προκύπτει η γεωμετρία της διατομής της διεξόδου της κοπτικής ακμής εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου στη συγκεκριμένη θέση περιστροφής. Η διατομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του πάχους του αποβλίττου κατά μήκος του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής και κατά συνέπεια τον υπολογισμό της επιφάνειας τομής.

Όπως προαναφέρθηκε, στις περιπτώσεις κατεργασίας ευθείας οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση, η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων είναι πρακτικά σταθερή σε όλο το μήκος τους. Έτσι, μία μόνο διατομή είναι αρκετή για την πλήρη απεικόνιση της γεωμετρίας τους. Στις περιπτώσεις πλάγιων οδοντώσεων της ίδιας κατεργασίας, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.5, ο προσδιορισμός ενός δισδιάστατου αυλακιού είναι όμοιος σε κάθε επίπεδο κάθετο στον άξονα του τεμαχίου και δημιουργείται από σταθερό αριθμό θέσεων κύλισης. Έτσι στις πλάγιες οδοντώσεις, ο αριθμός των διατομών που υπολογίζονται για κάθε απόβλιττο αποτελεί δεδομένο της προσομοίωσης. Τα επίπεδα υπολογισμού των εν λόγω διατομών ισαπέχουν σε όλο το μήκος του αποβλίττου. Στην κατεργασία αποφλοίσωσης με κύλιση, ο υπολογισμός των διατομών γίνεται στα επίπεδα των θέσεων περιστροφής της τροχιάς της κοπτικής κατατομής. Έτσι ο αριθμός των διατομών εξαρτάται από τη γωνία περιστροφής φ_1 και το αξονικό βήμα df_a μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής, όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.9) και (3.11) αντίστοιχα. Συνεπώς, η ακριβέστερη προσέγγιση του πάχους της γεωμετρίας των αποβλίττων επιβάλλει τη χρήση μεγάλου αριθμού θέσεων περιστροφής.

Ο υπολογισμός του πάχους σε κάθε διατομή του αποβλίττου γίνεται με τη διακριτοποίησή της σε επιμέρους στοιχειώδη τμήματα, τα οποία αντιστοιχούν σε ένα τρίγωνο ή ένα τετράπλευρο. Η μία πλευρά των τμημάτων αυτών αποτελεί πάντα τμήμα της κοπτικής ακμής, η οποία διακριτοποιείται σε ισαπέχοντα τμήματα πλάτους b_i , μέγεθος το οποίο υπολογίζεται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το στοιχειώδες πάχος h_i του αποβλίττου αποτελεί τμήμα της διχοτόμου μεταξύ δύο διαδοχικών τμημάτων πλάτους b_i . Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μέθοδος προσδιορισμού των διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίττων του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς και η διακριτοποίηση της κοπτικής ακμής για τον υπολογισμό του πάχους του αποβλίττου. Το τελικό αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι το διάγραμμα πάχους της διατομής του αποβλίττου συναρτήσει του μήκους του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής. Τα διαγράμματα αυτά προσφέρουν λεπτομερή απεικόνιση των τιμών του πάχους των αποβλίττων κατά τη διάρκεια της κοπής τους και πως το πάχος αυτό κατανέμεται στο μήκος της κοπτικής κατατομής.



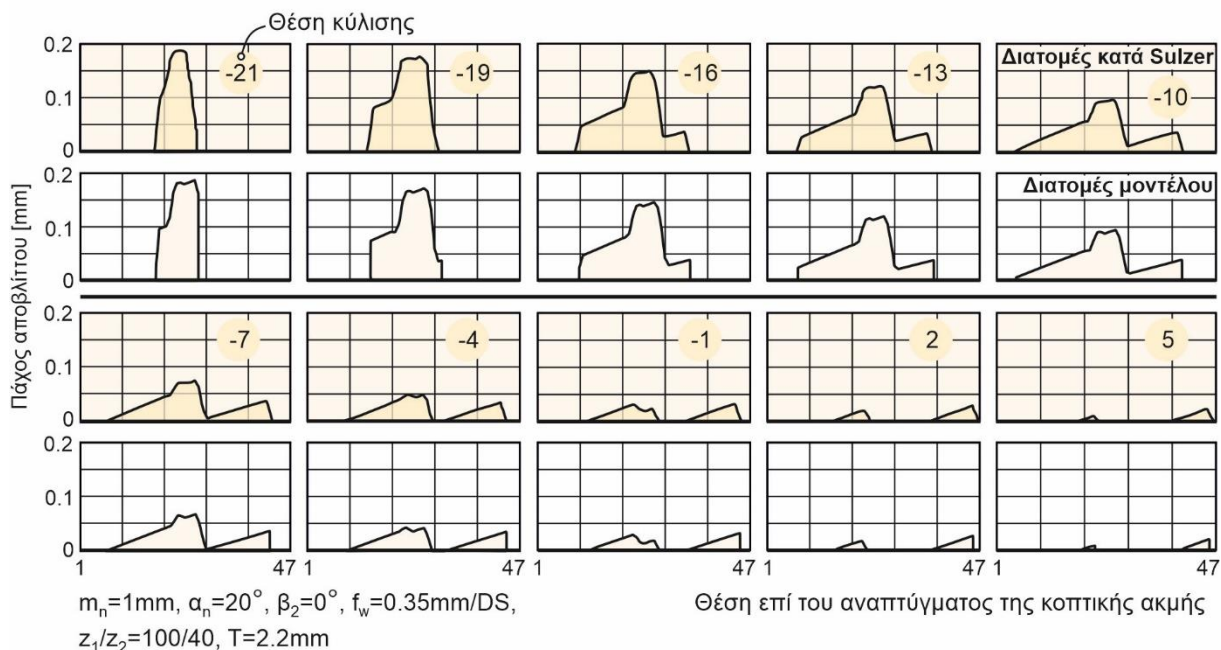
Σχήμα 4.1: Μέθοδος προσδιορισμού διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίπτων. Διακριτοποίηση της κοπτικής ακμής και υπολογισμός του πάχους επί των διατομών

Ουσιαστικό ενδιάμεσο βήμα για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης είναι ο έλεγχος των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτόν οι διατομές των αποβλίπτων που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα διατομών υπαρχόντων μοντέλων προσομοίωσης των κατεργασιών. Σημειώνεται ότι στα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης όλες οι τομές των αποβλίπτων πραγματοποιούνται σε επίπεδα παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η μέθοδος αυτή δημιουργεί αποκλίσεις στον υπολογισμό των διατομών και πιθανές ανακρίβειες στον υπολογισμό του πάχους των αποβλίπτων. Τα επίπεδα τομής πρέπει να βρίσκονται στις διακριτές θέσεις που τοποθετείται η κοπτική κατατομή κατά τη διάρκεια της κοπής, προκειμένου να γίνει ακριβέστερη προσομοίωση κάθε κατεργασίας. Παρ' όλα αυτά, οι συγκρίσεις με τα αποτελέσματα τέτοιων μοντέλων, αν και δεν είναι πάντα αξιόπιστες ως προς την επαλήθευση των υπολογισμένων τιμών, προσφέρουν σημαντική πληροφορία για τη μορφή των υπολογισμένων διατομών και τη συμπεριφορά μεταβολής των διαγραμμάτων σε κάθε επίπεδο υπολογισμού.

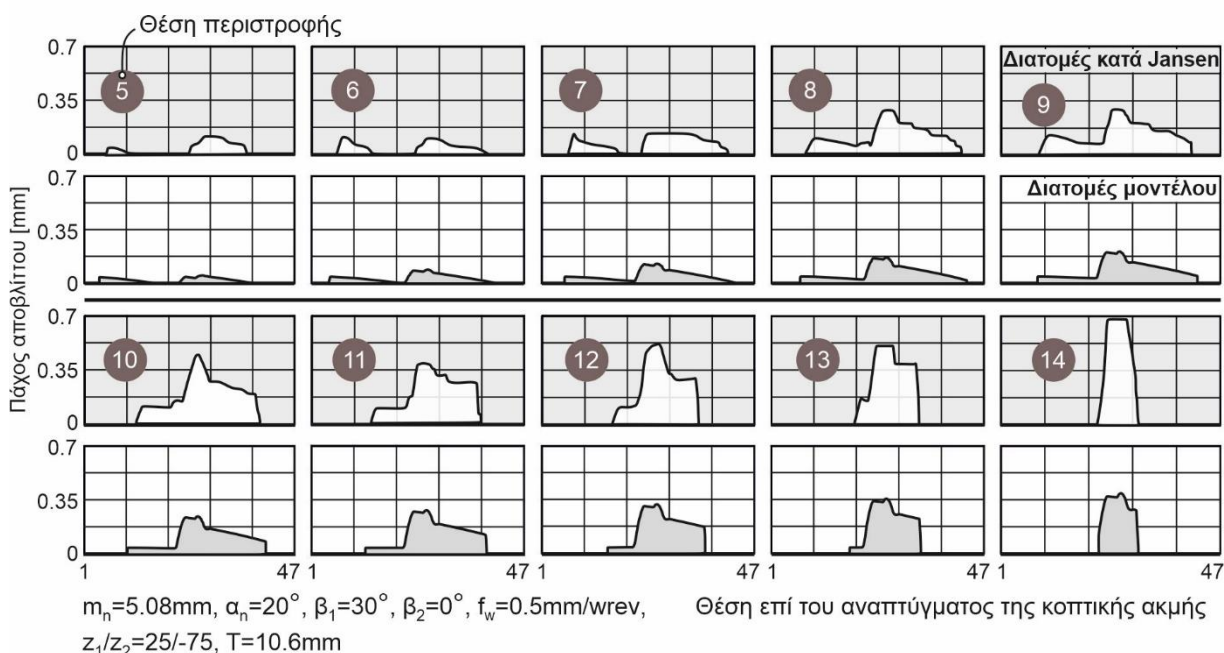
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται συγκρίσεις μεταξύ των υπολογισμένων διαγραμμάτων πάχους των αποβλίπτων με αντίστοιχα διαγράμματα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για την πλάνιση με κύλιση. Συγκεκριμένα τα υπολογισμένα από το μοντέλο διαγράμματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του μοντέλου του Sulzer [7] για κατεργασία ευθείας οδόντωσης. Στην περίπτωση αυτή, τα παράλληλα επίπεδα υπολογισμού των διατομών ταυτίζονται με τα αντίστοιχα επίπεδα του παρόντος μοντέλου λόγω της κάθετης παλινδρομικής κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των διαγραμμάτων είναι πολύ μικρές για αντίστοιχες θέσεις κύλισης, τόσο ως προς τη μορφή τους αλλά και ως προς τις αντίστοιχες τιμές.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται αντίστοιχες συγκρίσεις των διατομών των θέσεων περιστροφής με αποτελέσματα από το μοντέλο προσομοίωσης του Jansen [31] για την αποφλοίωση με κύλιση. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα οι τιμές των διαγραμμάτων διαφέρουν αισθητά σε σχέση με τη σύγκριση της περίπτωσης της πλάνισης με κύλιση, γεγονός που οφείλεται στα παράλληλα επίπεδα υπολογισμού που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο του Jansen, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό μεγαλύτερης επιφάνειας διατομής και κατά συνέπεια

υψηλότερες τιμές του πάχους του αποβλίπτου. Παρ' όλη την απόκλιση των τιμών μεταξύ των διαγραμμάτων, η μορφή τους μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής, επαληθεύοντας έτσι την καλή λειτουργία του αναπτυσσόμενου μοντέλου.



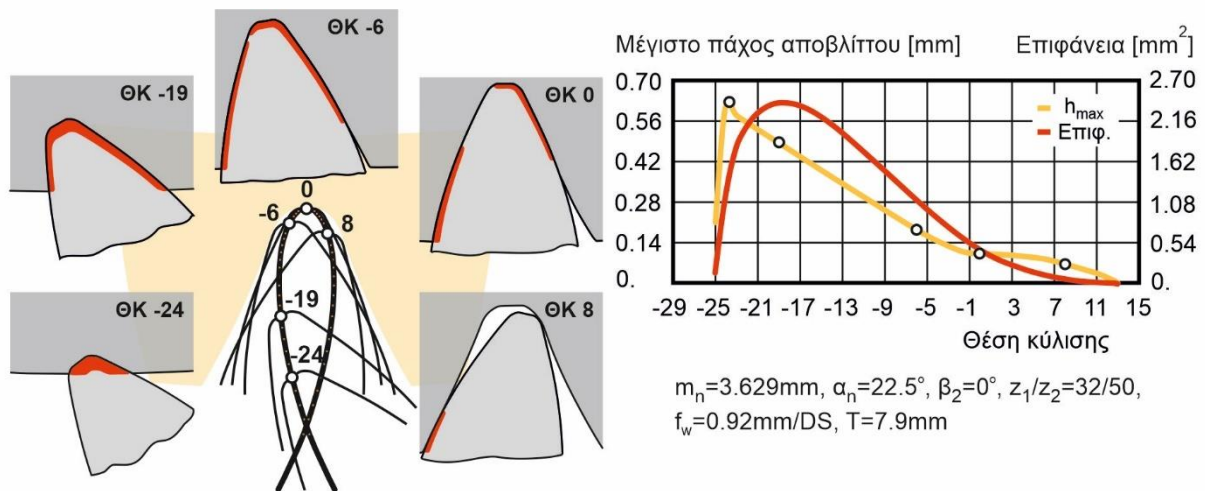
Σχήμα 4.2: Διαγράμματα σύγκρισης του πάχους των αποβλίπτων με αντίστοιχα διαγράμματα της βιβλιογραφίας για την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



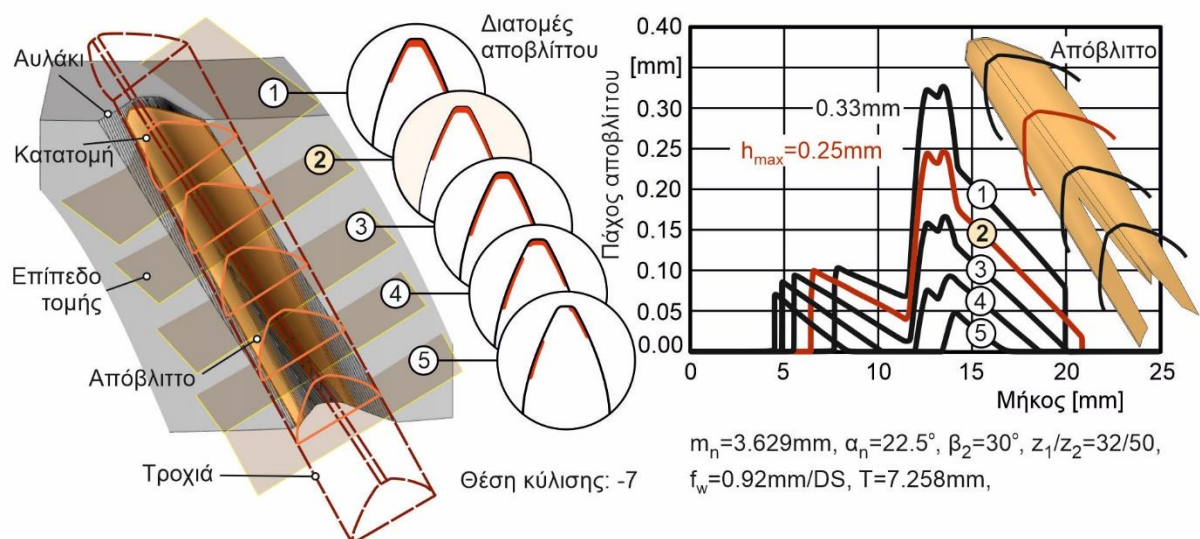
Σχήμα 4.3: Διαγράμματα σύγκρισης του πάχους των αποβλίπτων με αντίστοιχα διαγράμματα της βιβλιογραφίας για την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα του μοντέλου από τον υπολογισμό των διατομών των αποβλίπτων και για τις δύο κατεργασίες, σε συνδυασμό με χαρακτηριστικά διαγράμματα του πάχους των αποβλίπτων συναρτήσει του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής. Στο [σχήμα 4.4](#) παρουσιάζεται περίπτωση ευθείας οδόντωσης της πλάνισης με κύλιση, όπου διακρίνονται οι διατομές χαρακτηριστικών θέσεων κύλισης της περίπτωσης κατεργασίας, καθώς και τα διαγράμματα μέγιστου πάχους και συνολικής επιφάνειας των διατομών για όλες τις θέσεις

κύλισης. Αριστερά του σχήματος σχηματίζεται η πορεία που διαγράφει σταθερό σημείο στο μέσον της κοπτικής ακμής από όλες τις θέσεις κύλισης. Επαληθεύεται ότι η μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού πραγματοποιείται στις αρχικές θέσεις κύλισης της κατεργασίας, όπως παρατηρείται από το διάγραμμα επιφάνειας ανά θέση κύλισης. Στις αρχικές θέσεις κύλισης εντοπίζονται επίσης οι μεγαλύτερες τιμές μέγιστου πάχους του αποβλίπτου, οι οποίες στη συνέχεια ακολουθούν φθίνουσα πορεία έως την ολοκλήρωση της κατεργασίας. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι διατομές του αποβλίπτου της θέσης κύλισης -7 για μία περίπτωση ελικοειδούς οδόντωσης της πλάνισης με κύλιση. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν 5 επίπεδα υπολογισμού των διατομών του αποβλίπτου για κάθε θέση κύλισης, τα οποία όπως φαίνεται στο σχήμα, κατανέμονται σε όλο το μήκος του αποβλίπτου. Από τα διαγράμματα πάχους κάθε διατομής διαπιστώνεται ότι, για τη συγκεκριμένη θέση κύλισης, το πάχος του αποβλίπτου είναι μεγαλύτερο σε όλο το μήκος της κοπτικής ακμής στα αρχικά επίπεδα υπολογισμού των διατομών.



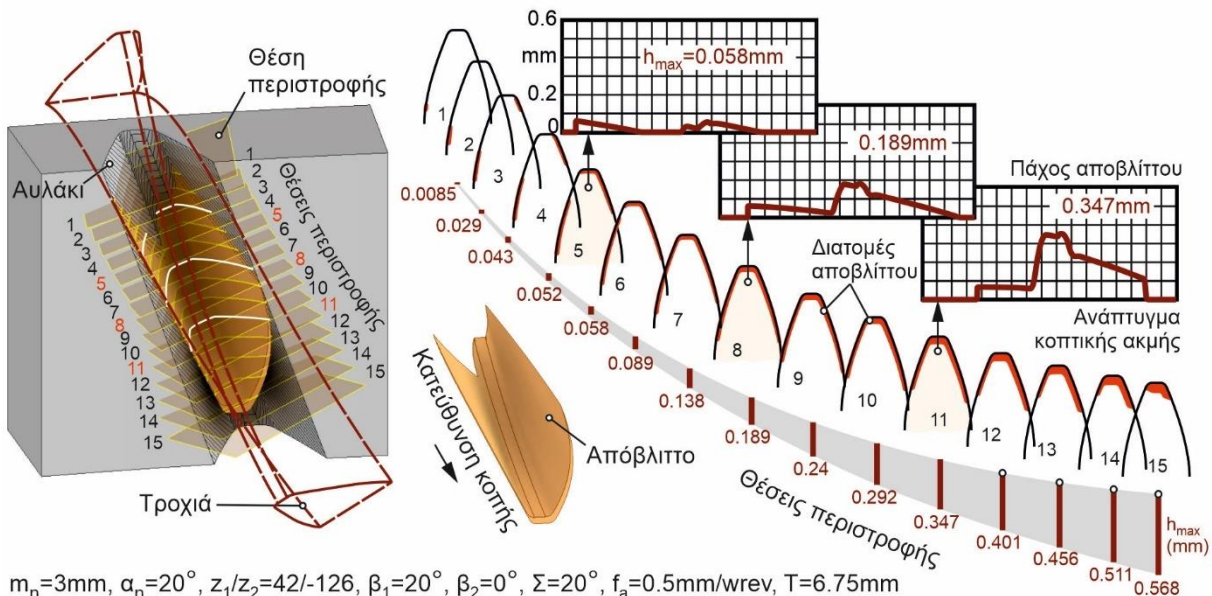
Σχήμα 4.4: Διατομές αποβλίπτου πλάνισης με κύλιση ευθείας οδόντωσης. Διαγράμματα μέγιστου πάχους – επιφάνειας



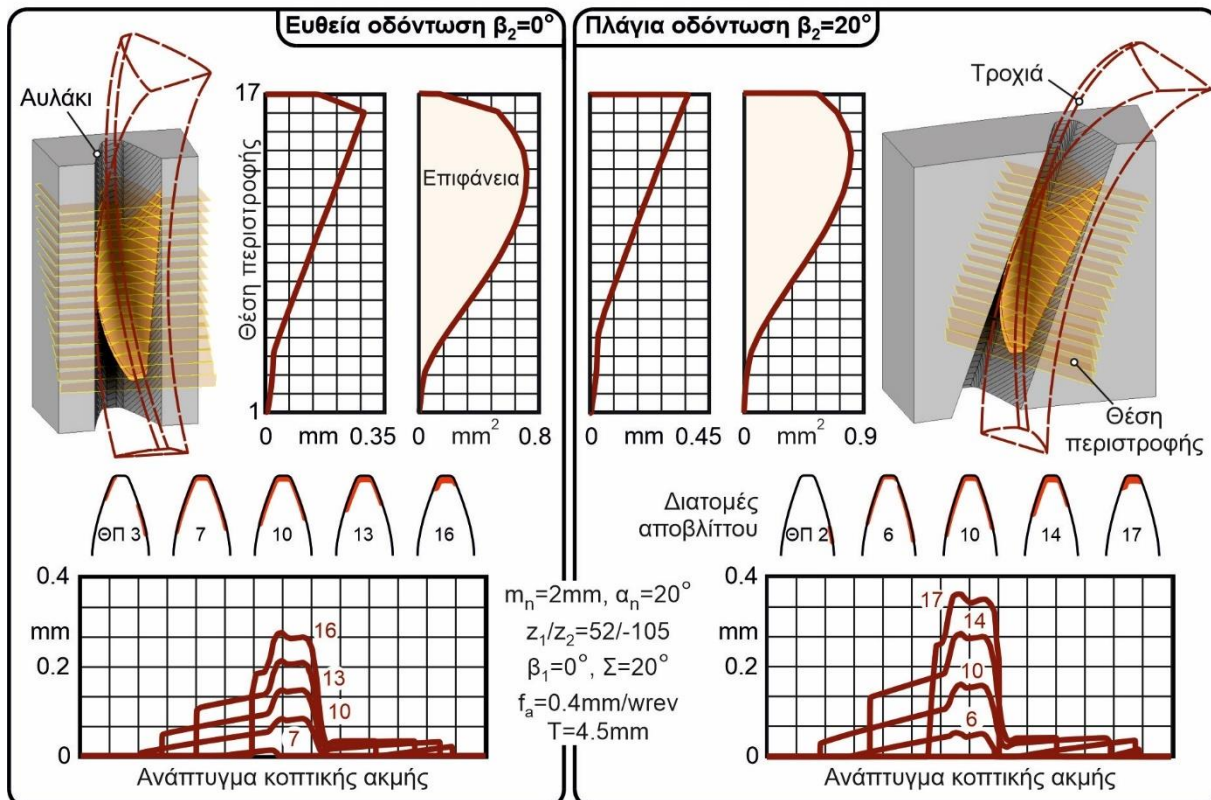
Σχήμα 4.5: Ανάλυση πάχους αποβλίπτου πλάνισης με κύλιση ελικοειδούς οδόντωσης. Διατομές 5 επιπέδων θέσης κύλισης

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται περίπτωση ελικοειδούς εξωτερικής οδόντωσης της αποφλοίσωσης με κύλιση. Απεικονίζονται οι διατομές του αποβλίπτου όλων των θέσεων περιστροφής της

περίπτωσης υπολογισμού, το μέγιστο πάχος αποβλίπτου σε κάθε μία από αυτές, καθώς και τα διαγράμματα πάχους του αποβλίπτου για χαρακτηριστικές διατομές του. Η ανάλυση του αποβλίπτου αποτελείται συνολικά από 15 θέσεις περιστροφής με γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου $\phi_1=2.86^\circ$. Όπως παρατηρείται στο σχήμα, το μέγιστο πάχος αποβλίπτου αυξάνεται με το πέρασμα των διαδοχικών θέσεων περιστροφής.



Σχήμα 4.6: Διατομές αποβλίπτου αποφλοΐωσης με κύλιση ελικοειδούς εξωτερικής οδόντωσης



Σχήμα 4.7: Ανάλυση πάχους αποβλίπτου αποφλοΐωσης με κύλιση περιπτώσεων εσωτερικής οδόντωσης

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται δύο επιπλέον περιπτώσεις για κατεργασία ευθείας και ελικοειδούς εσωτερικής οδόντωσης. Η συμπεριφορά του πάχους των αποβλίπτων είναι παρόμοια μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής. Αντίθετα, η επιφάνεια διατομής ενώ αρχικά ακολουθεί την καμπύλη μεταβολής του πάχους του αποβλίπτου, αρχίζει να μειώνεται λίγο πριν την ολοκλήρωση της κοπής. Επιπλέον, στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης, το πάχος και η επιφάνεια των διατομών του αποβλίπτου, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των διατομών της ευθείας οδόντωσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη κλίση των επιπέδων των θέσεων περιστροφής ως προς τη γεωμετρία του παραμόρφωτου αποβλίπτου.

4.2 Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

Οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στις κατεργασίες κοπής οδοντώσεων αποτελούν την πιο σημαντική πληροφορία που υπολογίζεται από το μοντέλο και εξαρτώνται από:

- Την κινηματική της κατεργασίας, τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και τη γεωμετρία του παραμόρφωτου αποβλίπτου.
- Τις συνθήκες κοπής της κατεργασίας, όπως η πρόωση, η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και η χρήση λιπαντικού υγρού κοπής.
- Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου καθώς και της επικάλυψής του.

Επομένως ο ακριβής προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής αποτελεί μία δύσκολη και πολυπαραγοντική διαδικασία, καθώς πρέπει να συνυπολογιστούν όλοι οι παραπάνω παράγοντες σε μία ενιαία μέθοδο υπολογισμού. Οι Kienzle και Victor [10] ανέπτυξαν μία σχέση υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για το μοντέλο της λοξής κοπής. Η δύναμη κοπής αναλύεται σε τρεις συνιστώσες, οι οποίες εξαρτώνται από το πάχος και το πλάτος του αποβλίπτου καθώς και την ειδική αντίσταση κοπής του υλικού που χρησιμοποιείται στην κατεργασία. Οι συνιστώσες αυτές είναι η κύρια δύναμη κοπής F_S , η δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V και η δύναμη απώθησης F_R , οι οποίες υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

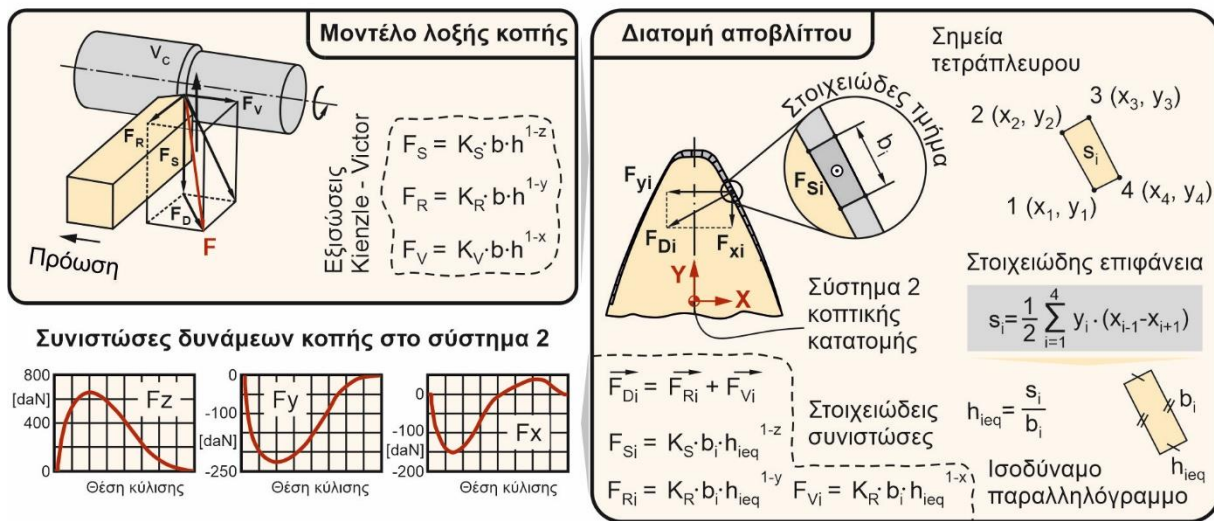
$$F_S = b \cdot K_S \cdot h^{1-z} \quad (4.1)$$

$$F_R = b \cdot K_R \cdot h^{1-y} \quad (4.2)$$

$$F_V = b \cdot K_V \cdot h^{1-x} \quad (4.3)$$

όπου b το πλάτος του αποβλίπτου, h το πάχος του αποβλίπτου, K_S , K_R , K_V οι ειδικές αντιστάσεις κοπής και $1-x$, $1-y$, $1-z$ οι σταθερές κατεργαζόμενου υλικού. Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής προσδιορίζονται πειραματικά και εξαρτώνται από το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και τις συνθήκες κοπής. Ως μέτρο των ειδικών αντιστάσεων κοπής ορίζεται η απαιτούμενη δύναμη για την κοπή παραμόρφωτου αποβλίπτου επιφάνειας 1mm^2 . Η παραπάνω μέθοδος υπολογισμού των δυνάμεων προϋποθέτει η διατομή του αποβλίπτου να παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της κοπής, εξασφαλίζοντας έτσι σταθερό πάχος και πλάτος του αποβλίπτου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας κατεργασίας αποτελεί η τórνευση. Στις περιπτώσεις των κατεργασιών οδοντώσεων, όπως φάνηκε στις προηγούμενες ενότητες, η γεωμετρία των παραμόρφωτων αποβλίπτων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και συνήθως μεταβάλλεται, τόσο κατά μήκος της κοπτικής ακμής, όσο και κατά μήκος της τροχιάς της κατά τη διάρκεια της κοπής. Η ανάλυση των αποβλίπτων σε επιμέρους διατομές, όπως

περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί μία αποτελεσματική μέθοδο που προσφέρει μία λύση υψηλής ακρίβειας για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού των δυνάμεων για δεδομένη διατομή αποβλήτου.



Σχήμα 4.8: Μεθοδολογία υπολογισμού στοιχειωδών δυνάμεων κοπής στη διατομή του αποβλήτου

Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής επί της διατομής του αποβλήτου γίνεται ξεχωριστά για κάθε στοιχειώδες τμήμα που έχει προκύψει, σύμφωνα με την διακριτοποίησή της. Για την ορθή εφαρμογή των εξισώσεων των Kienzle-Victor, κάθε στοιχειώδες τμήμα μετατρέπεται αρχικά σε ένα ισοδύναμο παραλληλόγραμμο πλάτους b_{ieq} και πάχους h_{ieq} . Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος υπολογισμού επιφάνειας κατά Gauss, σύμφωνα με τον οποίο το εμβαδόν s_i προκύπτει από διαδοχικές προσθέσεις και αφαιρέσεις γινομένων μεταξύ συντεταγμένων γειτονικών σημείων. Έτσι το στοιχειώδες εμβαδόν για ένα πολύγωνο n σημείων υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.4):

$$s_i = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot (x_{i-1} - x_{i+1}) \quad (4.4)$$

Μετά τον υπολογισμό του στοιχειώδους εμβαδού, το ισοδύναμο παραλληλόγραμμο μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους h_{ieq} και του ισοδύναμου πλάτους b_{ieq} σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.5) και (4.6):

$$h_{ieq} = \frac{s_i}{b_i} \quad (4.5)$$

$$b_{ieq} = b_i \quad (4.6)$$

Έτσι για κάθε στοιχειώδες τμήμα υπολογίζονται οι στοιχειώδεις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής F_{Si} , F_{Ri} , F_{Vi} , σύμφωνα με τις σχέσεις (4.1) έως και (4.3). Ως b και h χρησιμοποιούνται το στοιχειώδες πάχος b_i και το ισοδύναμο στοιχειώδες πάχος h_{ieq} αντίστοιχα. Στην επιφάνεια διατομής του στοιχειώδους τμήματος εισάγεται ακόμα η συνιστώσα F_{Di} , η οποία ορίζεται ως

το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών F_{Ri} και F_{Vi} , όπως προκύπτει και από το μοντέλο της λοξής κοπής. Έτσι:

$$\vec{F}_{Di} = \vec{F}_{Ri} + \vec{F}_{Vi} \quad (4.7)$$

$$|F_{Di}| = \sqrt{F_{Ri}^2 + F_{Vi}^2} \quad (4.8)$$

Η συνιστώσα αυτή είναι κάθετη στην πλευρά του στοιχειώδους τμήματος i , η οποία είναι ίση με το στοιχειώδες πλάτος b_i . Αφού υπολογισθούν όλες οι στοιχειώδεις συνιστώσες δυνάμεις ακολουθεί ο υπολογισμός των αθροιστικών δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα 2 της κοπτικής κατατομής. Για τον λόγο αυτόν η δύναμη F_{Di} αναλύεται σε μία οριζόντια και μία κάθετη συνιστώσα, τις F_{xi} και F_{yi} αντίστοιχα (σχήμα 4.8). Στη συνέχεια οι συνιστώσες αυτές που προκύπτουν από όλα τα στοιχειώδη τμήματα, αθροίζονται διανυσματικά για τον υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων F_{x2} και F_{y2} που ασκούνται στο σύστημα 2 και για τη συγκεκριμένη διατομή του αποβλήτου. Έτσι προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix} = \sum_{\forall i} \begin{bmatrix} \cos\delta_i & 0 \\ 0 & \sin\delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Di} \\ F_{Di} \end{bmatrix}, \quad -\pi < \delta_i \leq \pi \quad (4.9)$$

όπου δ_i η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος F_{Di} και του θετικού ημιάξονα X στο επίπεδο τομής του αποβλήτου. Ο υπολογισμός των δυνάμεων στο σύστημα 2 ολοκληρώνεται με την άθροιση των συνιστωσών F_{Si} της κύριας δύναμης κοπής, οι οποίες είναι κάθετες στο επίπεδο της διατομής του αποβλήτου και κατά συνέπεια έχουν την ίδια κατεύθυνση με τον άξονα Z του συστήματος 2. Συνεπώς:

$$F_{Z2} = \sum_{\forall i} F_{Si} \quad (4.10)$$

Η παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και την άθροιση των δυνάμεων κοπής του συστήματος 2 σε κάθε διατομή του αποβλήτου. Στη συνέχεια οι δυνάμεις μετασχηματίζονται και στα υπόλοιπα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης. Ο μετασχηματισμός από ένα σύστημα σε ένα άλλο γίνεται με τη βοήθεια των πινάκων μετασχηματισμού τριών διαστάσεων, οι οποίοι παρουσιάζονται στις σχέσεις (4.11) – (4.13). Οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των αξόνων διαφορετικών συστημάτων και χρησιμοποιήθηκαν στους πίνακες περιστροφής, μετρήθηκαν μέσω εγγενών συναρτήσεων απευθείας στο σύστημα CAD εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη ακρίβεια των μετασχηματισμών.

$$R_x(\beta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_x & -\sin\beta_x \\ 0 & \sin\beta_x & \cos\beta_x \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$R_y(\beta_y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_y & -\sin\beta_y \\ 0 & \sin\beta_y & \cos\beta_y \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$R_z(\beta_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_z & -\sin\beta_z \\ 0 & \sin\beta_z & \cos\beta_z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Οι μετασχηματισμοί των δυνάμεων κοπής σε διαφορετικά συστήματα αποτελούν σημαντική πληροφορία για τη μετέπειτα σύγκρισή τους με πειραματικές τιμές, αλλά και για την άθροιση αυτών και των υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο παρόν μοντέλο γίνεται προσομοίωση για ένα μόνο αυλάκι του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και έτσι οι δυνάμεις που υπολογίζονται αναφέρονται σε αυτές που αναπτύσσονται σε ένα μόνο δόντι του κοπτικού εργαλείου. Οι συνολικές δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στην κατεργασία προκύπτουν από την ταυτόχρονη εμπλοκή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο πολλαπλών κοπτικών δοντιών, όπως συμβαίνει και σε πραγματικές συνθήκες κοπής. Ο υπολογισμός των συνολικών δυνάμεων κοπής θα παρουσιαστεί ξεχωριστά για κάθε κατεργασία στις ενότητες που ακολουθούν.

4.3 Δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

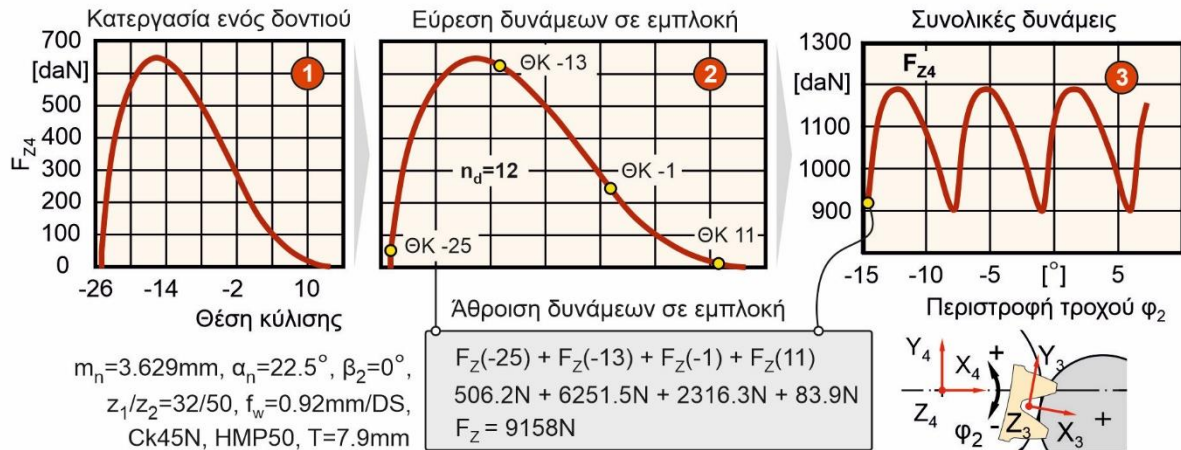
Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση γίνεται αρχικά στα επίπεδα τομής του αποβλίπτου για ευθείες και πλάγιες οδοντώσεις, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1. Έτσι στις ευθείες οδοντώσεις, λόγω της όμοιας γεωμετρίας του αποβλίπτου σε όλο το μήκος του, οι δυνάμεις μένουν πρακτικά σταθερές σε έναν εμβολισμό. Επομένως ο υπολογισμός πραγματοποιείται για μία μόνο διατομή σε κάθε απόβλιπτο της κατεργασίας. Αντίθετα στις περιπτώσεις πλάγιων οδοντώσεων οι δυνάμεις μεταβάλλονται σε όλο το μήκος του αποβλίπτου, οπότε και υπολογίζονται σε κάθε επίπεδο τομής του. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε επίπεδο προκύπτει τομή μόνο με μερικά απόβλιπτα εκ των συνολικών θέσεων κύλισης της κατεργασίας. Ο αριθμός των θέσεων κύλισης για τις οποίες προκύπτει τομή με απόβλιπτο είναι ίδιος για κάθε επίπεδο τομής. Οι θέσεις αυτές συμβάλλουν με όμοιο τρόπο στο σχηματισμό του δισδιάστατου αυλακιού στο υπολογιζόμενο επίπεδο. Για τον λόγο αυτόν η παρουσίαση των δυνάμεων κοπής στις πλάγιες οδοντώσεις γίνεται για τις θέσεις κύλισης του επιλεγμένου επιπέδου.

Για τον υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων κοπής θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται από διαφορετικά κοπτικά δόντια κατά την εμπλοκή κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας, ένας εμβολισμός του κοπτικού εργαλείου έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου από διαφορετικά κοπτικά δόντια. Τα κοπτικά αυτά δόντια κατεργάζονται διαφορετικά αυλάκια, μέσω διαφορετικών θέσεων κύλισης και έτσι αρκεί να αθροιστούν οι δυνάμεις των θέσεων κύλισης που βρίσκονται σε ταυτόχρονη εμπλοκή. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτός ο υπολογισμός, θα πρέπει πρώτα να βρεθεί η διαφορά των θέσεων κύλισης n_d μεταξύ δύο διαδοχικών κοπτικών δοντιών του κοπτικού εργαλείου. Για τον υπολογισμό της διαφοράς αυτής χρησιμοποιείται το βήμα οδόντωσης t_0 του κοπτικού εργαλείου, καθώς και το βήμα περιστροφής θ_1 μεταξύ διαδοχικών θέσεων κύλισης. Έτσι:

$$n_d = \left\lceil \frac{t_0}{\theta_1} \right\rceil \quad (4.14)$$

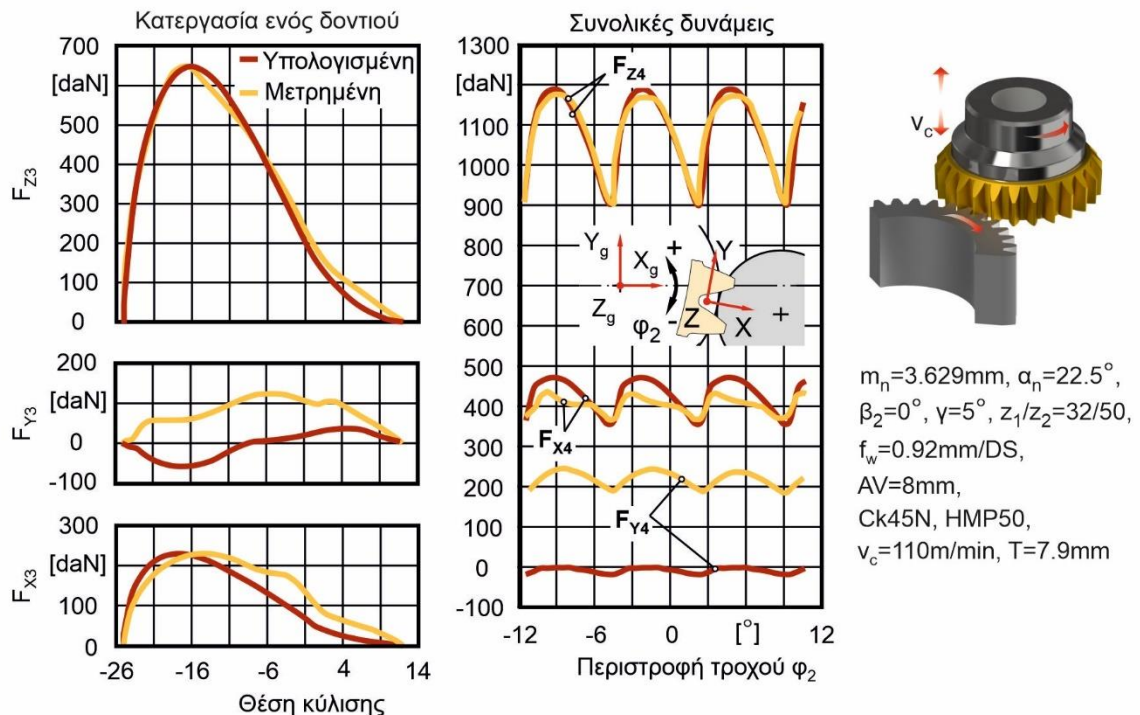
Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της συνολικής κύριας δύναμης κοπής για μία περίπτωση ευθείας οδόντωσης, η οποία υπολογίζεται στο σύστημα 4 στο κέντρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όπως παρατηρείται στο σχήμα, οι συνολικές δυνάμεις

υπολογίζονται συναρτήσει της γωνίας περιστροφής του οδοντωτού τροχού. Στο παράδειγμα απεικονίζεται η διαδικασία άθροισης των δυνάμεων που βρίσκονται σε εμπλοκή, δεδομένου της διαφοράς των θέσεων κύλισης μεταξύ διαδοχικών κοπτικών δοντιών και της καμπύλης της κύριας δύναμης κοπής, όπως αυτή έχει υπολογιστεί για κατεργασία ενός κοπτικού δοντιού. Η διαδικασία άθροισης των δυνάμεων πραγματοποιείται για κάθε συνδυασμό θέσεων κύλισης σε εμπλοκή με σκοπό την εξαγωγή της τελικής καμπύλης για τη συνολική δύναμη.



Σχήμα 4.9: Διαδικασία υπολογισμού των συνολικών δυνάμεων κοπής

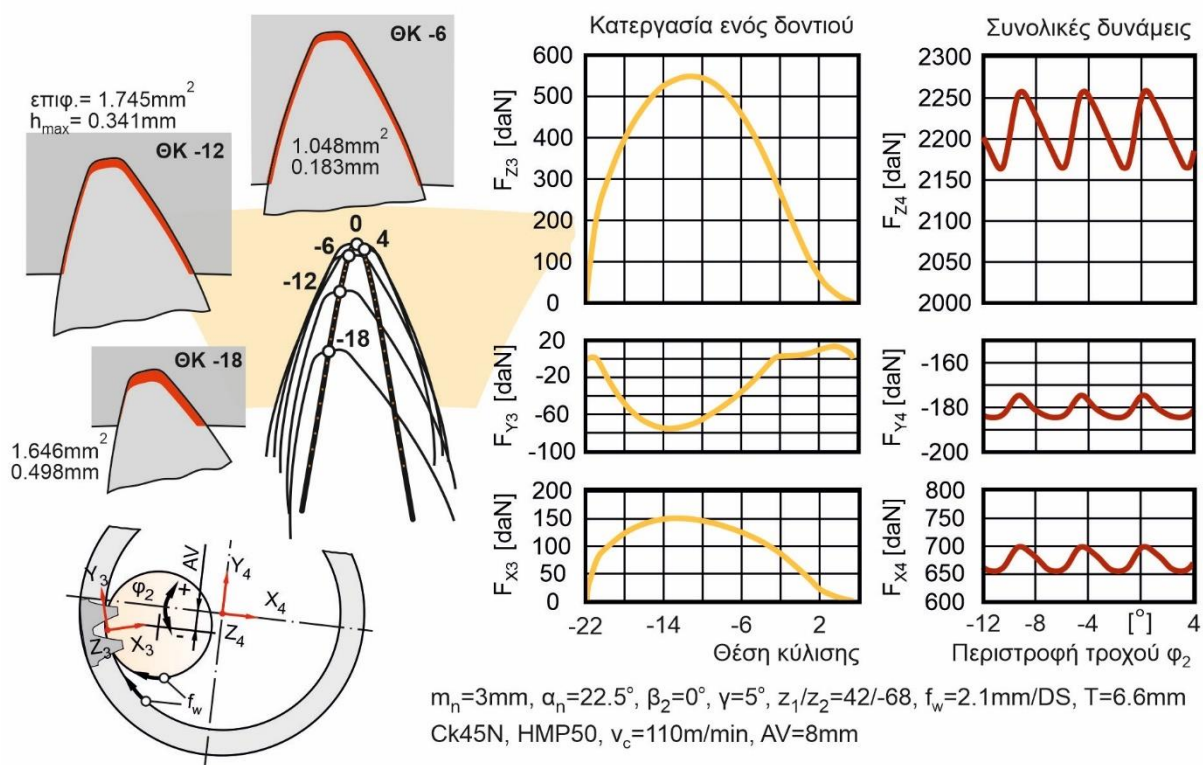
Το τελικό βήμα επαλήθευσης του μοντέλου προσομοίωσης περιλαμβάνει την επιβεβαίωση των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής. Για τον σκοπό αυτόν, οι υπολογισμένες από το μοντέλο δυνάμεις συγκρίθηκαν με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις τους, σύμφωνα με δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα έγινε σύγκριση με πειραματικές τιμές των δυνάμεων κοπής, οι οποίες μετρήθηκαν στα πλαίσια πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν από τον Κ. Δ. Μπουζάκη [8] για κατεργαζόμενο τεμάχιο υλικού CK45N.



Σχήμα 4.10: Επιβεβαίωση των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο σχήμα 4.10, τόσο για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κατεργασία ενός κοπτικού δοντιού, αλλά και για τις συνολικές δυνάμεις της κατεργασίας. Οι δυνάμεις για κατεργασία ενός κοπτικού δοντιού υπολογίζονται στο σύστημα 3 του αυλακιού, ενώ οι συνολικές δυνάμεις υπολογίζονται στο σύστημα 4 στο κέντρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όπως παρατηρείται, οι υπολογισμένες από το μοντέλο δυνάμεις προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις μετρημένες δυνάμεις. Αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές παρατηρούνται στην κατεύθυνση του άξονα Υ. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται σε φαινόμενα τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο προσομοίωσης και τα οποία παρατηρούνται σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας. Τα πιο χαρακτηριστικά από αυτά είναι τα φαινόμενα παρεμπόδισης της ροής των αποβλίπτων, η ανομοιόμορφη κατανομή φθοράς στα κοπτικά εργαλεία και οι ταλαντώσεις που παρατηρούνται στα κέντρα κατεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιες αποκλίσεις στον άξονα Υ παρατηρούνται και στα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης κατεργασιών οδοντώσεων, οι οποίες επίσης αποδίδονται στα φαινόμενα που αναφέρθηκαν. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το μέτρο των δυνάμεων της κατεύθυνσης Υ είναι αρκετά μικρότερο των δυνάμεων στις υπόλοιπες δύο κατευθύνσεις. Έτσι μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο ως προς την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται στην κατεργασία.

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται μία επιπλέον περίπτωση υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για κατεργασία κοπής εσωτερικής οδόντωσης. Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις υπολογισμού του σχήματος 4.10 και του σχήματος 4.11 έχει χρησιμοποιηθεί η παράμετρος πλάγιας μετατόπισης AV του κοπτικού εργαλείου. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για την αποφυγή της σύγκρουσης του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου και δεν επηρεάζει τη μορφή και τις τιμές των διαγραμμάτων των δυνάμεων κοπής. Η μοναδική επίδρασή της στους υπολογισμούς αφορά τον άξονα x των διαγραμμάτων των συνολικών δυνάμεων, που αναφέρεται στη γωνία περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου ως προς το κοπτικό εργαλείο.



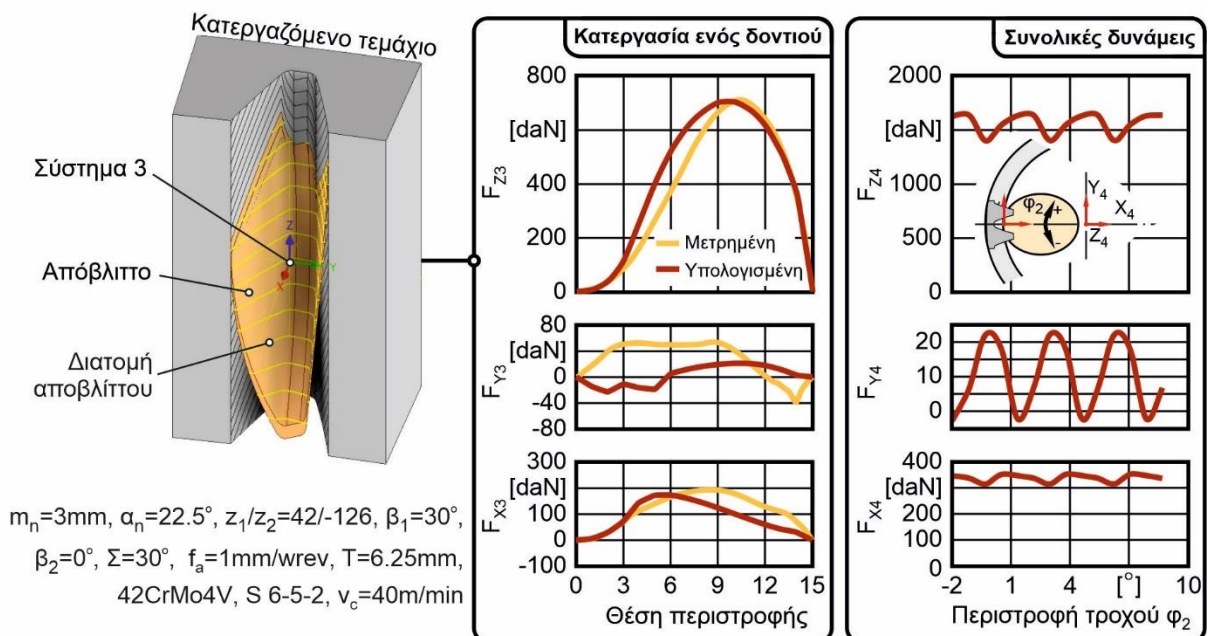
Σχήμα 4.11: Παράδειγμα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για περίπτωση εσωτερικής οδόντωσης

4.4 Δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Η διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων στην αποφλοίωση με κύλιση δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από την πλάνιση με κύλιση. Η βασική διαφορά οφείλεται στη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων, η οποία σε αντίθεση με την πλάνιση με κύλιση μεταβάλλεται πάντα σε όλο το μήκος τους. Έτσι οι δυνάμεις διαφέρουν σε κάθε θέση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Για τον λόγο αυτόν ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται αρχικά στις διατομές του αποβλίπτου, όπως αυτές έχουν υπολογιστεί στα επίπεδα των θέσεων περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και στη συνέχεια ακολουθεί ο μετασχηματισμός τους στα υπόλοιπα συστήματα του μοντέλου προσομοίωσης. Η διαδικασία είναι όμοια για ευθείες και πλάγιες οδοντώσεις.

Ο υπολογισμός των συνολικών δυνάμεων κοπής βασίζεται στην ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην πλάνιση με κύλιση. Στην περίπτωση της αποφλοίωσης με κύλιση αρκεί να συναθροιστούν όλες οι δυνάμεις που αναπτύσσονται ταυτόχρονα από διαφορετικά κοπτικά δόντια. Σε αντίθεση με την πλάνιση με κύλιση, όπου κάθε δόντι κατεργάζεται ένα αυλάκι σε διαφορετική θέση κύλισης, στην αποφλοίωση με κύλιση κάθε δόντι βρίσκεται σε διαφορετική θέση περιστροφής επί της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου και κατεργάζεται διαφορετικό αυλάκι. Έτσι, για τον υπολογισμό των συνολικών δυνάμεων, πρέπει και πάλι να υπολογιστεί η διαφορά των θέσεων περιστροφής μεταξύ δύο διαδοχικών κοπτικών δοντιών. Η συγκεκριμένη ποσότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.14), όπου αντί για το βήμα θ_1 χρησιμοποιείται πλέον το βήμα φ_1 που συμβολίζει το βήμα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου στην αποφλοίωση με κύλιση.

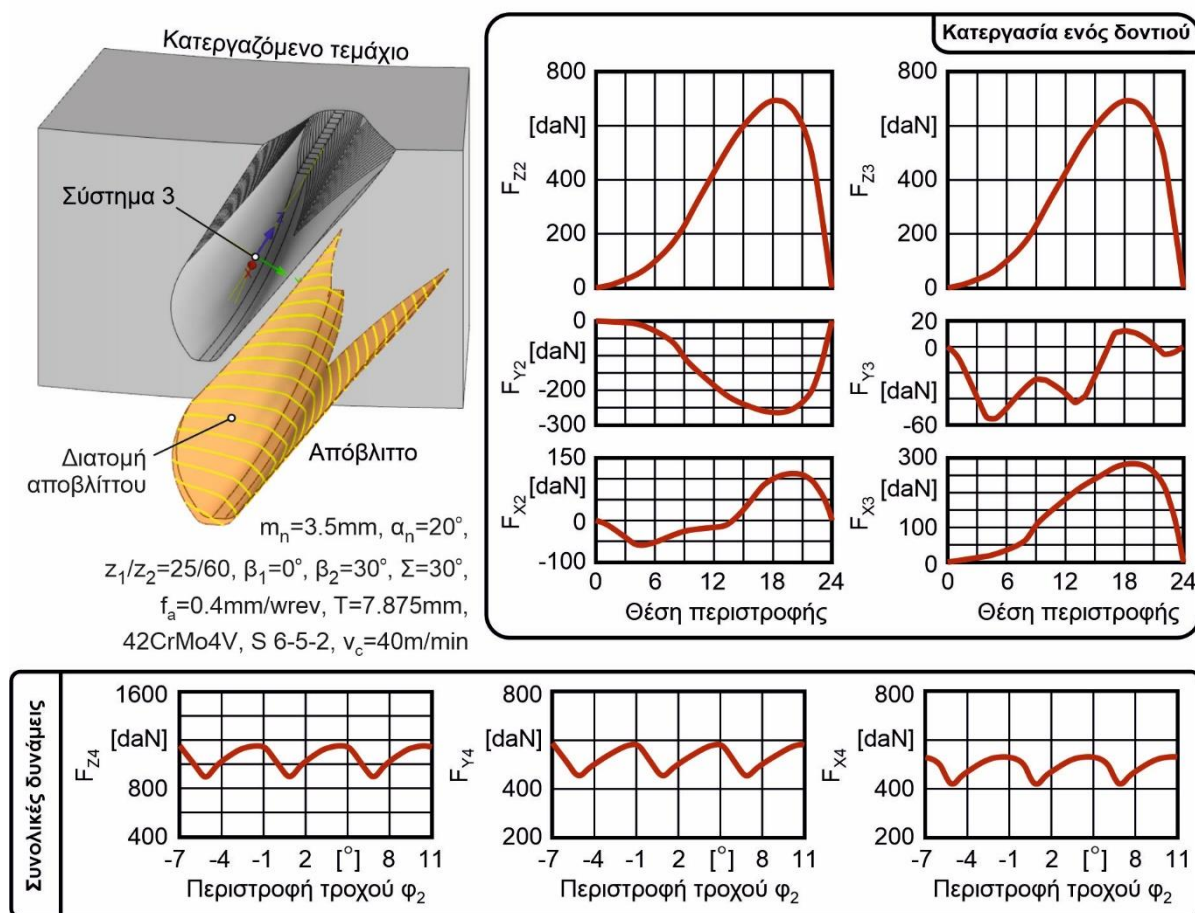
Η επαλήθευση των υπολογισμένων δυνάμεων γίνεται και πάλι σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις από τη βιβλιογραφία. Έτσι για τη σύγκριση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε περίπτωση ευθείας εσωτερικής οδόντωσης από το μοντέλο του Jansen [31] για κατεργαζόμενο υλικό 42CrMo4V. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων παρουσιάζονται στο [σχήμα 4.12](#).



Σχήμα 4.12: Επιβεβαίωση των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση

Εμφανής είναι και στην περίπτωση της αποφλοίσωσης με κύλιση η καλή προσέγγιση των υπολογισμένων δυνάμεων με τις αντίστοιχες πειραματικά μετρημένες δυνάμεις. Λιγότερο ικανοποιητική είναι και πάλι η σύγκριση των δυνάμεων στην κατεύθυνση Y του συστήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα ίδια φαινόμενα που αναφέρθηκαν κατά τη σύγκριση των δυνάμεων στην πλάνιση με κύλιση και δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας του μοντέλου. Κατά τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής, τόσο στην πλάνιση όσο και στην αποφλοίσωση με κύλιση, είναι πολύ σημαντικός ο σωστός προσδιορισμός των ειδικών αντιστάσεων κοπής K_s , K_R , K_V , καθώς και των σταθερών κατεργαζόμενου υλικού x , y , z που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις υπολογισμού των δυνάμεων (4.1) έως (4.3). Οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων καθορίζουν έμμεσα το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και την ταχύτητα κοπής που χρησιμοποιείται στην περίπτωση κατεργασίας. Οι σωστές τιμές των μεταβλητών αυτών εξασφαλίζουν ότι οι υπολογισμένες δυνάμεις μπορούν να συγκριθούν με τη δεδομένη πειραματική περίπτωση κατεργασίας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο αντλήθηκαν από κατάλληλους πίνακες τιμών των παραμέτρων, όπως αυτές έχουν ήδη υπολογιστεί πειραματικά για πλήθος συνδυασμών υλικών και ταχυτήτων κοπής από τους Köhlig και Essel το 1973 [84].

Στο **σχήμα 4.13** παρουσιάζεται μία περίπτωση υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για κατεργασία πλάγιας εξωτερικής οδόντωσης. Παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής στα επίπεδα διατομής του αποβλίπτου στο σύστημα 2, οι δυνάμεις στο σύστημα 3 στο υπολογισμένο αυλάκι καθώς και οι συνολικές δυνάμεις στο σύστημα 4 του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 4.13: Παράδειγμα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής σε πλάγια οδόντωση στην αποφλοίσωση με κύλιση



Λογισμικό προσομοίωσης κατεργασιών οδοντώσεων OPLITIS

5.1 Παρουσίαση του λογισμικού

Η αποτελεσματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθιστά απαραίτητη τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου, αξιόπιστου και φιλικού γραφικού περιβάλλοντος χρήστη. Έτσι αναπτύχθηκε το λογισμικό Oplitis, το οποίο στοχεύει στην προσομοίωση των κατεργασιών κοπής οδοντώσεων και προσφέρει στον χρήστη ένα σύνολο από λειτουργίες στις οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται η εκτέλεση και η ανάκτηση προσομοιώσεων κατεργασιών, η προβολή όλων των διατομών των αποβλήτων της περίπτωσης κοπής, η παρουσίαση διαγραμμάτων των δυνάμεων κοπής κ.λπ.. Η εκτέλεση του λογισμικού γίνεται μέσα από το περιβάλλον του Inventor μέσω του αντίστοιχου εικονιδίου που βρίσκεται στην καρτέλα των πρόσθετων εφαρμογών. Το βασικού μενού του λογισμικού παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, μέσω του οποίου δίνεται αρχικά η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής κατεργασίας. Για κάθε κατεργασία που επιλέγεται ανοίγει η κύρια φόρμα της, από την οποία γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων από τον χρήστη, η προσομοίωση της στο περιβάλλον CAD και η εκτέλεση όλων των λειτουργιών σχετικά με αυτή.



Σχήμα 5.1: Κεντρικό μενού του λογισμικού

Στην κύρια φόρμα κάθε κατεργασίας περιλαμβάνεται ένα σύνολο από πεδία και επιλογές για την εισαγωγή των δεδομένων του κατεργαζόμενου τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου και των συνθηκών κατεργασίας. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον πίνακα 5.1 και για τις δύο κατεργασίες. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων πραγματοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι για την εγκυρότητά τους, ενώ σε περίπτωση λανθασμένης εισόδου γίνεται εκ νέου εισαγωγή τους. Παραδείγματα λανθασμένης εισαγωγής δεδομένων περιλαμβάνουν τον αρνητικό αριθμό του μέτρου οδόντωσης, δεκαδικό αριθμό δοντιών, εισαγωγή χαρακτήρων αντί αριθμών στις παραμέτρους, έλεγχος υψηλών και χαμηλών ορίων, κ.λπ.. Σημειώνεται ότι ένας αρνητικός αριθμός δοντιών του κατεργαζόμενου τεμαχίου ορίζει την εκτέλεση προσομοίωσης για εσωτερικό οδοντωτό τροχό.

Ορισμένες παράμετροι εισόδου απευθύνονται σε μία μόνο κατεργασία και αποσκοπούν σε πολύ συγκεκριμένες παραμετροποιήσεις της προσομοίωσης γι' αυτήν. Συγκεκριμένα για την πλάνιση με κύλιση η παράμετρος Chip Levels αναφέρεται στα επίπεδα κατά μήκος του

αποβλήτου στα οποία θα υπολογιστούν οι διατομές του. Για ένα επίπεδο η διατομή ορίζεται στη μέση του αποβλήτου. Για τρία επίπεδα ή περισσότερα επίπεδα οι διατομές κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του αποβλήτου. Η παράμετρος Trajectory Levels αποτελεί το σύνολο των κοπτικών κατατομών που θα δημιουργηθούν για τη μετέπειτα κατασκευή του στερεού της τρισδιάστατης τροχιάς του κοπτικού εργαλείου. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των επιπέδων, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια της παραγόμενης τροχιάς, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια όλων των υπολογισμένων μεγεθών.

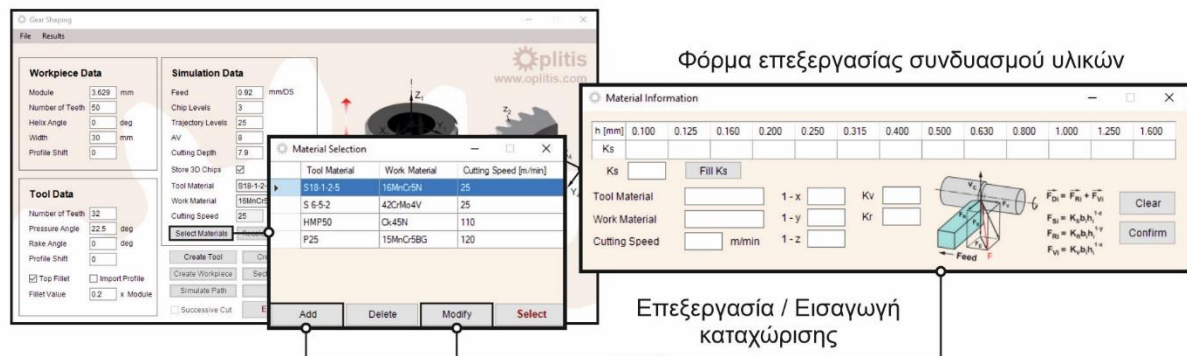
Κατεργαζόμενο τεμάχιο		
	Module	Μέτρο οδόντωσης [mm]
	Number of Teeth	Αριθμός των δοντιών
	Helix Angle	Γωνία ελίκωσης [°]
	Width	Πλάτος οδοντωτού τροχού [mm]
	Profile Shift	Μετατόπιση κατατομής
Κοπτικό εργαλείο		
	Number of Teeth	Αριθμός των δοντιών
	Pressure Angle	Γωνία πίεσης [°]
	Rake Angle	Γωνία αποβλήτου [°]
	Helix Angle	Γωνία ελίκωσης [°]
	Profile Shift	Μετατόπιση κατατομής
	Top Fillet	Επιλογή για εισαγωγή τόξου στην κεφαλή της κοπτικής κατατομής
	Fillet Value	Τιμή τόξου στην κεφαλή της κοπτικής κατατομής ως πολλαπλάσιο του μέτρου οδόντωσης
	Import Profile	Επιλογή για εισαγωγή προσαρμοσμένου προφίλ του κοπτικού εργαλείου σε μορφή αρχείου κειμένου
Δεδομένα κατεργασίας		
Πλάνιση με κύλιση	Feed	Πρόωση κύλισης [mm/DS]
	Chip Levels	Επίπεδα αποβλήτου πλάγιας οδόντωσης
	Trajectory Levels	Επίπεδα διαχωρισμού τροχιάς κοπτικού εργαλείου
	AV	Πλάγια μετατόπιση κοπτικού εργαλείου [mm]
Αποφλοιώση με κύλιση	Axial Feed	Αξονική πρόωση [mm/wrev]
	Ang. Step Factor	Παράγοντας προσδιορισμού του γωνιακού βήματος του κοπτικού εργαλείου ως πολλαπλάσιο του βήματος του αρχικού κύκλου
	Cutting Depth	Βάθος κοπής [mm]
	Store 3D Chips	Επιλογή για αποθήκευση τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλήτων
	Successive Cut	Επιλογή για εκτέλεση της προσομοίωσης σε διαδοχικό βάθος κοπής με τιμή που ορίζεται στην παράμετρο cutting depth. Προϋποθέτει ολοκληρωμένη προσομοίωση μικρότερου βάθους κοπής

Πίνακας 5.1: Δεδομένα εισαγωγής στις κύριες φόρμες του λογισμικού προσομοίωσης

Η παράμετρος Ang. Step Factor στην αποφλοίωση με κύλιση αντιστοιχεί στον παράγοντα k , ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του γωνιακού βήματος ϕ_1 του κοπτικού εργαλείου κατά τον υπολογισμό της τροχιάς του. Ο εν λόγω υπολογισμός αναλύεται και στην ενότητα 3.4.2. Τέλος, η παράμετρος Store 3D Chip, η οποία υπάρχει και στις δύο κατεργασίες, ορίζει ως ενεργή την αποθήκευση της γεωμετρίας των τρισδιάστατων απαραμόρφωτων αποβλίπτων για την περίπτωση της κατεργασίας που προσομοιώνεται. Η ενεργοποίηση της επιλογής αυτής ελαττώνει σημαντικά την ταχύτητα εκτέλεσης της προσομοίωσης, γεγονός που προκύπτει από την ταυτόχρονη προσωρινή αποθήκευση των τρισδιάστατων αποβλίπτων στη μνήμη του συστήματος.

5.2 Κύριες φόρμες κατεργασίας

Στην κύρια φόρμα κάθε κατεργασίας ορίζεται από τον χρήστη ο συνδυασμός υλικών για τα οποία θα γίνει ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής Select Materials όπου εμφανίζεται μία νέα φόρμα επιλογής και επεξεργασίας υλικών, η οποία παρουσιάζεται στο [σχήμα 5.2](#). Κάθε καταχώρηση αποτελεί ένα συνδυασμό της ταχύτητας κοπής και των υλικών του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Με την επιλογή Add δίνεται η δυνατότητα προσθήκης μίας νέας καταχώρησης συνδυασμού υλικών και ταχύτητας κοπής. Για την προσθήκη απαιτείται η συμπλήρωση των πεδίων, όπως αυτά παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα. Αυτά περιλαμβάνουν τα ονόματα των υλικών και την τιμή της ταχύτητας κοπής, αλλά κυρίως τις τιμές των ειδικών παραμέτρων κοπής και των σταθερών υλικού, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις σχέσεις υπολογισμού των δυνάμεων κοπής. Ειδικά για την ειδική παράμετρο της κύριας δύναμης κοπής K_s , είναι απαραίτητο να οριστούν διαφορετικές τιμές της για διαφορετικά εύρη τιμών του πάχους του αποβλίπτου. Με την επιλογή Clear γίνεται διαγραφή των καταχωρημένων δεδομένων, ενώ με την εντολή Confirm γίνεται επιβεβαίωση της καταχώρισης. Όπως απεικονίζεται, παρέχονται οι λειτουργίες επεξεργασίας και διαγραφής μίας καταχώρησης, μέσω των επιλογών Modify και Delete.

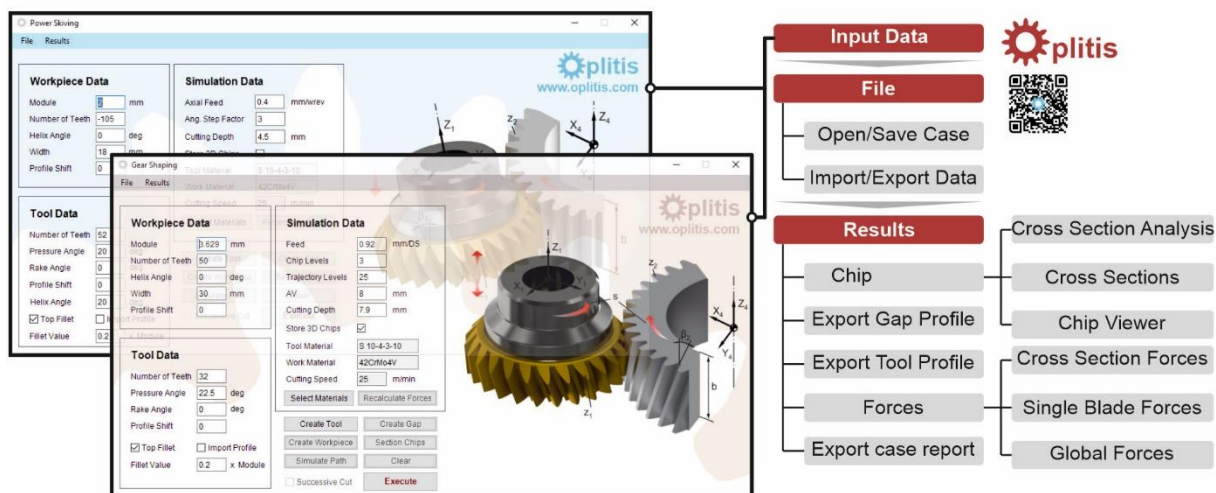


Σχήμα 5.2: Φόρμα επεξεργασίας υλικών

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων προσφέρεται η δυνατότητα εκτέλεσης ολόκληρης της προσομοίωσης ή των επιμέρους λειτουργιών ξεχωριστά, οι οποίες περιλαμβάνουν:

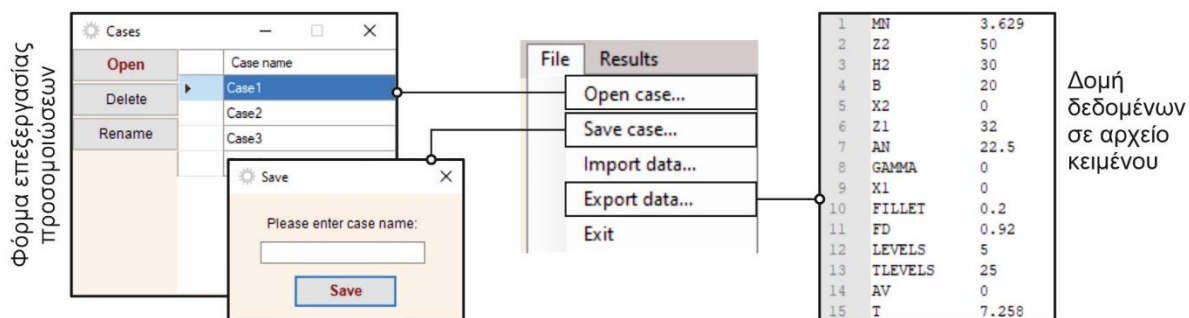
- Δημιουργία της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου (Create Tool).
- Δημιουργία κατεργαζόμενου τεμαχίου (Create Workpiece).
- Προσδιορισμός της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου (Simulate Path).
- Προσομοίωση της κινηματικής και παραγωγή τρισδιάστατου αυλακιού (Create Gap).
- Υπολογισμός των διατομών των αποβλίπτων και των δυνάμεων κοπής (Section Chip).

Η βασική λειτουργικότητα του λογισμικού παρέχεται μετά το πέρας εκτέλεσης μίας προσομοίωσης, όπου δίνεται η δυνατότητα προβολής των παραγόμενων αποτελεσμάτων μέσω διαφόρων επιλογών των μενού της κύριας φόρμας. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται στις καρτέλες File και Results και αναπτύσσονται σύμφωνα με το διάγραμμα του [σχήματος 5.3](#).



Σχήμα 5.3: Δομή επιλογών πτυσσόμενων μενού της κύριας φόρμας κάθε κατεργασίας

Η καρτέλα File προσφέρει τις δυνατότητες φόρτωσης και αποθήκευσης των προσομοιώσεων καθώς και την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων στα πεδία της κύριας φόρμας της κατεργασίας. Στο [σχήμα 5.4](#) παρουσιάζεται η φόρμα επεξεργασίας των αποθηκευμένων περιπτώσεων καθώς και ένα παράδειγμα εξαγωγής των δεδομένων της κατεργασίας σε μορφή αρχείου κειμένου. Το αρχείο κειμένου μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ίδια δομή για την αυτόματη εισαγωγή των δεδομένων στην κύρια φόρμα. Για μία αποθηκευμένη προσομοίωση παρέχονται επιπλέον οι δυνατότητες διαγραφής της και μετονομασίας του ονόματος αποθήκευσης.



Σχήμα 5.4: Φόρμα επεξεργασίας αποθηκευμένων προσομοιώσεων και αρχείο εξαγωγής δεδομένων

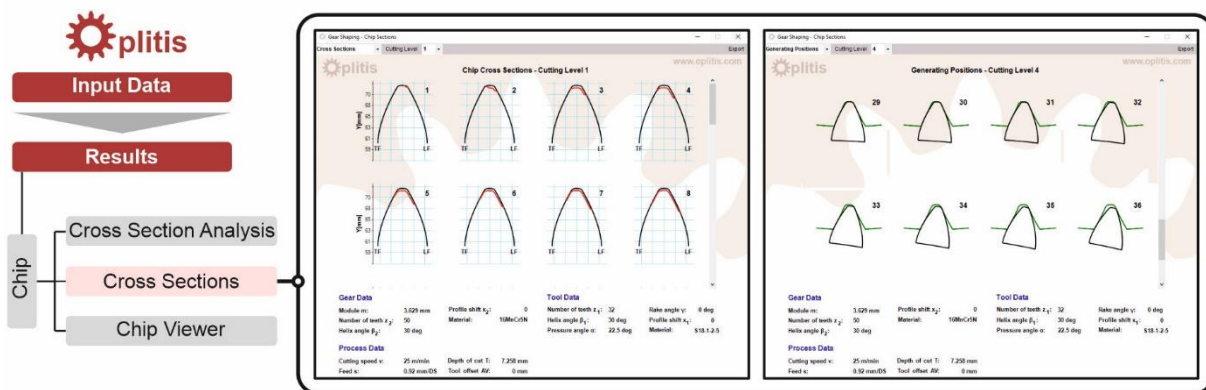
5.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού

Η πρόσβαση στα αποτελέσματα του μοντέλου γίνεται από την καρτέλα Results, τα οποία χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Chip:** Αποτελέσματα που σχετίζονται με τα απαραμόρφωτα τρισδιάστατα απόβλητα που προέκυψαν από την προσομοίωση, τη γεωμετρία των διατομών τους, το πάχος τους και την επιφάνειά τους.
- **Forces:** Αποτελέσματα των υπολογισμών των δυνάμεων κοπής σύμφωνα με τον δεδομένο συνδυασμό υλικών και ταχύτητας κοπής.

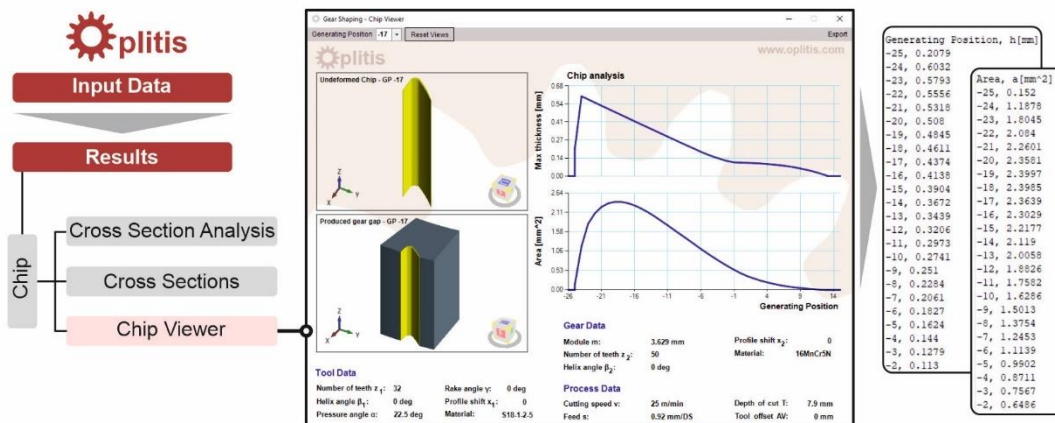
- Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις κατεργασίες οδοντώσεων πλάνισης και αποφλοίωσης με κύλιση

Οι δύο παραπάνω επιλογές είναι διαθέσιμες στις περισσότερες φόρμες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι η επιλογή της εξαγωγής αρχείου κειμένου σχετίζεται πάντα με την εξαγωγή των τιμών των αντίστοιχων διαγραμμάτων που παρουσιάζονται στις φόρμες του λογισμικού. Η φόρμα Chip Sections είναι υπεύθυνη για την παρουσίαση όλων των θέσεων κύλισης ή των θέσεων περιστροφής της περίπτωσης κατεργασίας, καθώς και όλων των διατομών του αποβλήτου σε κάθε θέση. Στο [σχήμα 5.6](#) απεικονίζεται ενδεικτικά η παρουσίαση τόσο των θέσεων κύλισης αλλά και των διατομών κάθε θέσης για μία περίπτωση κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση.



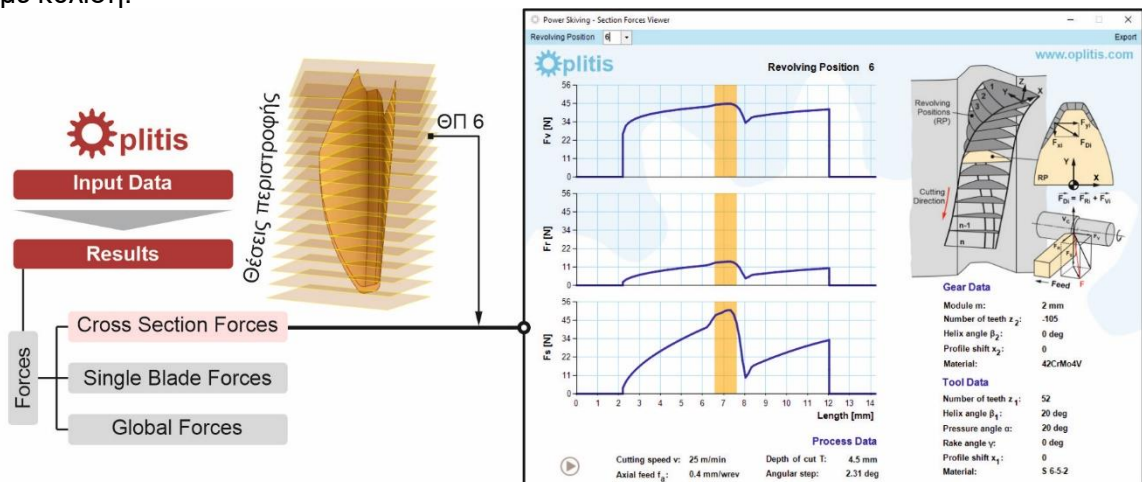
Σχήμα 5.6: Φόρμα συνολικής παρουσίασης των θέσεων κύλισης/περιστροφής και των διατομών του αποβλήτου

Η παρουσίαση των πληροφοριών σχετικά με τα απαραμόρφωτα απόβλητα ολοκληρώνεται με τη φόρμα Chip Viewer, η οποία είναι υπεύθυνη για την απεικόνιση της τρισδιάστατης γεωμετρίας τους. Έτσι ο χρήστης αφού επιλέξει μία θέση κύλισης, έχει τη δυνατότητα προβολής της γεωμετρίας τόσο του απαραμόρφωτου αποβλήτου, αλλά και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, όπως αυτό έχει προκύψει έως την επιλεγμένη θέση. Για την προβολή των στερεών παρέχονται οι λειτουργίες μετακίνησης, μεγέθυνσης και περιστροφής τους, καθώς και προβολή συγκεκριμένων τους όψεων μέσω ενός κύβου χειρισμού. Σημειώνεται ότι στην κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση, λόγω της ομοιομορφίας των αποβλήτων που παράγονται, απεικονίζεται ένα μόνο απόβλητο στην εν λόγω φόρμα. Στην ίδια φόρμα παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέγιστου πάχους και συνολικής επιφάνειας των αποβλήτων για κάθε διατομή τους. Στο [σχήμα 5.7](#) παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο αυτής της φόρμας για τη θέση κύλισης -17 στην πλάνιση με κύλιση, καθώς και οι τιμές των διαγραμμάτων όπως αυτές εξάγονται σε αρχείου κειμένου.



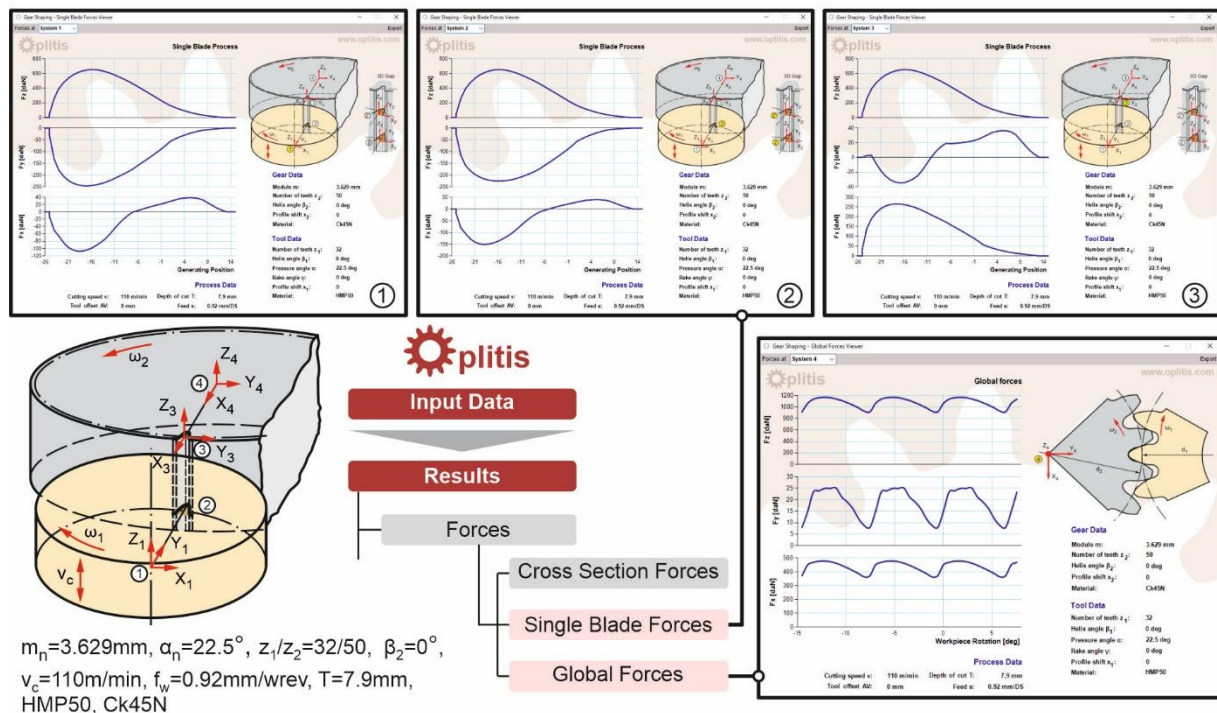
Σχήμα 5.7: Φόρμα παρουσίασης της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλήτων

Η επόμενη επιλογή της καρτέλας Results αφορά τα αποτελέσματα των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής, όπου παρέχονται και εδώ τρεις φόρμες παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Μέσω της επιλογής Cross Section Components παρέχεται η δυνατότητα αναλυτικής προβολής των τιμών των στοιχειωδών δυνάμεων F_v , F_R και F_s , όπως αυτές έχουν υπολογιστεί σε κάθε διατομή του αποβλίπτου σύμφωνα με τις εξισώσεις των Kienzle – Victor. Έτσι οι τιμές των δυνάμεων, όπως και στη φόρμα παρουσίασης του πάχους του αποβλίπτου για κάθε διατομή, δίνονται συναρτήσει του αναπτύγματος της κοπτικής ακμής. Παράδειγμα παρουσίασης ενός τέτοιου υπολογισμού απεικονίζεται στο σχήμα 5.8 για μία θέση περιστροφής στην αποφλοίωση με κύλιση.



Σχήμα 5.8: Φόρμα παρουσίασης των στοιχειωδών δυνάμεων στη διατομή του αποβλίπτου

Η παρουσίαση των δυνάμεων ολοκληρώνεται με δύο επιπλέον φόρμες, στις οποίες προβάλλονται τα διαγράμματα των συνολικών δυνάμεων της κατεργασίας, αλλά και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ένα κοπτικό δόντι.

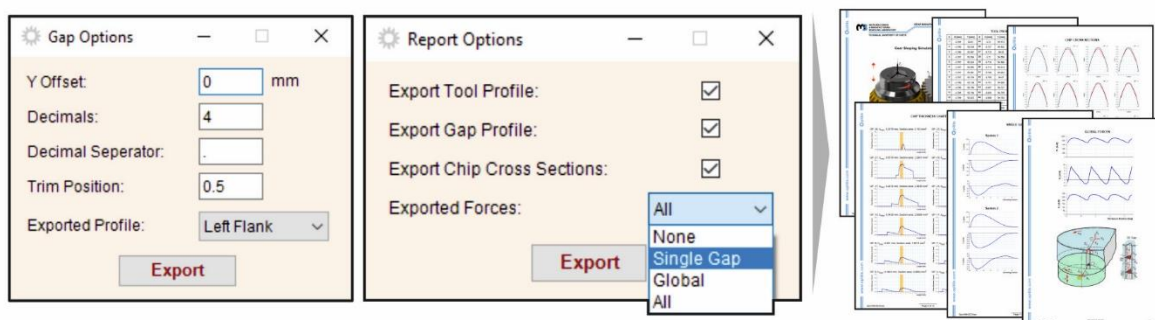


Σχήμα 5.9: Φόρμες παρουσίασης των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής σε διαφορετικά συστήματα. Περίπτωση κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση

Για τις δυνάμεις ενός δοντιού δίνεται η δυνατότητα επιλογής του συστήματος υπολογισμού τους, ενώ οι συνολικές δυνάμεις υπολογίζονται στο σύστημα 4 στο κέντρο του οδοντωτού τροχού. Σημειώνεται ότι οι τιμές και η μορφή των διαγραμμάτων των δυνάμεων σχετίζονται άμεσα με τον συνδυασμό υλικών που έχει επιλεγεί για την περίπτωση υπολογισμού. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αλλαγής του συνδυασμού υλικών από την κεντρική φόρμα της κατεργασίας, με ταυτόχρονο επανυπολογισμό των δυνάμεων κοπής μέσω της επιλογής Recalculate Forces στην ίδια φόρμα. Έτσι δεν απαιτείται εκ νέου προσομοίωση της ίδιας περίπτωσης κατεργασίας μετά από αλλαγή των επιλεγμένων υλικών. Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι φόρμες που αναφέρθηκαν για περίπτωση κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση.

Οι επιπρόσθετες επιλογές της καρτέλας Results περιλαμβάνουν την εξαγωγή των παρειών του κοπτικού εργαλείου και του υπολογισμένου αυλακιού, αλλά και τη δημιουργία ολοκληρωμένης αναφοράς των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα για την εξαγωγή των σημείων της γεωμετρίας του αυλακιού ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει τις παρακάτω παραμέτρους που σχετίζονται με την εξαγωγή:

- Y offset: Παράμετρος μετατόπισης συντεταγμένων ως προς τον Y άξονα.
- Decimals: Αριθμός δεκαδικών ψηφίων εξαγωγής των σημείων.
- Decimal Separator: Ορισμός συμβόλου υποδιαστολής των δεκαδικών ψηφίων.
- Trim Position: Παράμετρος που ορίζει τη θέση του επιπέδου τομής ως προς το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με εύρος τιμών από 0 έως 1. Ως 0.5 ορίζεται το μέσον του πλάτους του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Exported Profile: Επιλογή της παρειάς του αυλακιού για εξαγωγή. Δυνατότητα εξαγωγής της αριστερής, της δεξιάς παρειάς ή όλου του αυλακιού.



Σχήμα 5.10: Φόρμες επιλογών για την εξαγωγή της γεωμετρίας του αυλακιού και της αναφοράς αποτελεσμάτων

Αντίστοιχα για τη δημιουργία μίας αναφοράς αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, προσδιορίζεται το περιεχόμενο της σύμφωνα με τις εξής επιλογές:

- Export Tool profile: Επιλογή εξαγωγής των σημείων της κατατομής του κοπτικού εργαλείου με τη μορφή συντεταγμένων.
- Export Gap Profile: Επιλογή για εξαγωγή των σημείων της κατατομής ολόκληρου του αυλακιού με τη μορφή συντεταγμένων για τομή στο μέσο του πλάτους του οδοντωτού τροχού.
- Export Chip Cross Sections: Επιλογή για εξαγωγή των διαγραμμάτων της γεωμετρίας διατομών των αποβλίπτων ανά θέση κύλισης ή ανά θέση περιστροφής, καθώς και των αντίστοιχων διαγραμμάτων του πάχους του αποβλίπτου ανά διατομή.

- Exported Forces: Επιλογή των διαγραμμάτων των δυνάμεων κοπής που θα συμπεριληφθούν στην αναφορά. Οι διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν τις δυνάμεις ενός κοπτικού δοντιού, τις συνολικές δυνάμεις ή καμία από αυτές.

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι φόρμες επιλογών για την εξαγωγή του προφίλ του αυλακιού και της αναφοράς αποτελεσμάτων. Η αποθήκευση των αρχείων για όλες τις παραπάνω επιλογές εξαγωγών πληροφοριών από το λογισμικό, πραγματοποιείται στη θέση που προσδιορίζεται από τον χρήστη.



Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής

Το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση πλήθους προσομοιώσεων, με σκοπό την εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων κάθε κατεργασίας στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται. Ο τρόπος που επιδρά κάθε παράμετρος στις δυνάμεις κοπής αποτελεί σημαντική πληροφορία για την μετέπειτα βελτιστοποίηση κάθε κατεργασίας, μέσω της κατάλληλης επιλογής των παραμέτρων της. Η σωστή επιλογή των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται, οι οποίες έχουν άμεσο αντίκτυπο στη φθορά των κοπτικών εργαλείων και κατά συνέπεια στον χρόνο ζωής τους. Έτσι για κάθε παράμετρο επιλέχθηκε ένα σύνολο τιμών για τις οποίες θα αναλυθεί η επίδραση στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Για την ανάλυση της επιρροής μίας παραμέτρου, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της κατεργασίας διατηρούνται σταθερές.

6.1 Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας για την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Οι παράμετροι μίας προσομοίωσης μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: Τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου και τις παραμέτρους σχετικά με τις συνθήκες κοπής της κατεργασίας. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για καθεμία από τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

Μέτρο οδόντωσης, m_n [mm]	2	4	6	8	10	
Αριθμός δοντιών, z_2	30	60	90	120	150	
Γωνία ελίκωσης, β_2 [°]	0	10	20	30		
Αριθμός δοντιών, z_1	20	40	60	80	100	120
Γωνία αποβλίπτου, γ [°]	0	4	8	12	16	
Πρόωση κύλισης, f_w [mm/DS]	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
Βάθος κοπής, T [mm]	$1.25m_n$	$1.5m_n$	$1.75m_n$	$2m_n$	$2.25m_n$	

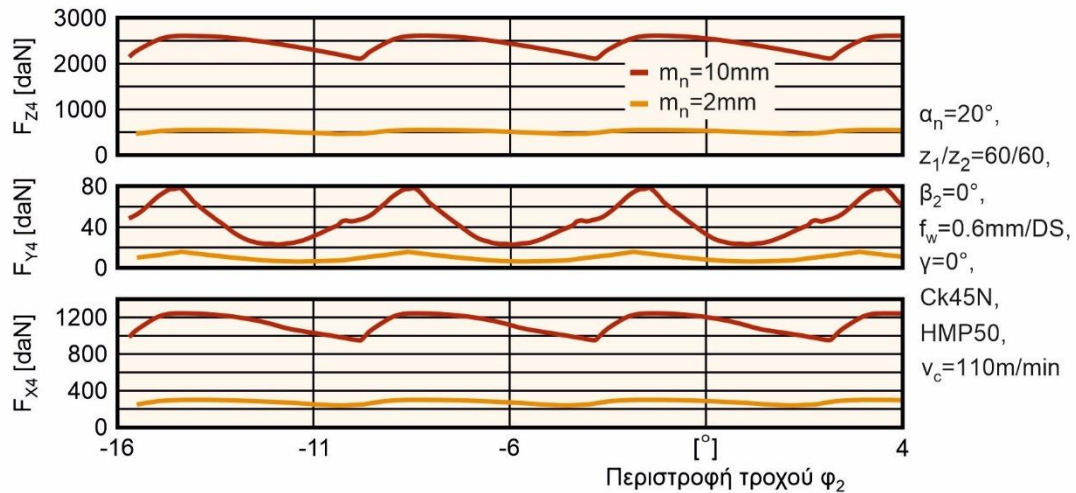
Πίνακας 6.1: Τιμές εξεταζόμενων παραμέτρων στην πλάνιση με κύλιση

6.1.1 Επίδραση των παραμέτρων του κατεργαζόμενου τεμαχίου στις δυνάμεις κοπής

Οι παράμετροι της κατεργασίας που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι το μέτρο οδόντωσης, ο αριθμός των δοντιών και η γωνία ελίκωσης. Η πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε είναι το μέτρο οδόντωσης. Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι συνολικές δυνάμεις κοπής στο σύστημα 4 για δύο διαφορετικές τιμές του μέτρου οδόντωσης. Όπως παρατηρείται στο σχήμα, οι συνιστώσες των συνολικών δυνάμεων που αναπτύσσονται για μέτρο οδόντωσης 2mm είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες δυνάμεις για μέτρο οδόντωσης 10mm.

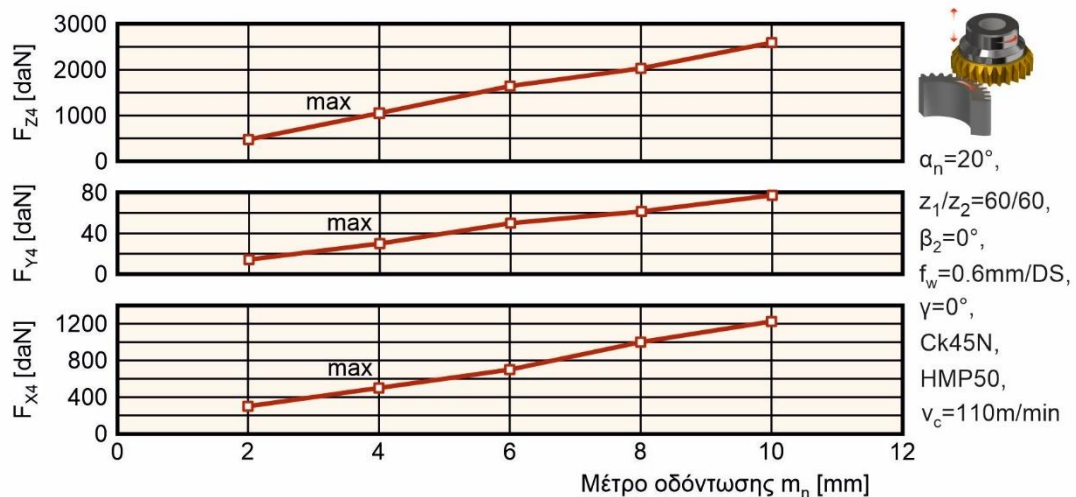
Συγκεκριμένα, τα μέτρα των δυνάμεων για όλες τις συνιστώσες X, Y και Z φαίνεται να πενταπλασιάζονται στην περίπτωση της κατεργασίας με μέτρο οδόντωσης 10mm σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τους για μέτρο οδόντωσης 2mm. Η αύξηση που παρατηρείται αποδίδεται στο μεγαλύτερο μέγεθος του αυλακιού που παράγεται, το οποίο είναι άμεσο αποτέλεσμα του μεγαλύτερου μέτρου οδόντωσης. Επιπλέον, η πρόωση κύλισης παραμένει σταθερή στην

κατεργασία, γεγονός το οποίο έχει ως αντίκτυπο να μην επηρεάζεται ο αριθμός των θέσεων κύλισης που απαιτούνται για τον σχηματισμό ενός αυλακιού. Έτσι, τα απόβλιπτα που παράγονται σε κάθε θέση κύλισης έχουν μεγαλύτερο πάχος, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τις δυνάμεις κοπής της κατεργασίας. Συνεπώς αναμενόμενη είναι η αύξηση των δυνάμεων κοπής και ιδιαίτερα της συνιστώσας δύναμης στην κατεύθυνση Z, η οποία εφόσον είναι κάθετη στη διατομή του αποβλίπτου δεν επηρεάζεται από αλληλεξουδετερώσεις τιμών, όπως συμβαίνει στις συνιστώσες X και Y.



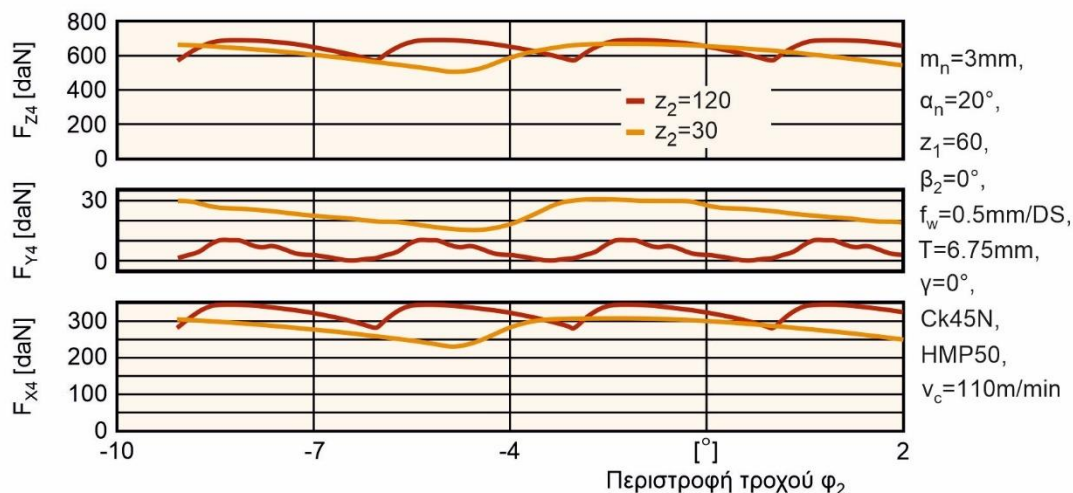
Σχήμα 6.1: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό διαφορετικού μέτρου οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση

Μία συνολική σύγκριση των δυνάμεων κοπής για διαφορετικά μέτρα οδόντωσης παρουσιάζεται στο [σχήμα 6.2](#). Με σκοπό τη συνοπτική παρουσίαση των υπολογισμένων τιμών, για τις συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής σε κάθε περίπτωση. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής αυξάνονται γραμμικά όσο αυξάνεται το μέτρο οδόντωσης. Επομένως, μπορεί να γενικευτεί ότι η αύξηση του μέτρου οδόντωσης επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα και στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται.



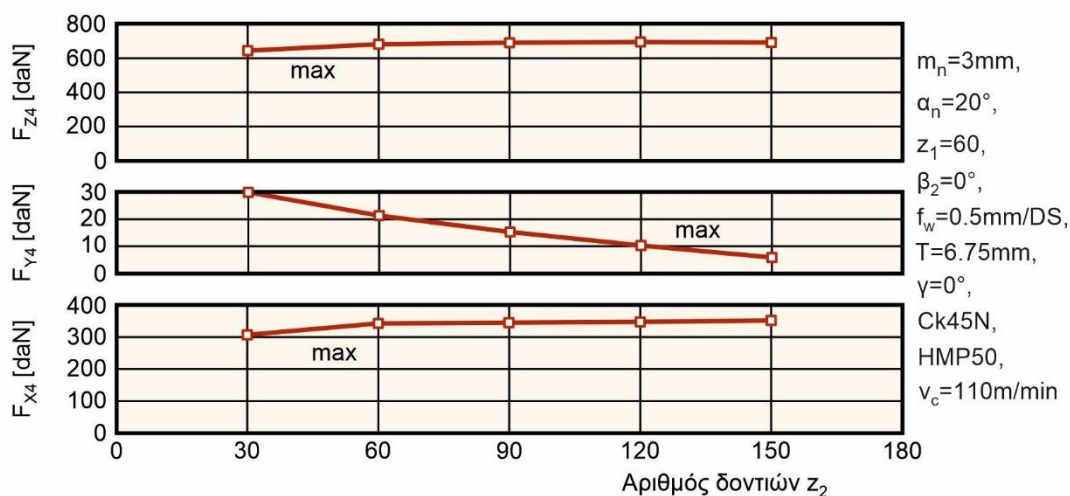
Σχήμα 6.2: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του μέτρου οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση

Η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε είναι ο αριθμός των δοντιών του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η σύγκριση των συνολικών δυνάμεων κοπής για δύο οδοντωτούς τροχούς διαφορετικού αριθμού δοντιών.



Σχήμα 6.3: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό διαφορετικού αριθμού δοντιών στην πλάνιση με κύλιση

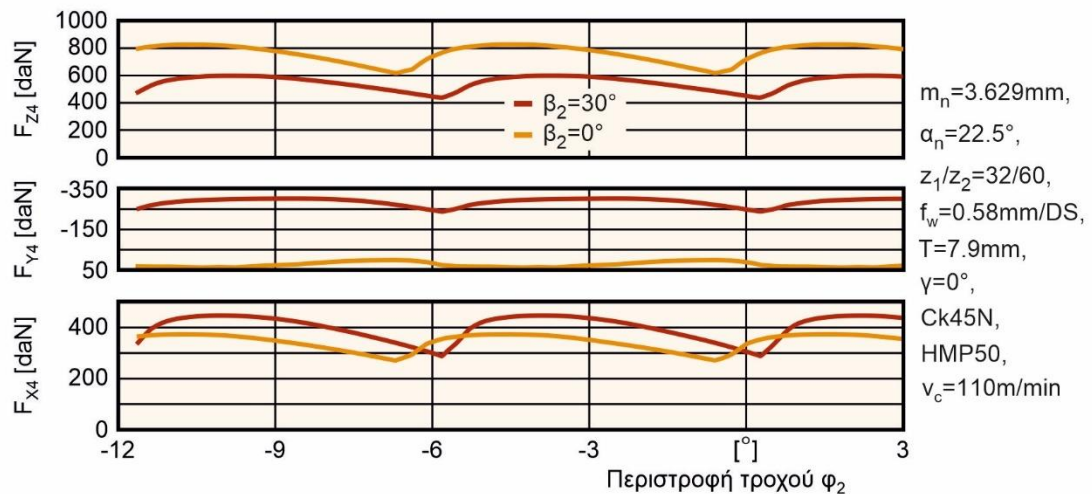
Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παρατηρείται μικρή αύξηση των δυνάμεων κοπής στις συνιστώσες X και Z, ενώ οι δυνάμεις κοπής στην κατεύθυνση Y μειώνονται ελαφρώς για τον οδοντωτό τροχό με τα περισσότερα δόντια. Διατηρώντας σταθερό το μέτρο οδόντωσης και αυξάνοντας τον αριθμό των δοντιών του κατεργαζόμενου τροχού, οδηγεί σε αύξηση της εξωτερικής του διαμέτρου. Συνεπώς, για τη μορφοποίηση ενός αυλακιού, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός θέσεων κύλισης. Συγκεκριμένα στην κατεργασία του οδοντωτού τροχού 120 δοντιών απαιτούνται 80 θέσεις κύλισης, ενώ στην κατεργασία του οδοντωτού τροχού 30 δοντιών απαιτούνται μόλις 61 θέσεις κύλισης. Έτσι στην περίπτωση του μεγαλύτερου αριθμού δοντιών δημιουργούνται περισσότερα και λεπτότερα απόβλιπτα για την κατεργασία ενός αυλακιού. Ταυτόχρονα, η αυξημένη εξωτερική διάμετρος προκαλεί αύξηση της περιοχής εμπλοκής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τα παραπάνω φαινόμενα επεξηγούν και τη συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία.



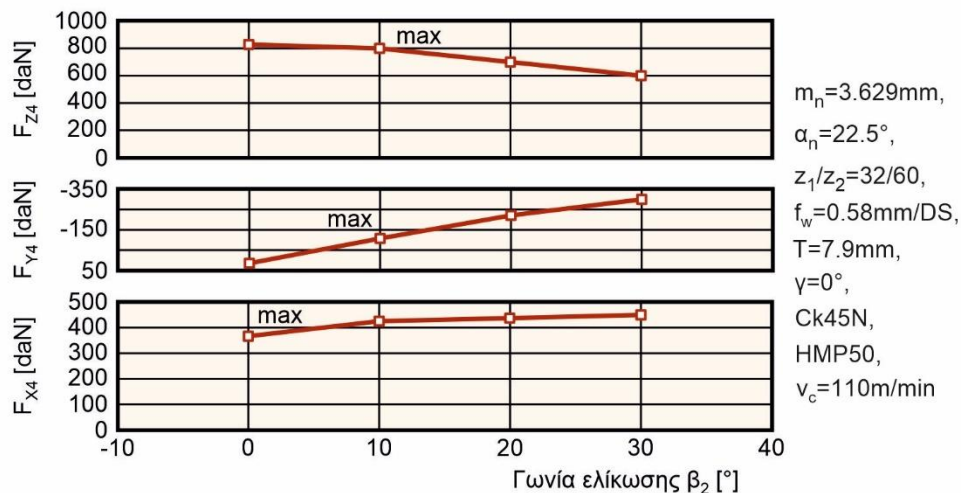
Σχήμα 6.4: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού στην πλάνιση με κύλιση

Έπειτα από ανάλυση των δυνάμεων για περισσότερες τιμές του αριθμού των δοντιών του κατεργαζόμενου τεμαχίου, παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά στις δυνάμεις κοπής όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 6.4](#). Επιπλέον, οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής τείνουν να πλησιάζουν μία σταθερή τιμή όσο αυξάνεται ο αριθμός των δοντιών του κατεργαζόμενου τροχού, γεγονός που αιτιολογείται από τη μορφή του παραγόμενου αυλακιού. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των δοντιών, ο όγκος του αυλακιού αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, συγκλίνοντας σε ένα σταθερό μέγεθος.

Η τελευταία παράμετρος του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού που εξετάστηκε είναι η γωνία ελίκωσης. Στο [σχήμα 6.5](#) παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται για έναν οδοντωτό τροχό με γωνία ελίκωσης 30° σε σχέση με έναν οδοντωτό τροχό ευθείας οδόντωσης. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα, οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής X και Y παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της ευθείας οδόντωσης. Αντίθετα, η κύρια δύναμη κοπής στην κατεύθυνση Z φαίνεται να μειώνεται στην περίπτωση της πλάγιας οδόντωσης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη διαφορετική γεωμετρία των αποβλήτων που παράγονται στις πλάγιες οδοντώσεις.



Σχήμα 6.5: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής μεταξύ οδοντωτών τροχών ευθείας και πλάγιας οδόντωσης στην πλάνιση με κύλιση

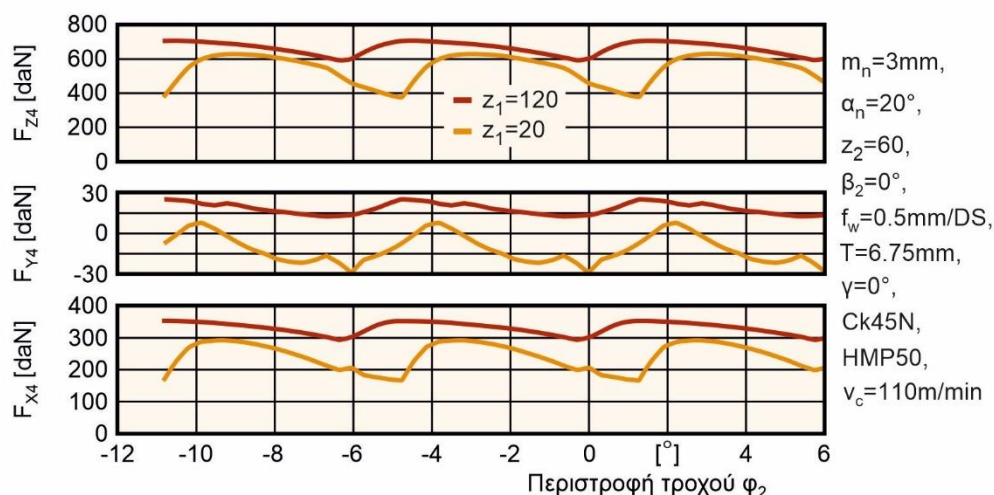


Σχήμα 6.6: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της γωνίας ελίκωσης στην πλάνιση με κύλιση

Συγκεκριμένα, η κλίση της κοπτικής κατατομής του κοπτικού εργαλείου λόγω της γωνίας ελίκωσης σε συνδυασμό με τη διαφορετική γεωμετρία των αποβλίπτων που παράγονται, προκαλεί μείωση της επιφάνειας των διατομών των αποβλίπτων, μειώνοντας την κύρια δύναμη κοπής και αυξάνοντας τις δύο άλλες συνιστώσες. Η συμπεριφορά των δυνάμεων αποδεικνύεται παρόμοια για διαφορετικές τιμές της γωνίας ελίκωσης, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 6.6](#).

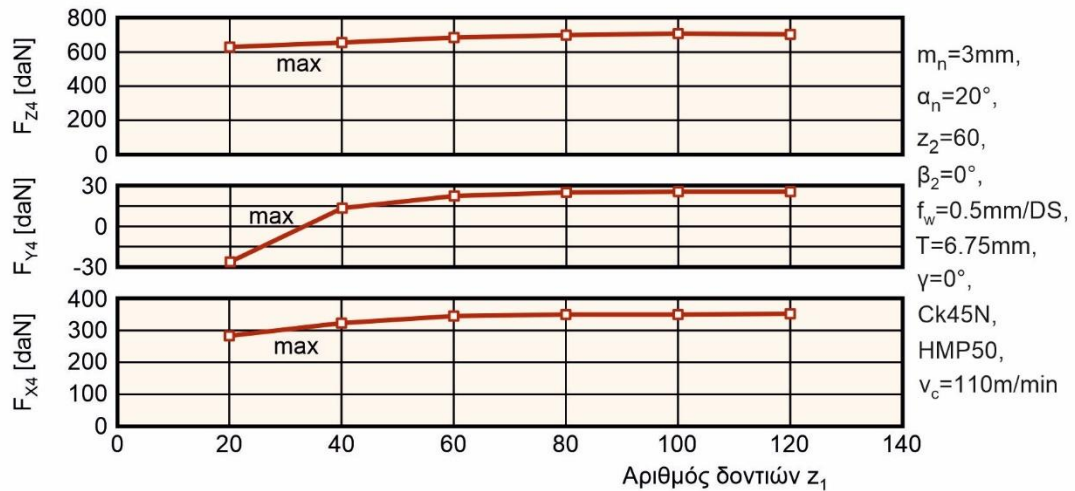
6.1.2 Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης των παραμέτρων του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, ακολουθεί η ανάλυση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Οι παράμετροι αυτές είναι ο αριθμός των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και η γωνία αποβλίπτου. Αρχικά εξετάστηκε η επίδραση του αριθμού των δοντιών στις δυνάμεις κοπής. Στο [σχήμα 6.7](#) παρουσιάζεται η σύγκριση των δυνάμεων που αναπτύσσονται για κοπτικά εργαλεία με 20 και 120 δόντια.



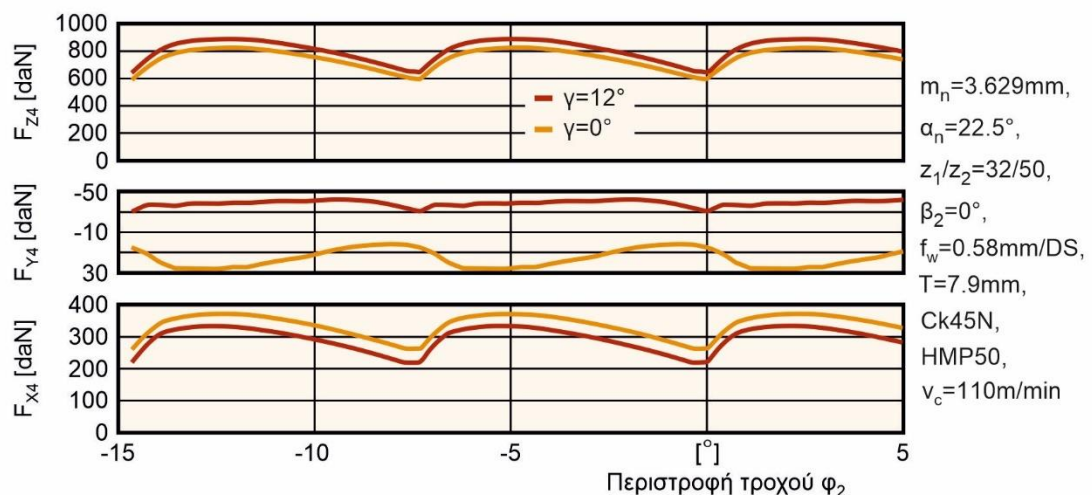
Σχήμα 6.7: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για κοπτικό εργαλείο διαφορετικού αριθμού δοντιών στην πλάνιση με κύλιση

Σύμφωνα με τις υπολογισμένες τιμές των διαγραμμάτων, όλες οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής αυξάνονται για κοπτικό εργαλείο μεγαλύτερου αριθμού δοντιών. Όπως και στην περίπτωση της ανάλυσης του αριθμού των δοντιών του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, έτσι και στην παρούσα περίπτωση η αύξηση του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου αυξάνει την εξωτερική του διάμετρο. Συνεπώς αναμένεται η ίδια συμπεριφορά με την αντίστοιχη ανάλυση για τον κατεργαζόμενο οδοντωτό τροχό. Οι θέσεις κύλισης είναι περισσότερες για μεγαλύτερο αριθμό δοντιών, γεγονός που προκαλεί την παραγωγή λεπτότερων αποβλίπτων, ενώ η περιοχή εμπλοκής κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι επίσης μεγαλύτερη, αυξάνοντας τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Στο [σχήμα 6.8](#) απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων για ένα σύνολο από περιπτώσεις διαφορετικού αριθμού δοντιών του κοπτικού εργαλείου. Μεταξύ μικρών τιμών του αριθμού δοντιών οι μεταβολές των δυνάμεων φαίνεται να είναι μεγαλύτερες. Αντίθετα, όσο ο αριθμός δοντιών παίρνει μεγάλες τιμές, οι μεταβολές των δυνάμεων οριακά εκμηδενίζονται. Το γεγονός αυτό επεξηγείται από τη μορφή της γεωμετρίας των κοπτικών δοντιών, τα οποία δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές όσο το πλήθος τους αυξάνεται. Επομένως, η περιοχή εμπλοκής κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των αναπτυσσόμενων δυνάμεων.



Σχήμα 6.8: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου στην πλάνιση με κύλιση

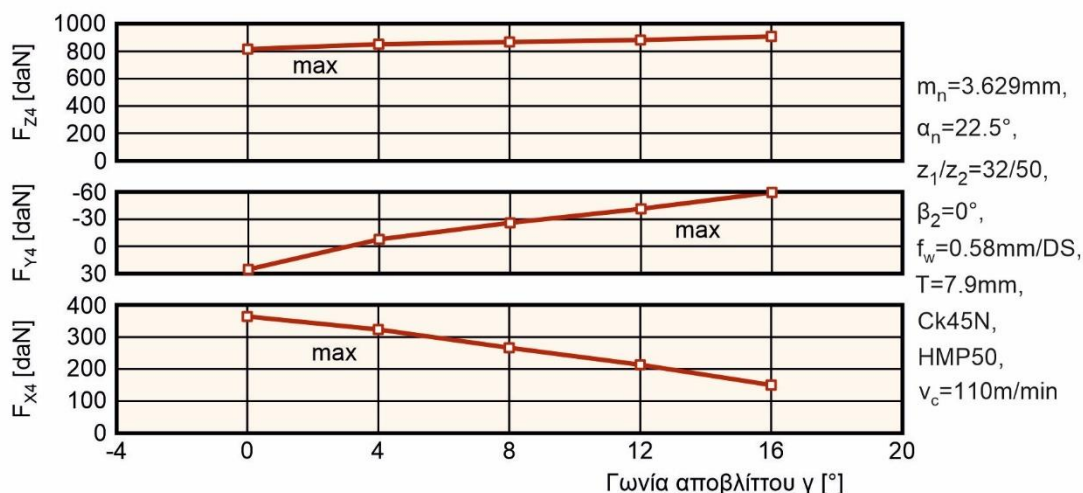
Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης των δυνάμεων για δύο διαφορετικές τιμές της γωνίας αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου. Όπως παρατηρείται στο σχήμα, οι δυνάμεις κοπής στις συνιστώσες Z και Y παρουσιάζουν μία ελαφριά αύξηση για γωνία αποβλίπτου 12° , ενώ η συνιστώσα στην κατεύθυνση X φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για γωνία αποβλίπτου με τιμή 0° . Όσο αυξάνεται η γωνία αποβλίπτου, μεγαλώνει η κλίση του επιπέδου τομής των αποβλίπτων σε κάθε θέση κύλισης. Η κλίση του επιπέδου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διατομών μεγαλύτερης επιφάνειας, ενώ όταν το επίπεδο τομής είναι κάθετο ως προς τον άξονα περιστροφής του οδοντωτού τροχού, η συνολική επιφάνεια κάθε διατομής έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Η μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής δικαιολογεί την αύξηση της κύριας δύναμης κοπής, ενώ πιθανές αλληλεξουδετερώσεις τιμών σε συνδυασμό με την αυξημένη κλίση της επιφάνειας διατομής επιφέρουν μειωμένες τιμές της δύναμης στην κατεύθυνση X.



Σχήμα 6.9: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για διαφορετική γωνία αποβλίπτου στην πλάνιση με κύλιση

Όπως αναμένεται, οι δυνάμεις κοπής θα έχουν την ελάχιστη τιμή για γωνία αποβλίπτου με τιμή 0° , ενώ θα αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της γωνίας του αποβλίπτου. Τα αναμενόμενα αποτελέσματα επαληθεύονται στο σχήμα 6.10, με εξαίρεση την συνιστώσα της δύναμης στην

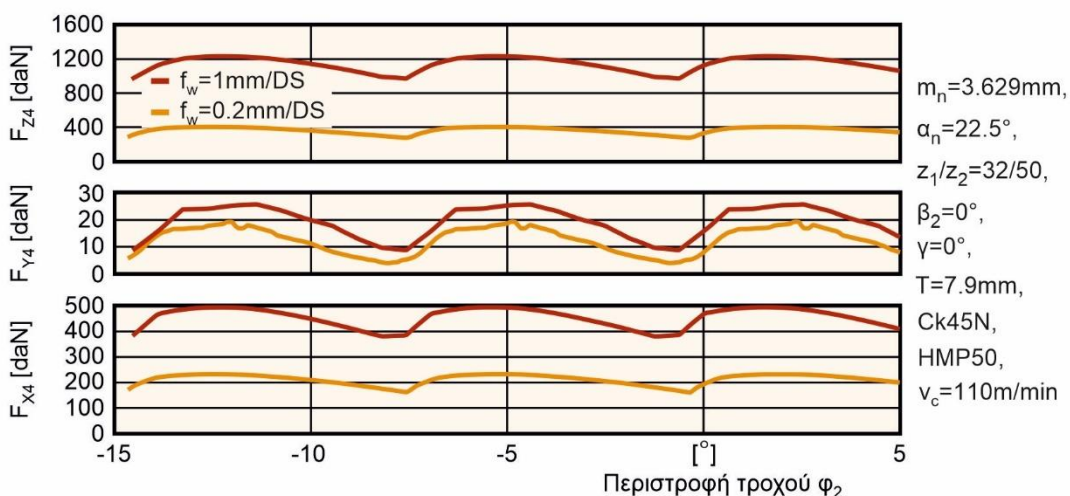
κατεύθυνση X της οποίας η συμπεριφοράς αποδίδεται στα φαινόμενα που περιγράφηκαν και στην περίπτωση του σχήματος 6.9.



Σχήμα 6.10: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της γωνίας αποβλίπτου στην πλάνιση με κύλιση

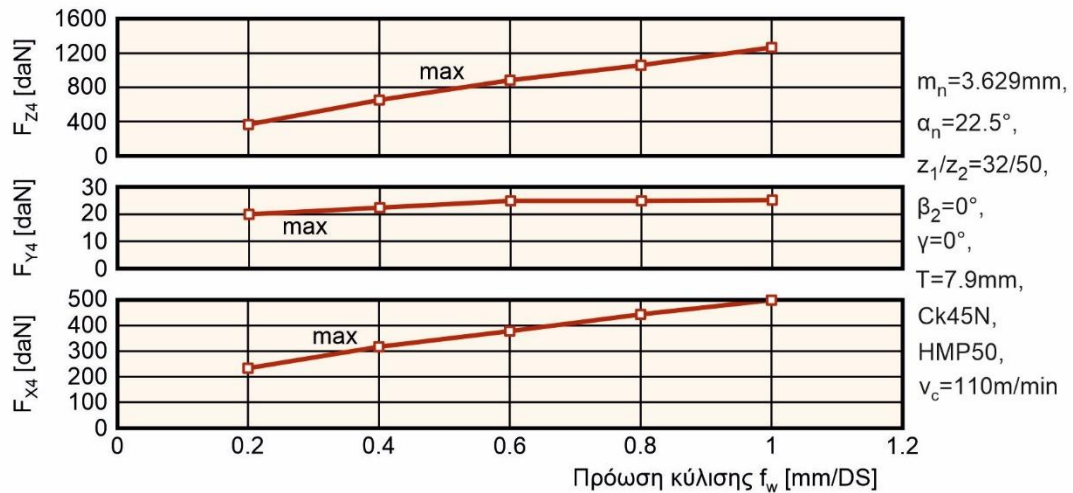
6.1.3 Επίδραση των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής

Οι δύο τελευταίες παράμετροι που εξετάστηκαν στην πλάνιση με κύλιση σχετίζονται με τις συνθήκες κοπής της κατεργασίας. Οι παράμετροι αυτές είναι η πρόωση κύλισης και το βάθος κοπής. Στο [σχήμα 6.11](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης των δυνάμεων για δύο περιπτώσεις κοπής με πρόωση κύλισης 0.2mm/DS και 1mm/DS. Όπως προκύπτει από τις υπολογισμένες τιμές των δυνάμεων, η συνιστώσα της κύριας δύναμης κοπής φαίνεται να τριπλασιάζεται για την τιμή της πρόωσης κύλισης 1mm/DS. Αντίστοιχα, οι συνιστώσες των δυνάμεων X και Y έχουν περίπου διπλάσιες τιμές σε σχέση με την περίπτωση της μικρότερης τιμής της πρόωσης κύλισης. Η συμπεριφορά αυτή των δυνάμεων κοπής μπορεί εύκολα να αιτιολογηθεί από την επίδραση της πρόωσης κύλισης στην κινηματική της κατεργασίας. Η πρόωση κύλισης επηρεάζει τη συχνότητα των εμβολισμών του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, μικρές τιμές της πρόωσης κύλισης οδηγούν σε αυξημένη συχνότητα εμβολισμών και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερο αριθμών θέσεων κύλισης της κατεργασίας.



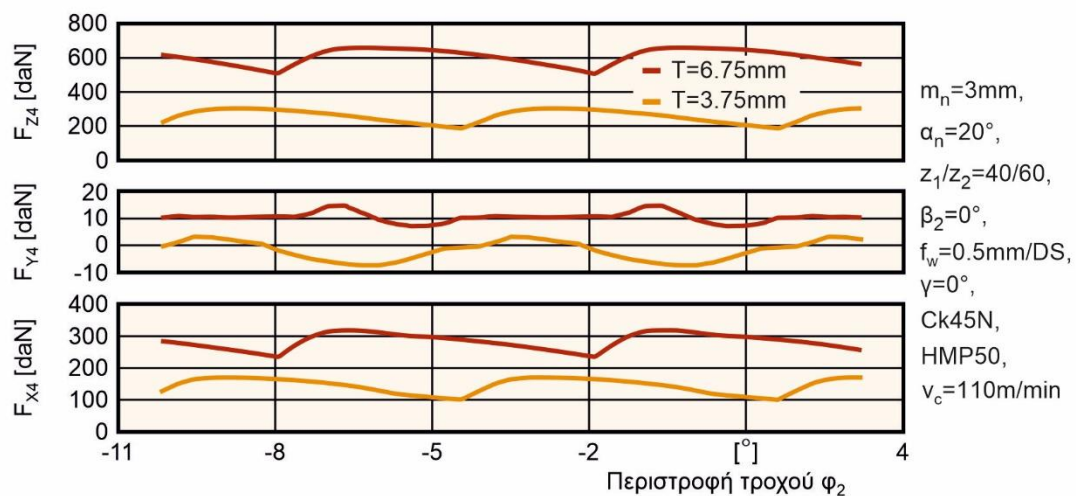
Σχήμα 6.11: Επίδραση της πρόωσης κύλισης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

Αντίθετα, μεγάλες τιμές της πρόωσης κύλισης επιφέρουν μείωση των θέσεων κύλισης στην κατεργασία, οδηγώντας στην παραγωγή λιγότερων αποβλίπτων μεγαλύτερου πάχους. Το αυξημένο πάχος των αποβλίπτων προκαλεί αύξηση των δυνάμεων κοπής και ιδιαίτερα της κύριας δύναμης κοπής στην κατεύθυνση Z. Τα αποτελέσματα γενικεύονται για διαφορετικές τιμές της πρόωσης κύλισης της κατεργασίας, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 6.12](#).



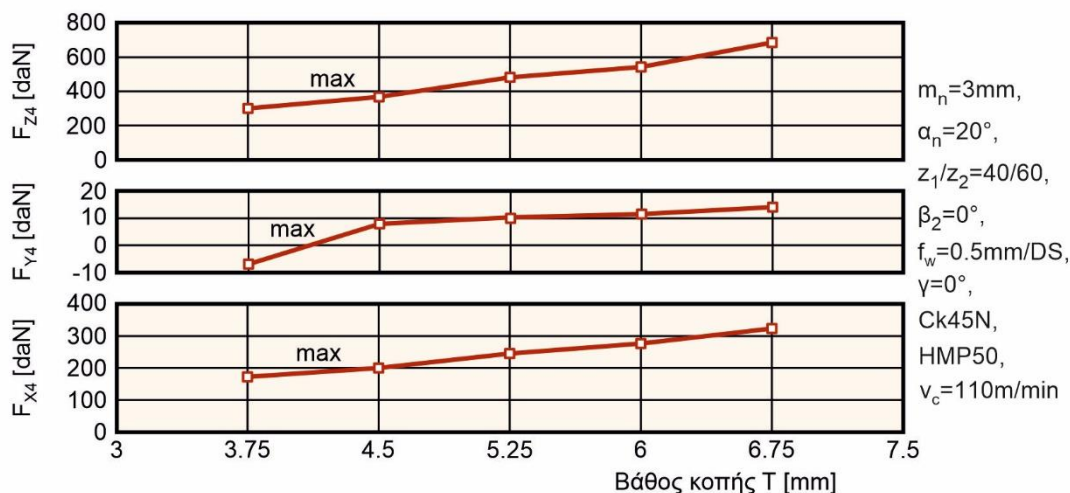
Σχήμα 6.12: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της πρόωσης κύλισης στην πλάνιση με κύλιση

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε είναι το βάθος κοπής της κατεργασίας. Στο [σχήμα 6.13](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για δύο τιμές του βάθους κοπής. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα διαγράμματα όλες οι συνιστώσες των δυνάμεων έχουν μεγαλύτερες τιμές για την περίπτωση κατεργασίας μεγαλύτερου βάθους κοπής. Το γεγονός αυτό προκύπτει άμεσα από τον ορισμό της παραμέτρου του βάθους κοπής. Πιο συγκεκριμένα το βάθος κοπής προσδιορίζει το μήκος της διείδυσης του κοπτικού εργαλείου εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Έτσι, μία μεγαλύτερη τιμή του βάθους κοπής θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αυλακιού μεγαλύτερου όγκου. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου αυλακιού απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός εμβολισμών, δεδομένου ότι η πρόωση κύλισης παραμένει σταθερή, επιφέροντας αύξηση των θέσεων κύλισης.



Σχήμα 6.13: Επίδραση του βάθους κοπής στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

Ταυτόχρονα τα απόβλιπτα που δημιουργούνται σε κάθε θέση κύλισης θα έχουν μεγαλύτερο πλάτος και μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής. Τα παραπάνω φαινόμενα αιτιολογούν και την αύξηση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής. Η συμπεριφορά των δυνάμεων γενικεύεται για διαφορετικές τιμές του βάθους κοπής, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του βάθους κοπής στην πλάνιση με κύλιση

6.2 Επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας για την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Η κατηγοριοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας της αποφλοίωσης με κύλιση είναι όμοια με αυτήν της πλάνισης με κύλιση. Έτσι ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την εξέταση της επιρροής τους στις δυνάμεις κοπής. Αρχικά εξετάζεται η επίδραση των παραμέτρων του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού, έπειτα η επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου και τέλος η επίδραση των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις που αναπτύσσονται. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για κάθε παράμετρο παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.

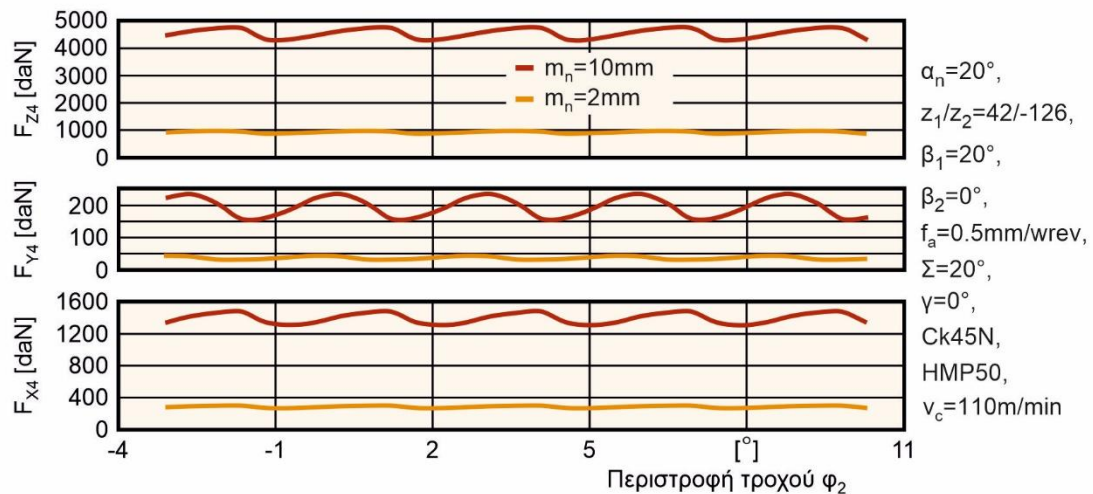
Μέτρο οδόντωσης, m_n [mm]	2	4	6	8	10	
Αριθμός δοντιών, z_2	30	60	90	120	150	
Γωνία ελίκωσης, β_2 [°]	0	10	20	30		
Αριθμός δοντιών, z_1	20	40	60	80	100	120
Αξονική πρόωση, f_a [mm/wrev]	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
Κλίση κοπτικού εργαλείου, Σ [°]	15	20	25	30		
Βάθος κοπής, T [mm]	$1.25m_n$	$1.5m_n$	$1.75m_n$	$2m_n$	$2.25m_n$	

Πίνακας 6.2: Τιμές εξεταζόμενων παραμέτρων στην αποφλοίωση με κύλιση

Σημειώνεται ότι, έχοντας ήδη εκπονήσει πλήθος προσομοιώσεων για την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων, αναμένεται ότι η συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής θα είναι παρόμοια και στην αποφλοίωση με κύλιση για τη μεταβολή των αντίστοιχων παραμέτρων. Επομένως, η αιτιολόγηση της συμπεριφοράς των αναπτυσσόμενων δυνάμεων θα δίνεται πιο συνοπτικά, εκτός των περιπτώσεων όπου συντρέχουν διαφορετικοί λόγοι των παρατηρούμενων συμπεριφορών, λόγω της ιδιαίτερης κινηματικής της κατεργασίας της αποφλοίωσης με κύλιση.

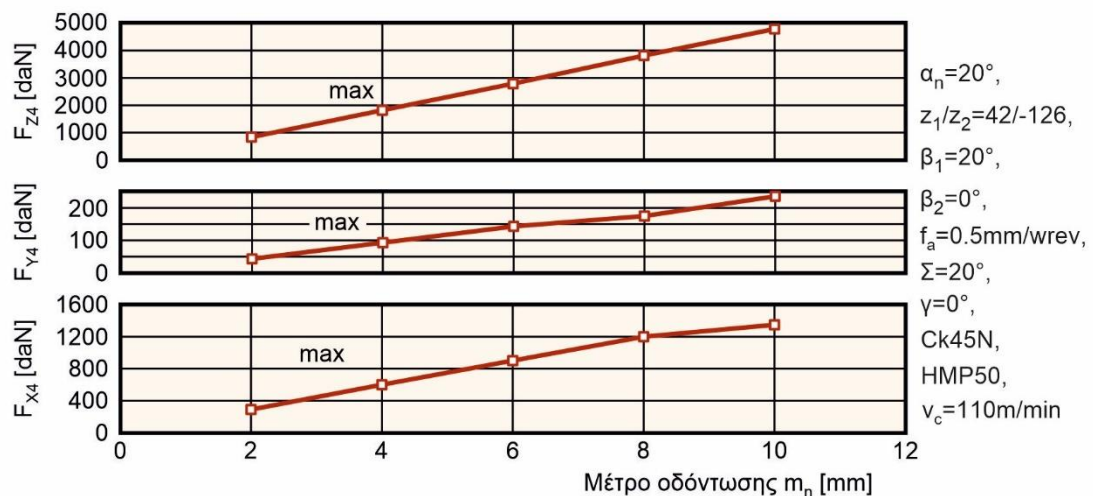
6.2.1 Επίδραση των παραμέτρων του κατεργαζόμενου τεμαχίου στις δυνάμεις κοπής

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού στην αποφλοιώση με κύλιση είναι το μέτρο οδόντωσης, ο αριθμός των δοντιών και η γωνία ελίκωσης. Έτσι, στο [σχήμα 6.15](#) παρουσιάζεται η σύγκριση των συνολικών δυνάμεων κοπής για διαφορετικές τιμές του μέτρου οδόντωσης, την πρώτη από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν. Όπως και στην πλάνιση με κύλιση, η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου οδόντωσης έχει άμεσο αντίκτυπο στις τιμές των δυνάμεων κοπής. Συγκεκριμένα τα απόβλιττα που παράγονται στην κατεργασία είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος, ως αποτέλεσμα του αυξημένου μεγέθους του αυλακιού και επομένως αυξάνεται και η επιφάνεια των διατομών των αποβλίττων σε κάθε θέση περιστροφής. Τα παραπάνω φαινόμενα επεξηγούν τον πολλαπλασιασμό των δυνάμεων κοπής σε όλες τις συνιστώσες για τιμή του μέτρου οδόντωσης 10mm.



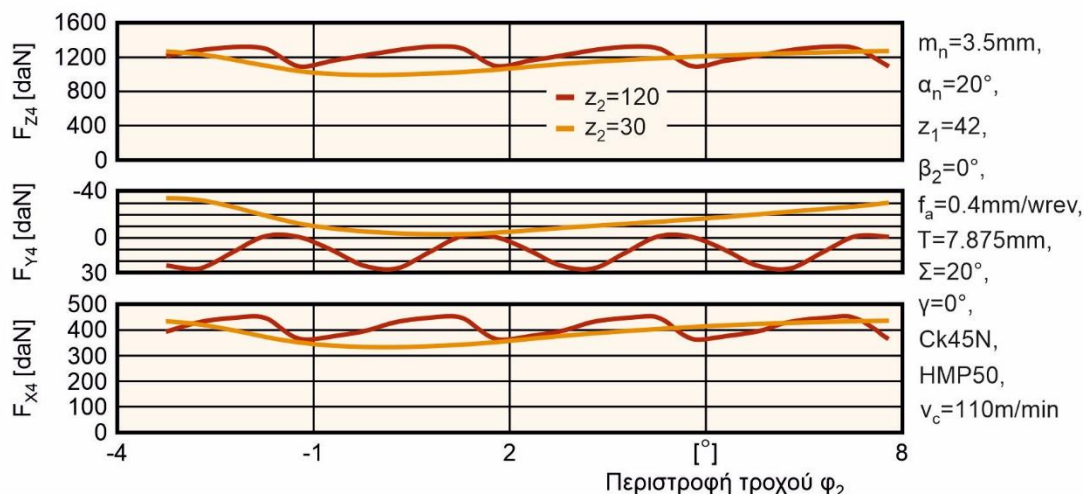
Σχήμα 6.15: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό διαφορετικού μέτρου οδόντωσης στην αποφλοιώση με κύλιση

Το φαινόμενο που παρατηρείται στο σχήμα 6.15 γενικεύεται για περισσότερες τιμές του μέτρου οδόντωσης. Συγκεκριμένα στο [σχήμα 6.16](#) παρατηρείται η γραμμική αύξηση των μέγιστων τιμών σε όλες τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής με την αύξηση του μέτρου οδόντωσης.



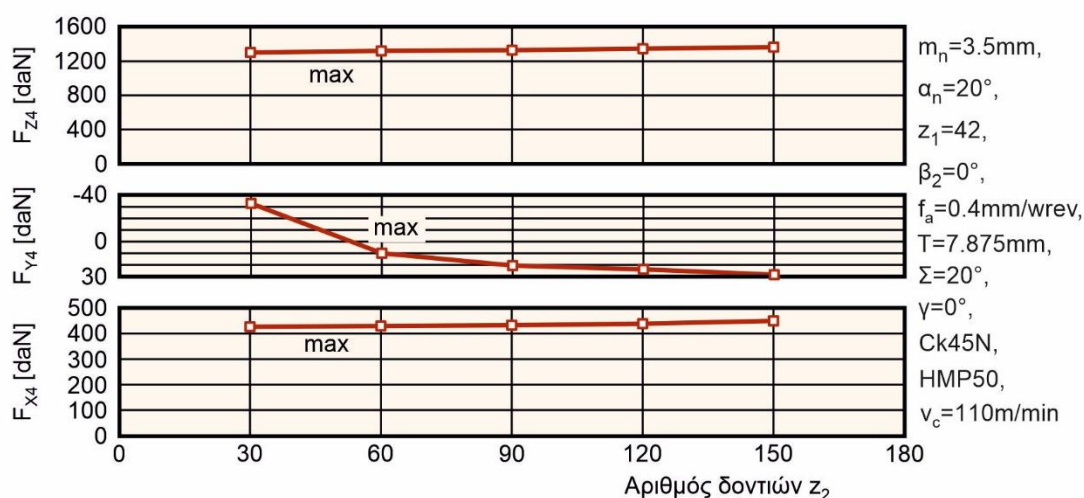
Σχήμα 6.16: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του μέτρου οδόντωσης στην αποφλοιώση με κύλιση

Στο σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η σύγκριση των δυνάμεων κοπής για τη δεύτερη εξεταζόμενη παράμετρο, τον αριθμό των δοντιών του οδοντωτού τροχού. Παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής για δύο τιμές του αριθμού των δοντιών. Η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι μικρή αύξηση των δυνάμεων στις συνιστώσες X και Z , ενώ για τη συνιστώσα Y μεταβάλλεται κυρίως η κατεύθυνσή της και ελαφρώς το μέτρο της. Οι συμπεριφορές αυτές αποδίδονται στη μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο του οδοντωτού τροχού με περισσότερα δόντια, γεγονός που αυξάνει την περιοχή εμπλοκής κατεργαζόμενου τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου και οδηγεί σε μικρή άνοδο των τιμών των δυνάμεων κοπής.



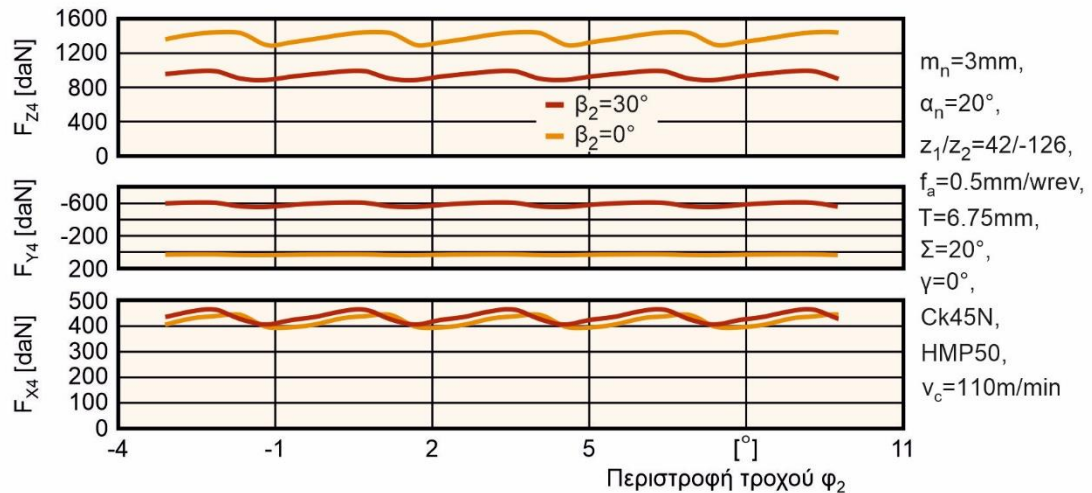
Σχήμα 6.17: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό διαφορετικού αριθμού δοντιών στην αποφλοίωση με κύλιση

Με βάση τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που εκπονήθηκαν για ένα σύνολο οδοντωτών τροχών διαφορετικού αριθμού δοντιών, επαληθεύεται η ανοδική τάση των δυνάμεων κοπής σε οδοντωτούς τροχούς με περισσότερα δόντια. Οι μέγιστες τιμές των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής παρουσιάζονται στο σχήμα 6.18. Χαρακτηριστική είναι και στην αποφλοίωση με κύλιση, η σύγκλιση των δυνάμεων κοπής σε μία σταθερή τιμή με την αύξηση του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού.



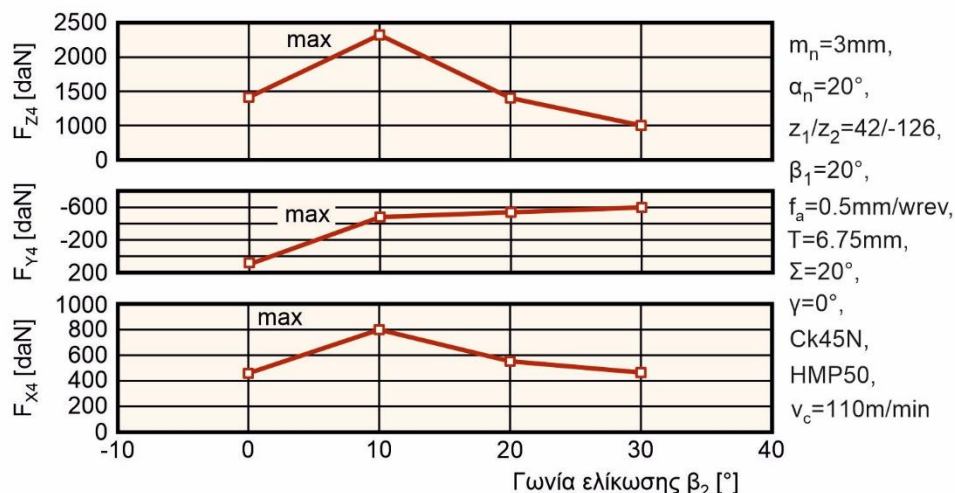
Σχήμα 6.18: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού στην αποφλοίωση με κύλιση

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε, σχετική με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού είναι η γωνία ελίκωσης. Στο [σχήμα 6.19](#) παρουσιάζεται η σύγκριση των συνολικών δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό ευθείας και πλάγιας οδόντωσης. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα η δύναμη κοπής στην κατεύθυνση Z φαίνεται να μειώνεται στην περίπτωση της πλάγιας οδόντωσης, σε αντίθεση με τις άλλες δύο συνιστώσες.



Σχήμα 6.19: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για οδοντωτό τροχό διαφορετικής γωνίας ελίκωσης στην αποφλοίωση με κύλιση

Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη διαφορετική γεωμετρία των αποβλίττων που παράγονται στην πλάγια οδόντωση. Επιπλέον, η μεγαλύτερη κλίση του κοπτικού εργαλείου στην περίπτωση της πλάγιας οδόντωσης (30°) αυξάνει την περιοχή κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Έτσι, τα απόβλιττα που παράγονται έχουν μεγαλύτερο μήκος και οι δυνάμεις κατανέμονται σε περισσότερες θέσεις περιστροφής. Ταυτόχρονα η περιοχή εμπλοκής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου αυξάνεται στην περίπτωση της πλάγιας οδόντωσης αυξάνοντας τις συνιστώσες των δυνάμεων X και Y. Στο [σχήμα 6.20](#) παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής για διαφορετικές τιμές της γωνίας ελίκωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις κοπής των πλάγιων οδοντώσεων χρησιμοποιήθηκε κοπτικό εργαλείο ευθείας οδόντωσης.

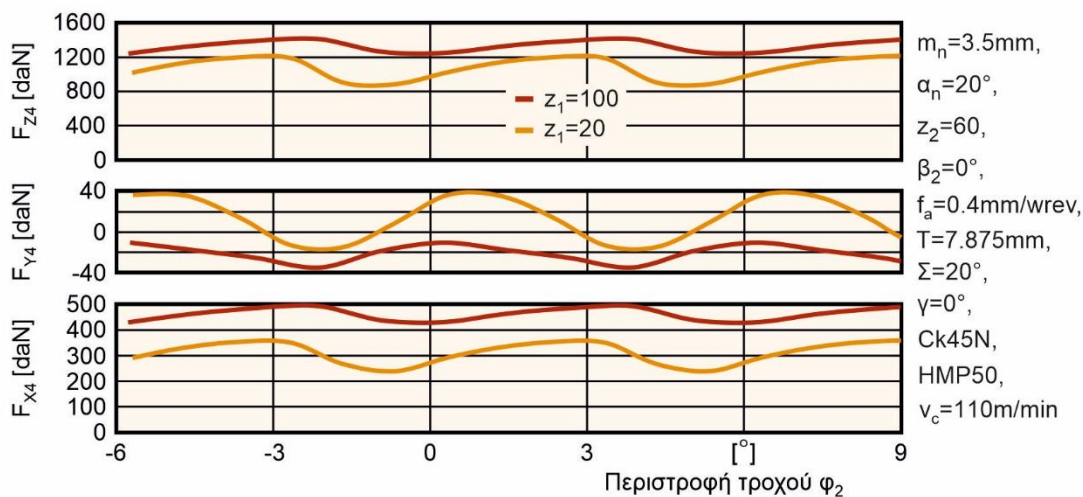


Σχήμα 6.20: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της γωνίας ελίκωσης του οδοντωτού τροχού στην αποφλοίωση με κύλιση

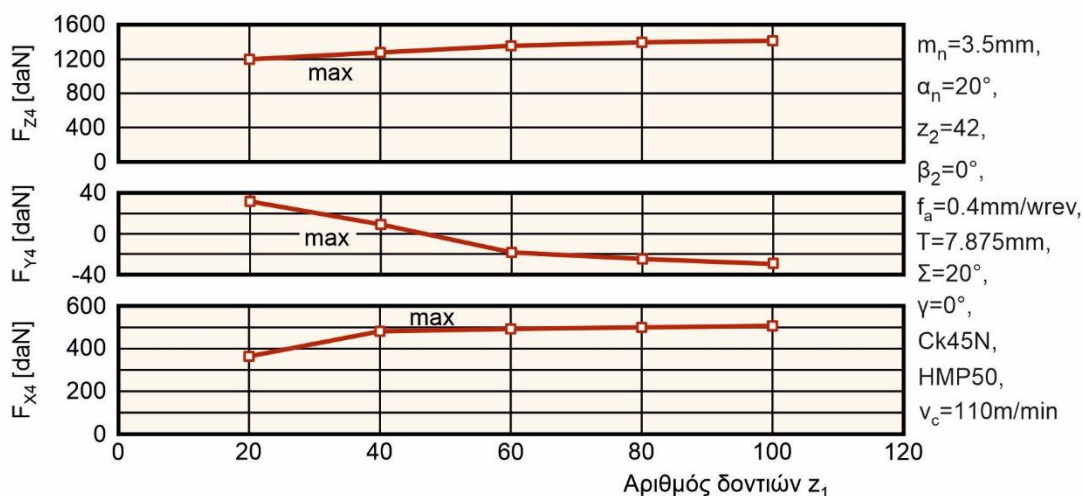
Όπως παρατηρείται για μικρές τιμές της γωνίας ελίκωσης οι δυνάμεις κοπής έχουν μεγαλύτερες τιμές. Η κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων με κοπτικό εργαλείο ευθείας οδόντωσης, προϋποθέτει την τοποθέτησή του υπό γωνία κλίσης Σ , ίση με την γωνία ελίκωσης. Διαπιστώνεται ο βασικός ρόλος της κλίσης του κοπτικού εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής σε συνδυασμό με τη διαφορετική γεωμετρία των αποβλίπτων σε κάθε περίπτωση.

6.2.2 Επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής

Σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής για την αποφλοίωση με κύλιση, εξετάστηκε ο αριθμός των δοντιών του. Στο [σχήμα 6.21](#) παρουσιάζεται ο υπολογισμός των συνολικών δυνάμεων κοπής για κοπτικό εργαλείο με 20 και 100 δόντια. Οι δυνάμεις κοπής είναι μεγαλύτερες για το κοπτικό εργαλείο 100 δοντιών. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται και σε αυτή την περίπτωση στη μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο του κοπτικού εργαλείου με περισσότερα δόντια. Η αυξημένη διάμετρος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιοχής εμπλοκής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και κατά συνέπεια των δυνάμεων κοπής.



Σχήμα 6.21: Σύγκριση αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής για κοπτικό εργαλείο διαφορετικού αριθμού δοντιών στην αποφλοίωση με κύλιση

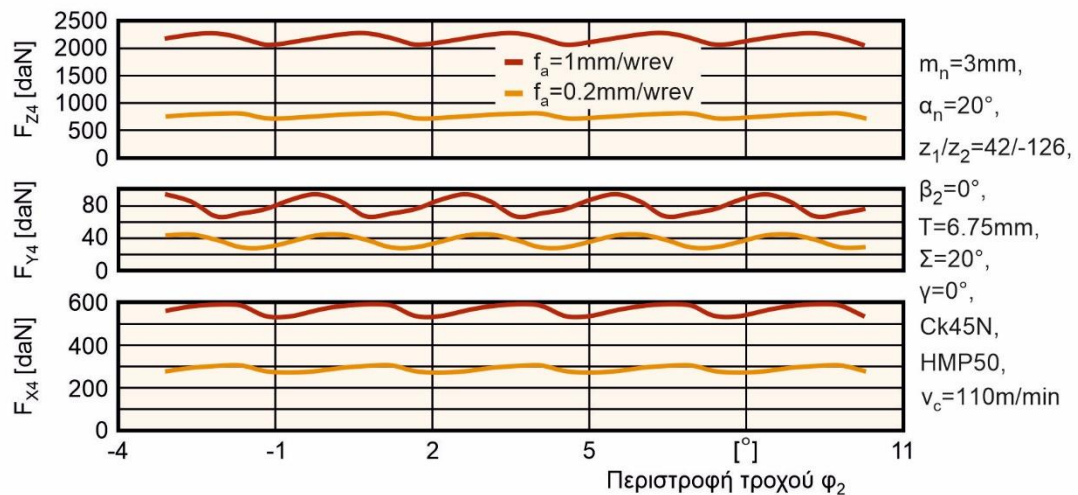


Σχήμα 6.22: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου στην αποφλοίωση με κύλιση

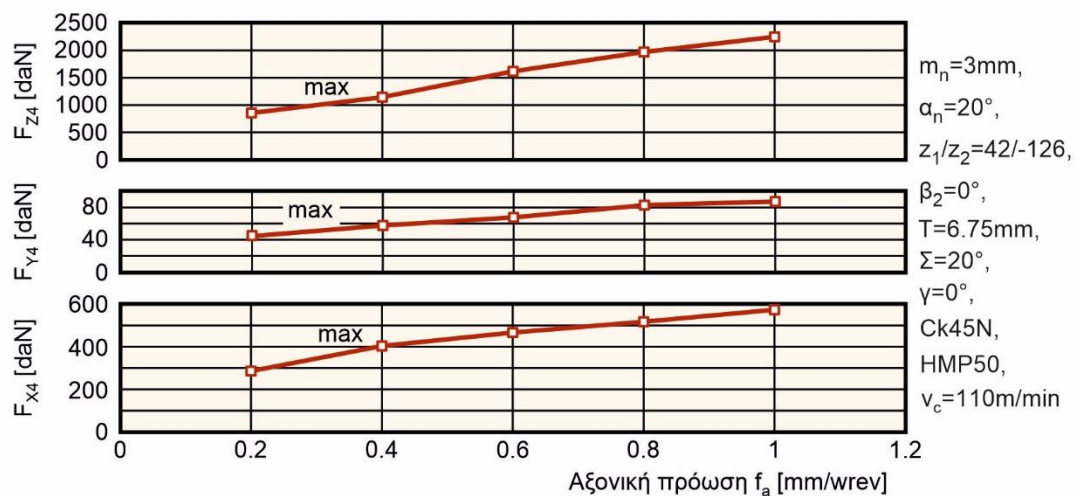
Η γεωμετρία του κοπτικού δοντιού παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις όσο αυξάνεται ο αριθμός των δοντιών. Για τον λόγο αυτόν οι δυνάμεις κοπής δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές για μεγαλύτερο αριθμό δοντιών, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 6.22](#).

6.2.3 Επίδραση των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής

Οι παράμετροι της κατεργασίας που σχετίζονται με τις συνθήκες κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση είναι η αξονική πρόωση, η κλίση του κοπτικού εργαλείου και το βάθος κοπής. Η πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε είναι η αξονική πρόωση της κατεργασίας. Στο [σχήμα 6.23](#) παρουσιάζεται η σύγκριση των συνολικών δυνάμεων κοπής για δύο τιμές της αξονικής πρόωσης. Η αξονική πρόωση της κατεργασίας καθορίζει το βήμα της αξονικής μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου για κάθε περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου και επομένως επηρεάζει άμεσα και το πάχος των αποβλίπτων που παράγονται στην κατεργασία. Έτσι, μεγάλες τιμές της αξονικής πρόωσης οδηγούν στον σχηματισμό αποβλίπτων μεγαλύτερου πάχους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πάχος των αποβλίπτων σχετίζεται άμεσα με τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται.



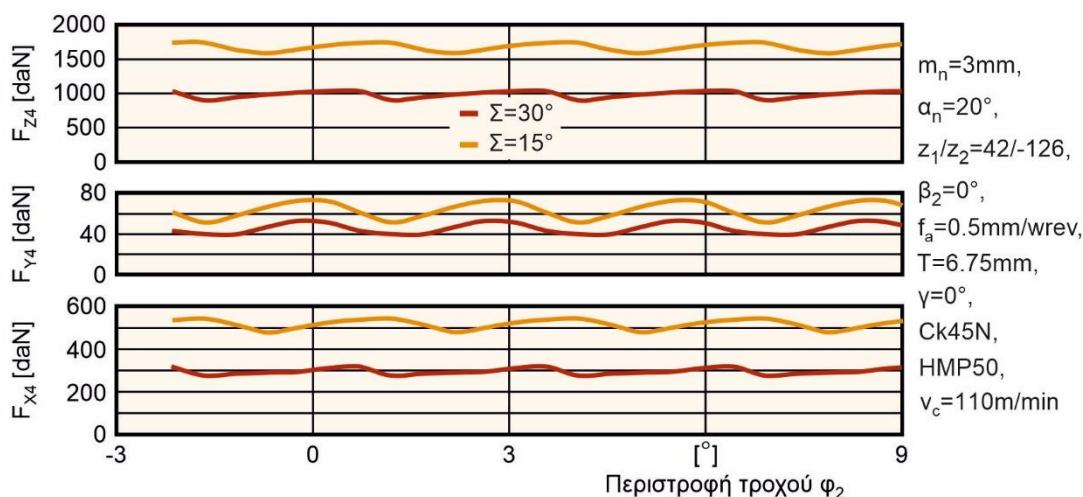
Σχήμα 6.23: Επίδραση της αξονικής πρόωσης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση



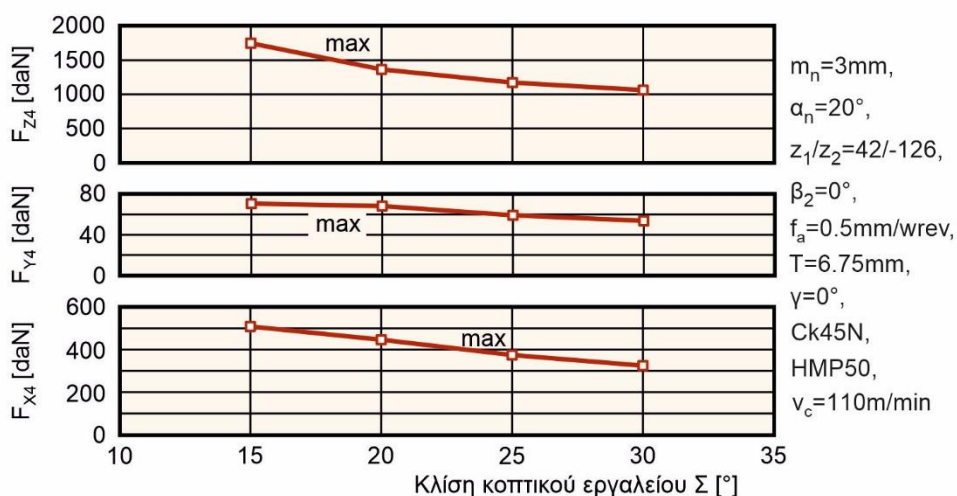
Σχήμα 6.24: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της αξονικής πρόωσης στην αποφλοίωση με κύλιση

Συνεπώς οι δυνάμεις κοπής αναμένεται να αυξηθούν όσο αυξάνεται και η τιμή της αξονικής πρόωσης. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται μέσω των διαγραμμάτων, όπου οι δυνάμεις κοπής σχεδόν τριπλασιάζονται για τις συνιστώσες X και Z , ενώ διπλασιάζονται για τη δύναμη κοπής στην κατεύθυνση Y . Στο σχήμα 6.24 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής για διάφορες τιμές της αξονικής πρόωσης. Όπως παρατηρείται υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών και της αξονικής πρόωσης της κατεργασίας.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της κλίσης του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής. Οι υπολογισμένες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στο σχήμα 6.25 για δύο τιμές της κλίσης του κοπτικού εργαλείου σε περίπτωση κατεργασίας ευθείας εσωτερικής οδόντωσης. Η ανάλυση αυτής της παραμέτρου σχετίζεται με την ανάλυση της επίδρασης της γωνίας ελίκωσης του οδοντωτού τροχού. Με βάση τις υπολογισμένες τιμές διαπιστώνεται η μείωση των δυνάμεων κοπής για μεγαλύτερη τιμή της κλίσης του κοπτικού εργαλείου. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του σχήματος 6.19 η κλίση του κοπτικού εργαλείου καθορίζει την περιοχή κοπής στην κατεργασία και κατά συνέπεια το μήκος των αποβλίττων που παράγονται.



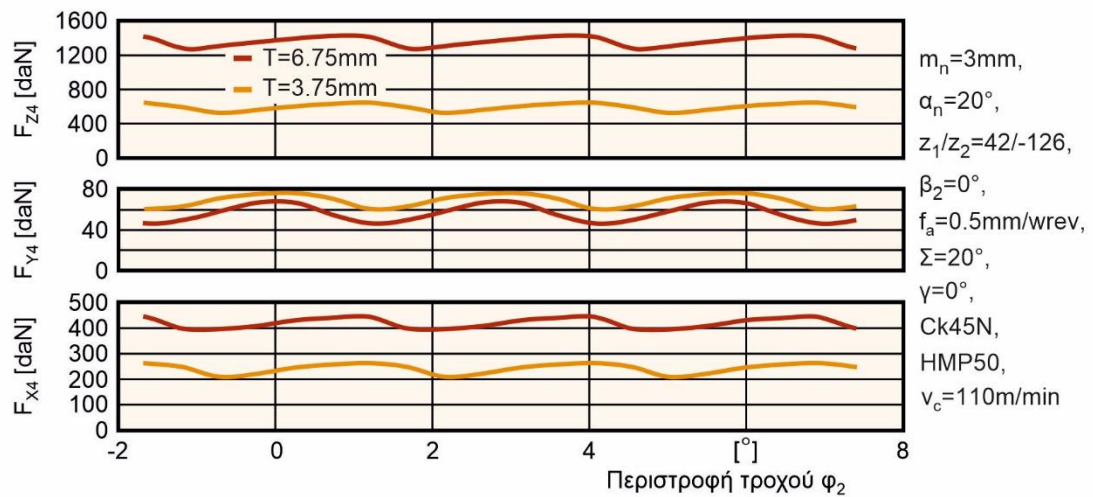
Σχήμα 6.25: Επίδραση της κλίσης του κοπτικού εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση



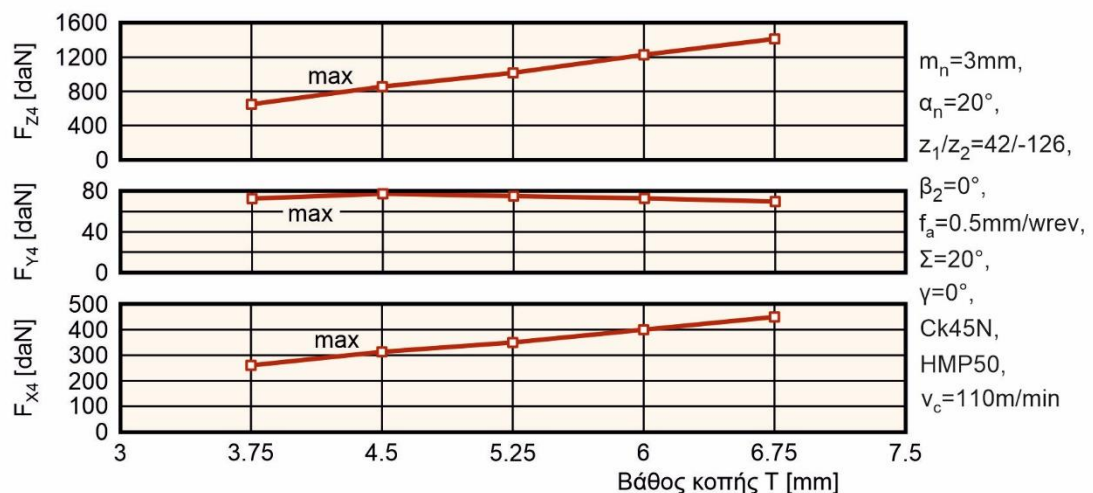
Σχήμα 6.26: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει της κλίσης του κοπτικού εργαλείου στην αποφλοίωση με κύλιση

Έτσι, η παραγωγή αποβλίπτων μεγαλύτερου μήκους οδηγεί στην καλύτερη κατανομή των δυνάμεων κοπής σε περισσότερες θέσεις περιστροφής. Το εν λόγω συμπέρασμα γενικεύεται για διάφορες τιμές της κλίσης του κοπτικού εργαλείου, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα του σχήματος 6.26.

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε είναι το βάθος κοπής της κατεργασίας. Τα αποτελέσματα που αναμένονται στην περίπτωση της αποφλοίσωσης με κύλιση είναι ίδια με τα αντίστοιχα της πλάνισης με κύλιση. Όσο αυξάνεται το βάθος κοπής και λόγω της μεγαλύτερης διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου εντός του κατεργαζόμενου τεμαχίου, αναμένεται αύξηση των δυνάμεων κοπής. Συγκεκριμένα, τα απόβλιττα που παράγονται θα έχουν μεγαλύτερο πλάτος και μήκος, λόγω του αυξημένου όγκου του αυλακιού και έτσι οι διατομές των αποβλίπτων στις θέσεις περιστροφής του κοπτικού εργαλείου θα έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια. Η αύξηση των δυνάμεων κοπής για μεγαλύτερη τιμή του βάθους κοπής επαληθεύεται στο σχήμα 6.27. Ταυτόχρονα στα διαγράμματα του σχήματος 6.28 διαπιστώνεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ του βάθους κοπής και των δυνάμεων κοπής. Η ελαφριά μείωση που παρατηρείται στη συνιστώσα Y αποδίδεται σε αλληλεξουδετερώσεις τιμών κατά την άθροιση των δυνάμεων.



Σχήμα 6.27: Επίδραση του βάθους κοπής στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής στην αποφλοίσωση με κύλιση



Σχήμα 6.28: Μέγιστες τιμές των συνιστωσών δυνάμεων κοπής συναρτήσει του βάθους κοπής στην αποφλοίσωση με κύλιση

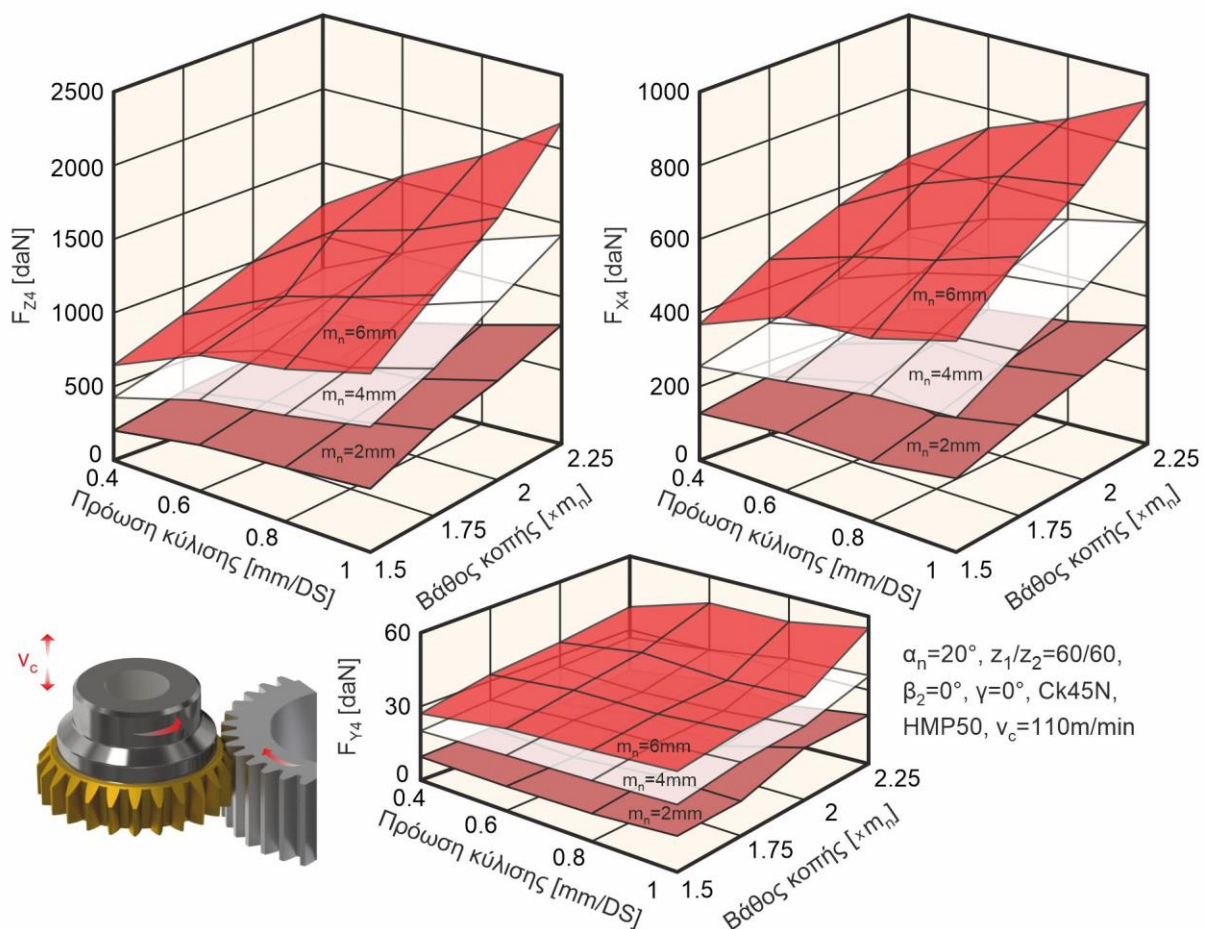


Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας

Η διερεύνηση της ταυτόχρονης επίδρασης των τεχνολογικών παραμέτρων των κατεργασιών στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, αποτελεί σημαντική πληροφορία για τη βελτιστοποίησή τους. Έτσι, εκτός από την εξέταση της επίδρασης κάθε παραμέτρου στις δυνάμεις κοπής ξεχωριστά, επιβάλλεται η μελέτη της συνδυασμένης επίδρασης των παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Για τον σκοπό αυτόν, εκπονήθηκε πλήθος προσομοιώσεων για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής διαφόρων συνδυασμών τεχνολογικών παραμέτρων. Οι συνθήκες κοπής αποτελούν τις παραμέτρους που είναι πιο εύκολο να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια μίας πραγματικής κατεργασίας, σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού και του κοπτικού εργαλείου. Για τον λόγο αυτόν δημιουργήθηκαν διαγράμματα τρισδιάστατων επιφανειών, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των δυνάμεων κοπής συναρτήσει των συνθηκών κοπής και μίας ακόμα παραμέτρου που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού ή του κοπτικού εργαλείου.

7.1 Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών στην πλάνιση με κύλιση

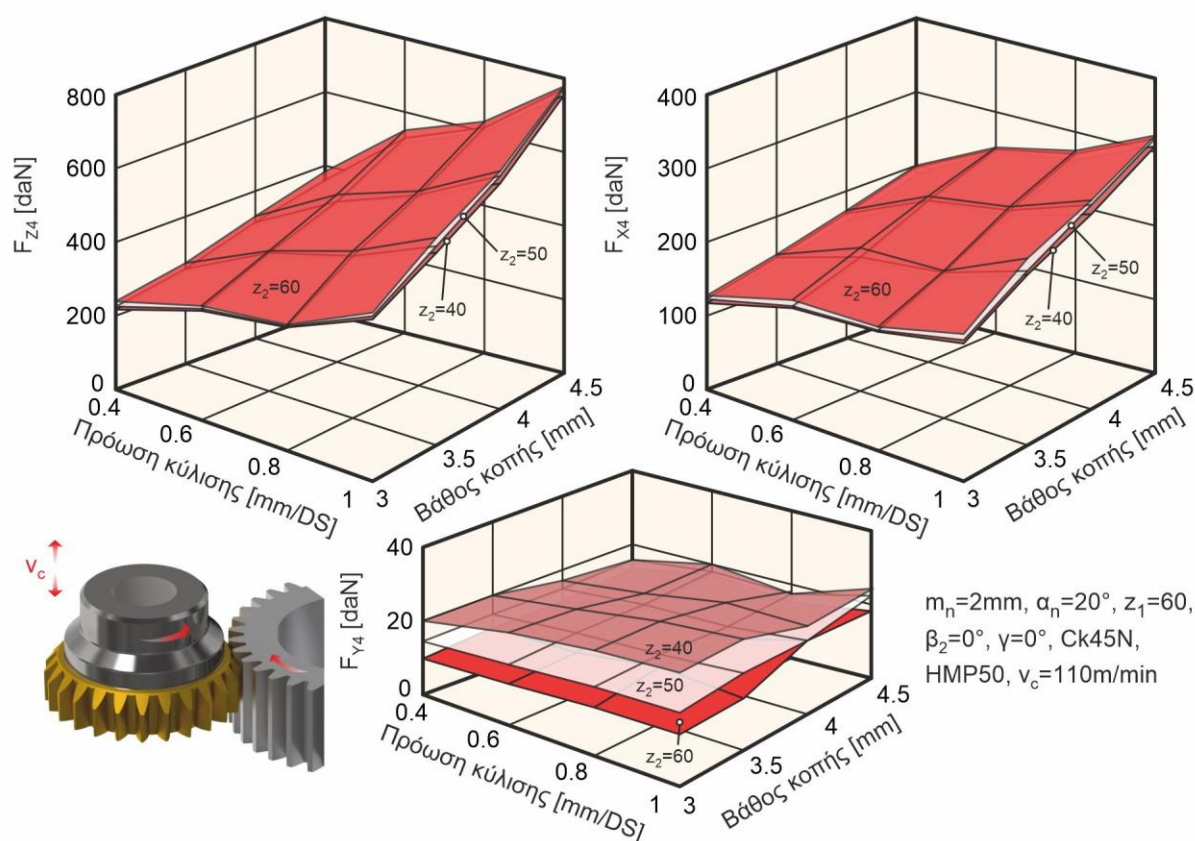
Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις συνθήκες κατεργασίας και εξετάστηκαν στις περιπτώσεις της πλάνισης με κύλιση είναι η πρόωση κύλισης και το βάθος κοπής. Οι εξεταζόμενες



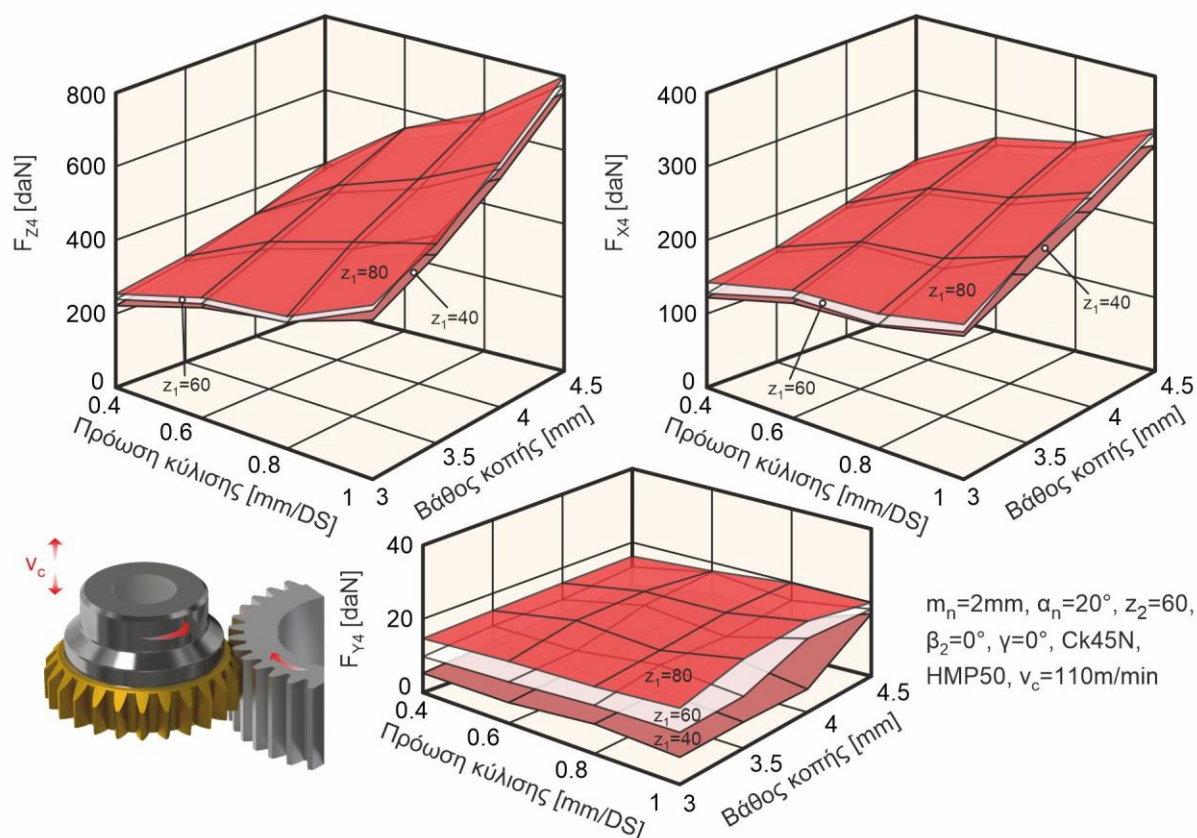
Σχήμα 7.1: Επίδραση της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και του μέτρου οδόντωσης στις δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

παράμετροι που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού και του κοπτικού εργαλείου είναι το μέτρο οδόντωσης, ο αριθμός των δοντιών, η γωνία ελίκωσης και η γωνία αποβλίπτου.

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τρισδιάστατων επιφανειών όπου απεικονίζεται η συνδυασμένη επίδραση του μέτρου οδόντωσης και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής στο σύστημα 4 του οδοντωτού τροχού. Όπως παρατηρείται στο σχήμα η αύξηση οποιασδήποτε παραμέτρου επιφέρει αύξηση των συνιστωσών δυνάμεων κοπής, με το μέτρο οδόντωσης να έχει τη μεγαλύτερη επίδραση σε αυτές, ενώ στη συνέχεια ακολουθούν το βάθος κοπής και η πρόωση κύλισης. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν στο κεφάλαιο 6, σχετικά με την επίδραση της κάθε παραμέτρου μεμονωμένα στις δυνάμεις κοπής. Αναφορικά με τις συνθήκες κατεργασίας, η πρόωση κύλισης επηρεάζει το πάχος του αποβλίπτου και τον αριθμό των θέσεων κύλισης που απαιτούνται για την κατεργασία ενός αυλακιού, ενώ το βάθος κοπής επηρεάζει την περιοχή κατεργασίας σε κάθε θέση κύλισης και κατά συνέπεια την επιφάνεια διατομής των αποβλίπτων. Τέλος, το μέτρο οδόντωσης έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος του αυλακιού. Τα παραπάνω φαινόμενα επεξηγούν τη συνολική αύξηση των συνιστωσών δυνάμεων κοπής για τη συνδυασμένη αύξηση των τριών εξεταζόμενων παραμέτρων.



Σχήμα 7.2: Επίδραση της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού στις δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

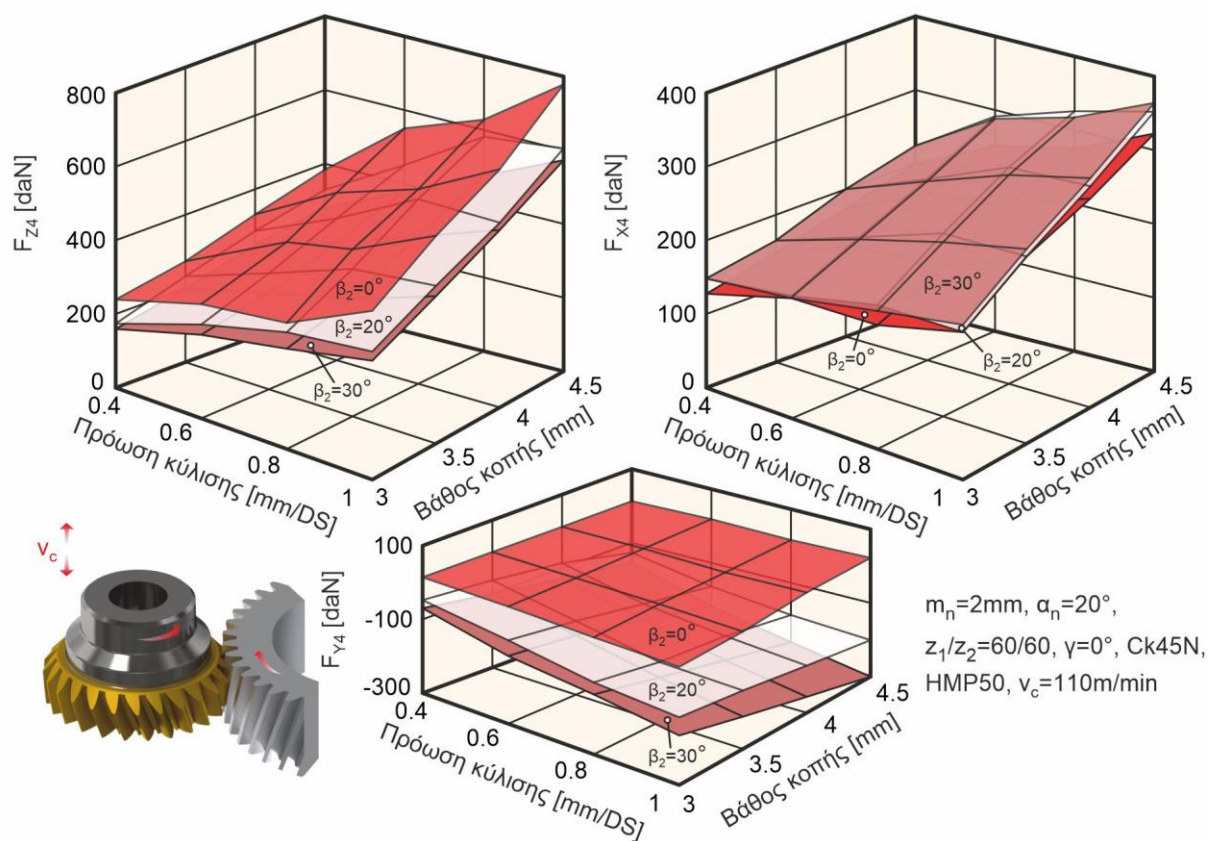


Σχήμα 7.3: Επίδραση της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου στις δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση του αριθμού των δοντιών και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Σύμφωνα με τις υπολογισμένες τιμές, ο αριθμός των δοντιών του οδοντωτού τροχού αυξάνει τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής στους άξονες X και Z, σημαντικά όμως λιγότερο από την αντίστοιχη αύξηση που οφείλεται στις παραμέτρους των συνθηκών κατεργασίας. Ταυτόχρονα, στην κατεύθυνση Y το φαινόμενο αντιστρέφεται, με τη συνιστώσα δύναμη να μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των δοντιών του οδοντωτού τροχού. Η γενική αύξηση του μέτρου των δυνάμεων αποδίδεται στην αύξηση του όγκου του αυλακίου για μεγαλύτερο αριθμό δοντιών, ενώ η μείωση που παρατηρείται στην κατεύθυνση Y οφείλεται σε φαινόμενα αλληλοεξουδετέρωσης των δυνάμεων κοπής κατά τον υπολογισμό τους. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στο σχήμα 7.3, όπου παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνδυασμένης επίδρασης του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Τόσο στην περίπτωση του κοπτικού εργαλείου, όσο και στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού, συμπεραίνεται ότι η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στις δυνάμεις κοπής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την επίδραση του αριθμού των δοντιών.

Στο σχήμα 7.4 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση της γωνίας ελίκωσης και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι το μέτρο των αναπτυσσόμενων δυνάμεων αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας ελίκωσης στις κατευθύνσεις X και Y, ενώ στην κατεύθυνση Z παρατηρείται μείωση του μέτρου της δύναμης. Όπως παρατηρείται στο σχήμα η γωνία ελίκωσης καθορίζει τις δυνάμεις κοπής σε μεγαλύτερο βαθμό από τον αριθμό των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και του οδοντωτού τροχού, αλλά όχι και από τις συνθήκες κατεργασίας. Η διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των

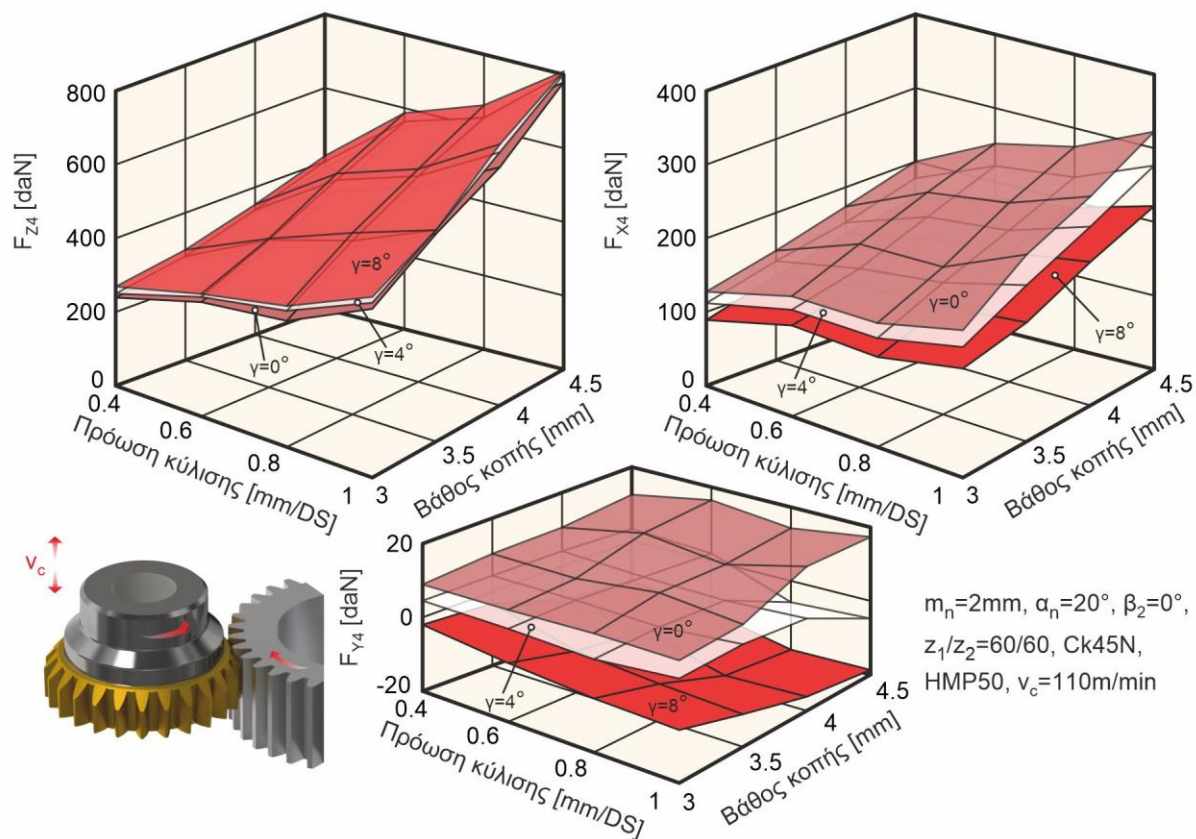
συνιστωσών δυνάμεων αποδίδεται στην ιδιαίτερη γεωμετρία των αποβλίπτων, σε συνδυασμό με την κλίση της κοπτικής κατατομής κατά την κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων.



Σχήμα 7.4: Επίδραση της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και της γωνίας ελίκωσης του οδοντωτού τροχού στις δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

Τέλος, στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση της γωνίας αποβλίπτου και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Σύμφωνα με τα διαγράμματα αυτά η γωνία αποβλίπτου δεν έχει σημαντικότερη επίδραση στις δυνάμεις κοπής από τις συνθήκες κατεργασίας, αλλά αύξησή της επιφέρει μία μικρή αύξηση στις δυνάμεις κοπής, με εξαίρεση τη δύναμη στην κατεύθυνση X όπου παρατηρείται μείωση του μέτρου της δύναμης. Η γωνία αποβλίπτου προκαλεί αλλαγές στην κλίση του επιπέδου τομής των αποβλίπτων και κατά συνέπεια διατομές μεγαλύτερης επιφάνειας, γεγονός που αιτιολογεί και τη συμπεριφορά των υπολογισμένων δυνάμεων.

Η μελέτη της συνδυασμένης επίδρασης των τεχνολογικών παραμέτρων της κατεργασίας της πλάνισης με κύλιση, οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής. Όπως παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μεταβολή του μέτρου των δυνάμεων κοπής προκαλείται από αλλαγές στο μέτρο οδόντωσης, ενώ ακολουθούν το βάθος κοπής, η πρόωση κύλισης, η γωνία ελίκωσης, η γωνία αποβλίπτου και τέλος ο αριθμός των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και του οδοντωτού τροχού. Έτσι, η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων που έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο μέτρο των δυνάμεων κοπής, σύμφωνα με τη σειρά που αναφέρθηκε, αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα για τη βελτιστοποίησή τους.

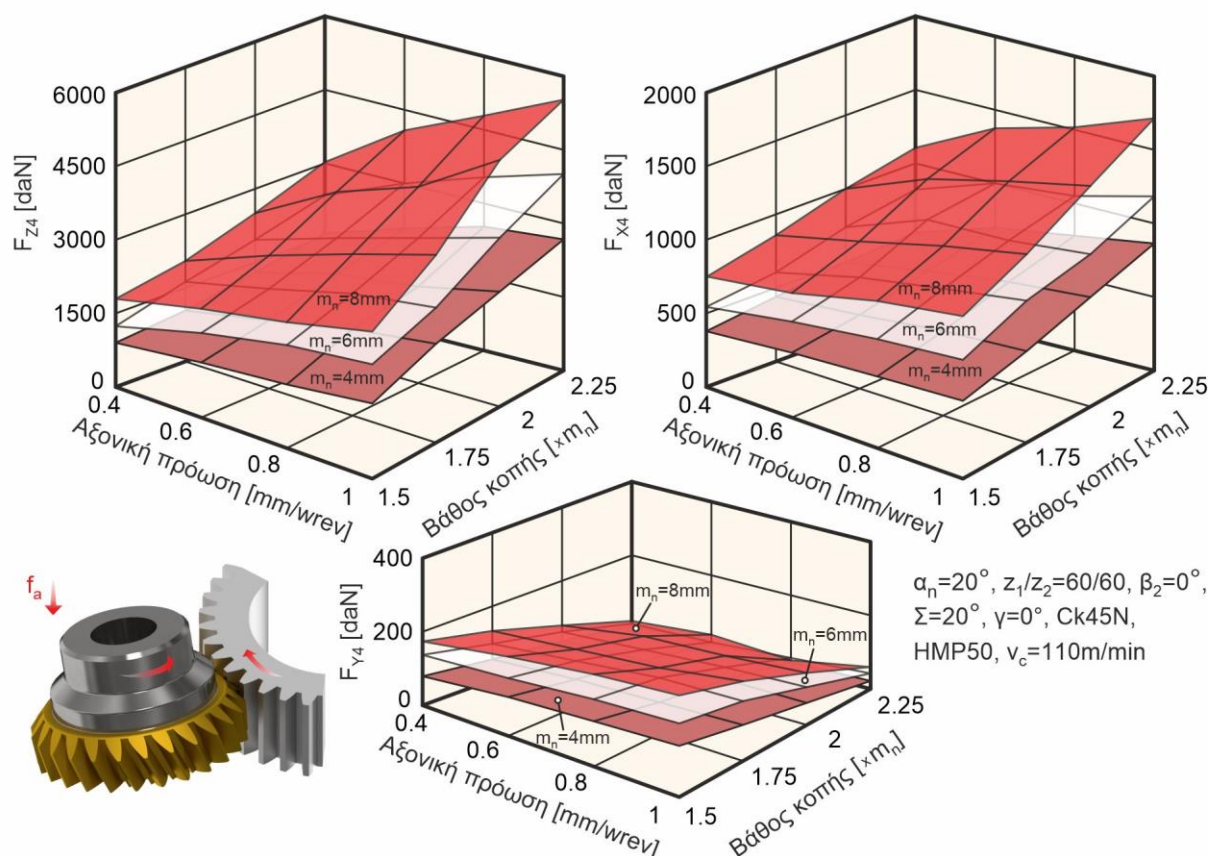


Σχήμα 7.5: Επίδραση της πρόωσης κύλισης, του βάθους κοπής και της γωνίας αποβλίπτου στις δυνάμεις κοπής στην πλάνιση με κύλιση

7.2 Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών στην αποφλοίωση με κύλιση

Παρόμοια μελέτη εκπονήθηκε και για την κατεργασία της αποφλοίωσης με κύλιση. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις συνθήκες κατεργασίας και εξετάστηκαν στις περιπτώσεις της αποφλοίωσης με κύλιση, είναι η αξονική πρόωση και το βάθος κοπής. Οι εξεταζόμενες παράμετροι που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοντωτού τροχού και του κοπτικού εργαλείου είναι το μέτρο οδόντωσης, ο αριθμός των δοντιών και η γωνία ελίκωσης. Οι τιμές των δυνάμεων που παρουσιάζονται, όπως και στην πλάνιση με κύλιση, αναφέρονται στις μέγιστες υπολογισμένες τιμές στο σύστημα 4 που βρίσκεται στο κέντρο του οδοντωτού τροχού.

Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση του μέτρου οδόντωσης και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα, η αύξηση του μέτρου οδόντωσης επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τις τιμές των δυνάμεων κοπής σε όλες τις συνιστώσες, ως συνέπεια του μεγαλύτερου αυλακιού που δημιουργείται. Το ίδιο συμβαίνει και με τις συνθήκες κατεργασίας, οι οποίες όμως έχουν λιγότερη επίδραση στις τιμές των δυνάμεων σε σχέση με το μέτρο οδόντωσης. Εξαιρέση αποτελεί η συμπεριφορά του βάθους κοπής στην κατεύθυνση Y , όπου παρατηρείται μείωση της αναπτυσσόμενης δύναμης. Αιτία του φαινομένου αποτελούν οι αλληλεξουδετερώσεις των δυνάμεων κατά την άθροισή τους, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6.

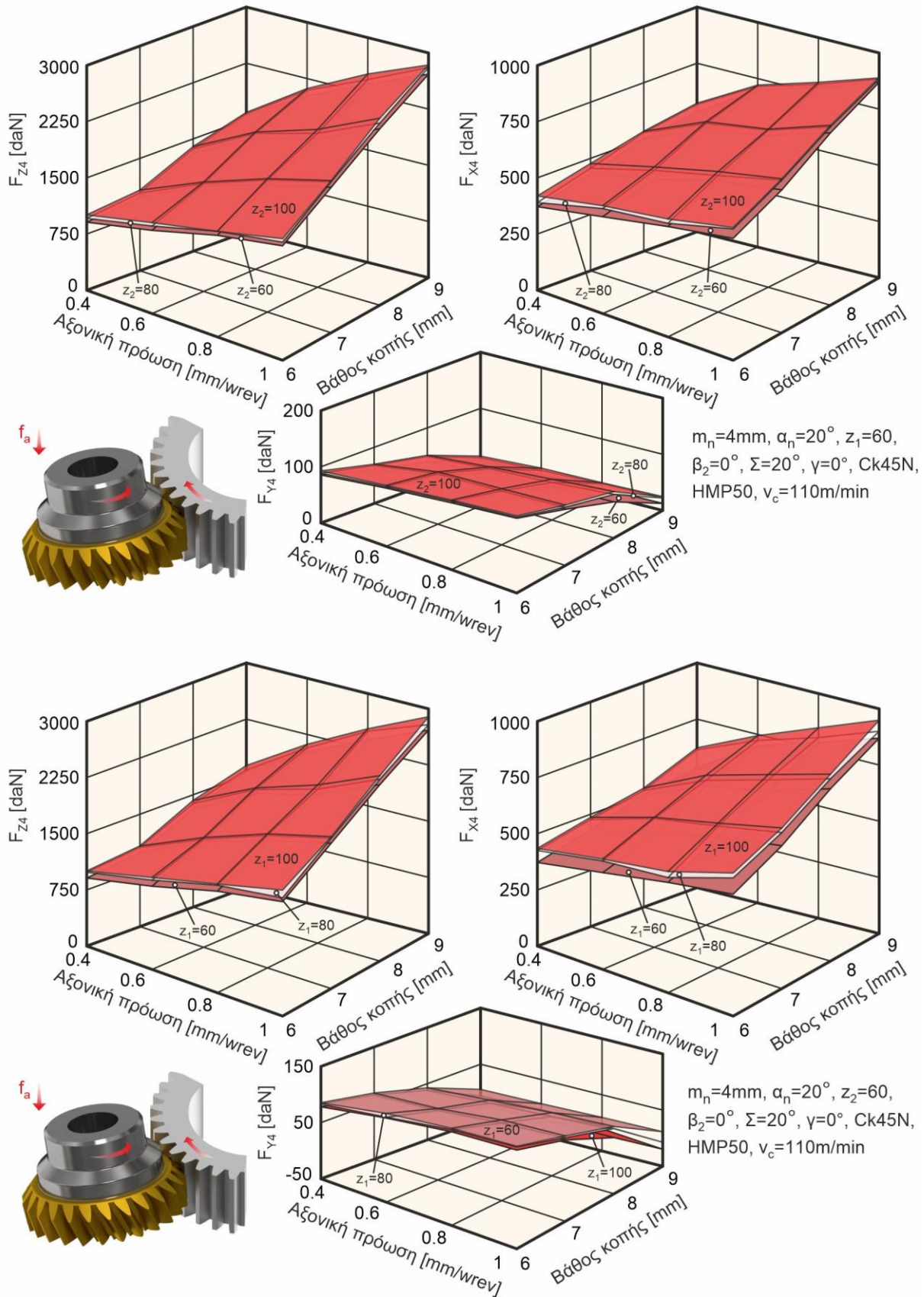


Σχήμα 7.6: Επίδραση της αξονικής πρόωσης, του βάθους κοπής και του μέτρου οδόντωσης στις δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση

Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση των συνθηκών κατεργασίας και του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Η γενική εικόνα που προκύπτει από όλα τα διαγράμματα είναι η μικρή επίδραση του αριθμού των δοντιών στις δυνάμεις κοπής, ιδιαίτερα στην κατεύθυνση Y όπου η μεταβολή των δυνάμεων είναι δύσκολο να διακριθεί μόνο από τα διαγράμματα. Συγκεκριμένα, η αύξηση του αριθμού των δοντιών αυξάνει τις συνιστώσες δυνάμεις κοπής, μεταβολή που όμως μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με την αντίστοιχη επίδραση που έχουν οι συνθήκες κατεργασίας.

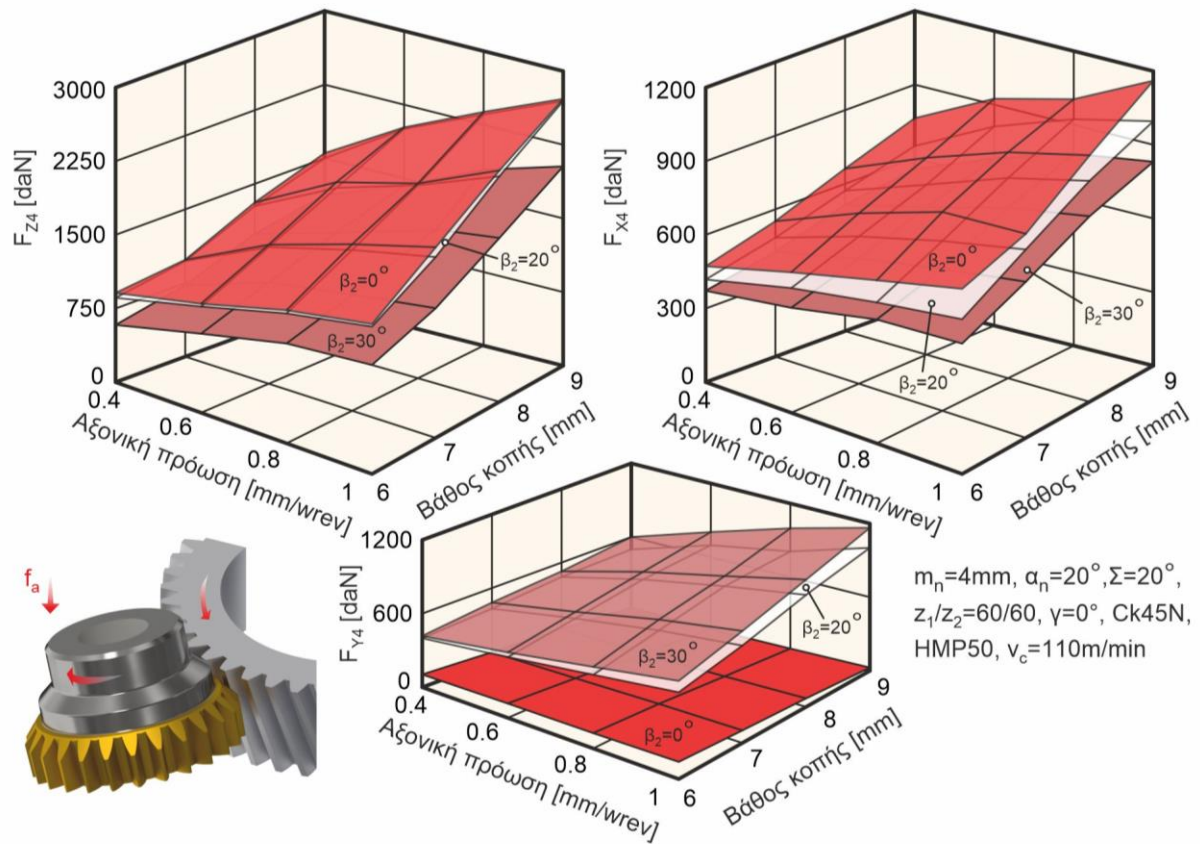
Στο σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η συνδυασμένη επίδραση της γωνίας ελίκωσης και των συνθηκών κατεργασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Στην περίπτωση αυτή οι υπολογισμένες δυνάμεις παρουσιάζονται μειωμένες με την αύξηση της γωνίας ελίκωσης στις συνιστώσες Z και X, ενώ αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει η δύναμη στην κατεύθυνση Y. Το φαινόμενο αποδίδεται στη μορφή των αποβλίπτων της πλάγιας οδόντωσης και την αύξηση της περιοχής κοπής, γεγονός το οποίο οδηγεί στην κατανομή των δυνάμεων σε περισσότερες θέσεις περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση οι συνθήκες κατεργασίας έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές των δυνάμεων σε σχέση με τη γωνία ελίκωσης.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη της συνδυασμένης επίδρασης των τεχνολογικών παραμέτρων στην αποφλοίωση με κύλιση, είναι ότι οι συνθήκες κατεργασίας έχουν κατά βάση τη μεγαλύτερη επιρροή στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το μέτρο οδόντωσης, του οποίου η μεταβολή έχει σημαντικό αντίκτυπο στις



Σχήμα 7.7: Επίδραση της αξονικής πρόωσης, του βάθους κοπής και του αριθμού των δοντιών στις δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση

αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Λιγότερη επίδραση στις δυνάμεις κοπής έχει η γωνία ελίκωσης του οδοντωτού τροχού, ενώ η μεταβολή του αριθμού των δοντιών του κοπτικού εργαλείου ή του κατεργαζόμενου τεμαχίου προκαλεί ασήμαντες διαφοροποιήσεις στις υπολογισμένες τιμές.



Σχήμα 7.8: Επίδραση της αξονικής πρόωσης, του βάθους κοπής και της γωνίας ελίκωσης στις δυνάμεις κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση



Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις

Το αντικείμενο που μελετήθηκε στην παρούσα διατριβή είναι οι κατεργασίες της πλάνισης και της αποφλοίσωσης με κύλιση οδοντώσεων. Για τον σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο βασίστηκε στο εμπορικό λογισμικό CAD Inventor της Autodesk. Πριν από την ανάπτυξη του εν λόγω μοντέλου πραγματοποιήθηκε μία εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις κατεργασίες κοπής οδοντώσεων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση συμπεριλήφθηκαν όλες οι έρευνες που σχετίζονται με την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης για τη μελέτη των δύο κατεργασιών και καταγράφηκαν τα συμπεράσματά τους. Ταυτόχρονα παρουσιάστηκαν όλες οι ερευνητικές εργασίες που σχετίζονται με τη μελέτη των εργαλείων κοπής στις κατεργασίες και στις προσπάθειες βελτίωσής τους, με σκοπό τη μείωση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων και την αύξηση του χρόνου ζωής τους. Η καταγραφή και μελέτη των σχετικών αυτών ερευνητικών εργασιών αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική στην μετέπειτα ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου, το οποίο αποσκοπούσε να καλύψει τα ερευνητικά κενά στην προσομοίωση των κατεργασιών και να βελτιώσει τις υπολογιστικές μεθόδους της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Η χρήση ενός εμπορικού πακέτου CAD για την προσομοίωση των μελετούμενων κατεργασιών οδοντώσεων, προσέφερε σημαντική ακρίβεια στους υπολογισμούς η οποία δεν προσφέρεται στα υπάρχοντα μοντέλα. Ο κώδικας του μοντέλου αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Visual Studio της Microsoft σε γλώσσα Visual Basic .NET και με τη χρήση του API του λογισμικού Inventor. Για την προσομοίωση κάθε κατεργασίας ακολουθήθηκε μία σειρά από στάδια τα οποία εκτελέστηκαν στο περιβάλλον του συστήματος CAD.

Αρχικά αναπτύχθηκε ο κώδικας υπολογισμού της κατατομής του κοπτικού εργαλείου. Για τη δημιουργία της λήφθηκαν υπόψη όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου, δεδομένα που δίνονται ως είσοδος στο μοντέλο προσομοίωσης. Έπειτα με βάση την κινηματική της κάθε κατεργασίας και τα δεδομένα της προσομοίωσης, η κοπτική κατατομή τοποθετείται σε διακριτές θέσεις με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου στερεού που περιγράφει την τροχιά του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια με τη χρήση των λειτουργιών λογικής αφαίρεσης και τομής που διατίθεται στο περιβάλλον του συστήματος CAD, το στερεό μοντέλο της τροχιάς χρησιμοποιήθηκε για τον σχηματισμό της τρισδιάστατης μορφής του αυλακιού, αλλά και τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων κάθε κατεργασίας. Η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίττων αποτέλεσε τη βάση για τον επακόλουθο υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται. Μέσω ενός συνόλου από τομές της γεωμετρίας των αποβλίττων και με τη χρήση των εξισώσεων Kienzle και Victor, προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις κοπής στην επιφάνεια κάθε διατομής, οι οποίες στη συνέχεια μετασχηματίστηκαν σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων του μοντέλου. Ταυτόχρονα υπολογίστηκαν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται από ταυτόχρονη κοπή των δοντιών κατά την εμπλοκή κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε επιβεβαιώθηκε με τρεις τρόπους. Αρχικά επαληθεύτηκε η γεωμετρία των παρειών του αυλακιού, μέσω της σύγκρισής τους με τη γεωμετρία της θεωρητικής εξελιγμένης καμπύλης. Επιπλέον, με σκοπό την επιβεβαίωση της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των διατομών τους με υπάρχουσες διατομές από άλλα μοντέλα προσομοίωσης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επιβεβαίωση των

υπολογισμένων δυνάμεων κοπής, μέσω της σύγκρισής τους με πειραματικά υπολογισμένες τιμές των δυνάμεων κοπής από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Για την εύκολη αλληλεπίδραση του χρήστη με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, αλλά και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό μέσω του οποίου προσφέρονται οι δυνατότητες εισαγωγής δεδομένων, εκτέλεσης προσομοιώσεων και προβολής των πληροφοριών που σχετίζονται με τη γεωμετρία των αποβλήτων και των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής.

Σε τελευταίο στάδιο το λογισμικό που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων των κατεργασιών στις δυνάμεις κοπής. Έτσι εκπονήθηκε πλήθος προσομοιώσεων για ένα σύνολο από παραμέτρους της κάθε κατεργασίας και διερευνήθηκε ο τρόπος που η κάθε παράμετρος επιδρά στις τιμές των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής. Η μελέτη αυτή αποτελεί σημαντική πληροφορία για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων και της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Προτάσεις για περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες αποτελούν:

- Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού των τάσεων που αναπτύσσονται σε κάθε κατεργασία και ενσωμάτωση του στο λογισμικό που αναπτύχθηκε.
- Προσθήκη μοντέλου δυναμικής συμπεριφοράς της κινηματικής των κατεργασιών μέσω μεθοδολογιών πεπερασμένων στοιχείων.
- Περαιτέρω σύγκριση των δυνάμεων κοπής με πειραματικές μετρήσεις για πιο σύγχρονα υλικά και επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων. Για τον σκοπό αυτόν απαραίτητη είναι η πειραματική εύρεση των ειδικών αντιστάσεων κοπής σύγχρονων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις των Kienzle-Victor.
- Βελτίωση του κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση στην κατεύθυνση της συνιστώσας Y.
- Διερεύνηση της επίδρασης κοπτικών εργαλείων διαφορετικής γεωμετρίας στις δυνάμεις κοπής.

- [1] Radzevich, S. P., 2012, *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*.
- [2] Bouzakis, K. D., Lili, E., Michailidis, N., and Friderikos, O., 2008, "Manufacturing of Cylindrical Gears by Generating Cutting Processes: A Critical Synthesis of Analysis Methods," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **57**(2), pp. 676–696.
- [3] Broehl, W. G., 1959, *Precision Valley: The Machine Tool Companies of Springfield, Vermont*, Prentice-Hall.
- [4] Ainsworth, N. C., 1996, "Design Implications for Shaper Cutters," *Gear Technol.*, **13**(4).
- [5] Kiocke, F., and Köllner, T., 1999, "Hard Gear Finishing with a Geometrically Defined Cutting Edge," *Gear Technol.*, **16**(6), pp. 24–29.
- [6] Μπουζάκης, Κ.-Δ., 2015, *Μηχανική Και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων Με Αφαίρεση Υλικού*, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- [7] Sulzer, G., 1973, "Leistungssteigerung Bei Der Zylinderradherstellung Durch Genaue Erfassung Der Zerspankinematik," *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*.
- [8] Bouzakis, K.-D., 1976, "Erhöhung Der Wirtschaftlichkeit Beim Wälzstossen Durch Optimierung Des Zerspanprozesses Und Der Werkzeugauslegung," *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*.
- [9] Bouzakis, K.-D., and König, W., 1978, "Ermittlung Der Zerspankerakomponenten Beim Walzstossen," *Verein Dtsch. Ingenieure*, **120**.
- [10] Kienzle, O., and Victor, H., 1957, "Spezifische Schnittkrafte Bei Der Metallbearbeitung. Werkstattstechnik Und Maschinenbau," (47), pp. 224–225.
- [11] Li, L., Zhang, L., Yu, B., Wang, K., and Liu, F., 2015, "An Efficient Spur Gear Shaping Method Based on Homogenizing Cutting Area through Variational Circular Feed Rate," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, **231**(9), pp. 1587–1598.
- [12] Katz, A., Erkorkmaz, K., and Ismail, F., 2018, "Virtual Model of Gear Shaping-Part I: Kinematics, Cutter-Workpiece Engagement, and Cutting Forces," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, **140**(7).
- [13] Erkorkmaz, K., Katz, A., Hosseinkhani, Y., Plakhotnik, D., Stautner, M., and Ismail, F., 2016, "Chip Geometry and Cutting Forces in Gear Shaping," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **65**(1), pp. 133–136.
- [14] Katz, A., 2017, "Cutting Mechanics of the Gear Shaping Process."
- [15] Zheng, F., Hua, L., Han, X., Li, B., and Chen, D., 2016, "Linkage Model and Manufacturing Process of Shaping Non-Circular Gears," *Mech. Mach. Theory*, **96**, pp. 192–212.
- [16] Xu, M., Han, X., Hua, L., and Zheng, F., 2020, "Modeling and Methods for Gear Shaping Process and Cutting Force Prediction of Variable Transmission Ratio Rack," *Int. J. Mech. Sci.*, **171**(December 2019).
- [17] Kühn, F., Brimmers, J., and Bergs, T., 2021, "Process Design for Gear Shaping of Austempered Ductile Iron (ADI) Components," *Procedia CIRP*, **99**, pp. 214–219.

- [18] Datta, P. P., Chattopadhyay, T. K., and Banerjee, R. N., 2004, "Computer Aided Stress Analysis of Fellow's Gear-Shaping Cutter at Different Stages of a Cutting Stroke," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, **218**(10), pp. 1297–1306.
- [19] Rui-Li, C., Jun, H., Rong-Xin, D., Guo-Wei, C., and Yi-Li, W., 2021, "Optimization of Geometric Parameters of Gear Shaper Cutter Based on Multi-Island Genetic Algorithm," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 446–451.
- [20] Zhao, X., Liu, Q., Fu, Y., and Chen, P., 2021, "Study on the Influencing Factors of the Deformation in the Process of Gear Shaping," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **117**(1–2), pp. 167–185.
- [21] Huang, C. L., Fong, Z. H., Chen, S. D., and Chang, K. R., 2009, "Profile Correction of a Helical Gear Shaping Cutter Using the Lengthwise-Reciprocating Grinding Method," *Mech. Mach. Theory*, **44**(2), pp. 401–411.
- [22] LORENZ GmbH and Co, 1980, *Gear Cutting Tools Manual for Design and Manufacturing*, Ettlingen, West Germany.
- [23] 2000, *Gleason Cutting Tool*, Gleason Works, Loves Park, Illinois, USA.
- [24] Máté, M., and Hollanda, D., 2020, "Numerical Evaluation of the Shaper Cutter with Cylindrical Rake Face," *Műszaki Tudományos Közlemények*, **12**(1), pp. 55–62.
- [25] Radzevich, S. P., 2017, *Gear Cutting Tools: Science and Engineering*, CRC Press.
- [26] Pittler, von W., 1910, "Verfahren Zum Schneiden von Zahnrädern Mittels Eines Zahnradartigen, an Den Stirnflächen Der Zähne Mit Schneidkanten Versehenen Schneidwerkzeugs."
- [27] Olivoni, E., Vertechy, R., and Parenti-castelli, V., 2022, "Power Skiving Manufacturing Process : A Review," **175**(April).
- [28] NAGATA, E., TACHIKAWA, T., NAKAHARA, Y., KURITA, N., NAKAMURA, M., IBA, D., and MORIWAKI, I., 2017, "Gear Skiving for Mass Production," *Proc. JSME Int. Conf. motion power Transm.*, **2017**(0), pp. 02–13.
- [29] Stadtfeld, H. J., 2014, "Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms," *Gear Technol.*, (February), pp. 52–62.
- [30] Zheng, F., Zhang, M., Zhang, W., and Guo, X., 2018, "Research on the Tooth Modification in Gear Skiving," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, **140**(8).
- [31] Jansen, W., 1980, "Leistungssteigerung Und Verbesserung Der Fertigungsgenauigkeit Beim Wälzschälen von Innenverzahnungen," Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [32] Spath, D., and Hühsam, A., 2002, "Skiving for High-Performance Machining of Periodic Structures," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **51**(1), pp. 91–94.
- [33] Hühsam, A., 2002, "Modellbildung Und Experimentelle Untersuchung Des Wälzschälprozesses," Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe.
- [34] Tachikawa, T., Kurita, N., Nakamura, M., Iba, D., and Moriwaki, I., 2015, "Calculation Model for Internal Gear Skiving with a Pinion-Type Cutter Having Pitch Deviation and a Run-Out," *Proc. ASME*.
- [35] Brecher, C., Brumm, M., and Krömer, M., 2015, "Design of Gear Hobbing Processes Using Simulations and Empirical Data," *Procedia CIRP*, **33**, pp. 484–489.

- [36] Klocke, F., Brecher, C., Löpenhaus, C., Ganser, P., Staudt, J., and Krömer, M., 2016, "Technological and Simulative Analysis of Power Skiving," *Procedia CIRP*, **50**, pp. 773–778.
- [37] Janßen, C., Brimmers, J., and Bergs, T., 2021, "Validation of the Plane-Based Penetration Calculation for Gear Skiving," *Procedia CIRP*, **99**, pp. 220–225.
- [38] Bergs, T., Georgoussis, A., and Löpenhaus, C., 2020, "Development of a Numerical Simulation Method for Gear Skiving," *Procedia CIRP*, **88**, pp. 352–357.
- [39] Kimme, S., Bauer, R., Drossel, W. G., and Putz, M., 2017, "Simulation of Error-Prone Continuous Generating Production Processes of Helical Gears and the Influence on the Vibration Excitation in Gear Mesh," *Procedia CIRP*, **62**(December), pp. 256–261.
- [40] Vargas, B., Zapf, M., Klose, J., Zanger, F., and Schulze, V., 2019, "Numerical Modelling of Cutting Forces in Gear Skiving," *Procedia CIRP*, **82**, pp. 455–460.
- [41] Dietrich, J., 2016, "Grundlagen Der Zerspanung Am Beispiel Drehen BT - Praxis Der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung," J. Dietrich, ed., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 5–24.
- [42] Saglam, H., Unsacar, F., and Yaldiz, S., 2006, "Investigation of the Effect of Rake Angle and Approaching Angle on Main Cutting Force and Tool Tip Temperature," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46**(2), pp. 132–141.
- [43] Vargas, B., and Schulze, V., 2021, "Three-Dimensional Modeling of Gear Skiving Kinematics for Comprehensive Process Design in Practical Applications," *CIRP Ann.*, **70**(1), pp. 99–102.
- [44] Albert, R., 2014, "Wälschalen Und Werkzeugauslegung in Abhängigkeit Des Achskreuzwinkels," *Verzahnungsseminar Weichbearbeitung, Aachen*.
- [45] Trübswetter, M., Otto, M., and Stahl, K., 2019, "Evaluation of Gear Flank Surface Structure Produced by Skiving," *Forsch. im Ingenieurwesen/Engineering Res.*, **83**(3), pp. 719–726.
- [46] McCloskey, P., Katz, A., Berglind, L., Erkorkmaz, K., Ozturk, E., and Ismail, F., 2019, "Chip Geometry and Cutting Forces in Gear Power Skiving," *CIRP Ann.*, **68**(1), pp. 109–112.
- [47] Inui, M., Huang, Y., Onozuka, H., and Umezu, N., 2020, "Geometric Simulation of Power Skiving of Internal Gear Using Solid Model with Triple-Dexel Representation," *Procedia Manuf.*, **48**, pp. 520–527.
- [48] Lorensen, W. E., and Cline, H. E., 1987, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 163–169.
- [49] Onozuka, H., Tayama, F., Huang, Y., and Inui, M., 2020, "Cutting Force Model for Power Skiving of Internal Gear," *J. Manuf. Process.*, **56**(December 2019), pp. 1277–1285.
- [50] Ren, Z., Fang, Z., Kobayashi, G., Kizaki, T., Sugita, N., Nishikawa, T., Kugo, J., and Nabata, E., 2020, "Influence of Tool Eccentricity on Surface Roughness in Gear Skiving," *Precis. Eng.*, **63**, pp. 170–176.
- [51] Ren, Z., Fang, Z., Arakane, T., Kizaki, T., Nishikawa, T., Feng, Y., Kugo, J., Nabata, E., and Sugita, N., 2021, "Parametric Modeling of Uncut Chip Geometry for Predicting Crater Wear in Gear Skiving," *J. Mater. Process. Technol.*, **290**(May 2020), p. 116973.

- [52] Usui, E., Shirakashi, T., and Kitagawa, T., 1984, "Analytical Prediction of Cutting Tool Wear," *Wear*, **100**(1), pp. 129–151.
- [53] Fang, Z., Ren, Z., Kizaki, T., Feng, Y., Kugo, J., Komatsu, Y., and Sugita, N., 2022, "Construction of Uncut Chip Geometry in Gear Skiving Using Level Contours," *Precis. Eng.*, **73**(April 2021), pp. 93–103.
- [54] Fang, Z., Ren, Z., Kizaki, T., and Sugita, N., 2022, "Interference-Based Technique for Designing Cutter Flank Using Multiple Radial Infeed in Gear Skiving," *Mech. Mach. Theory*, **169**(July 2021), p. 104678.
- [55] Ren, Z., Fang, Z., Kizaki, T., Feng, Y., Nagata, T., Komatsu, Y., and Sugita, N., 2022, "Understanding Local Cutting Features Affecting Surface Integrity of Gear Flank in Gear Skiving," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **172**(July 2021), p. 103818.
- [56] Schulze, V., Kühlewein, C., and Autenrieth, H., 2011, "3D-FEM Modeling of Gear Skiving to Investigate Kinematics and Chip Formation Mechanisms," *Adv. Mater. Res.*, **223**, pp. 46–55.
- [57] Guo, E., Hong, R., Huang, X., and Fang, C., 2014, "Research on the Design of Skiving Tool for Machining Involute Gears," *J. Mech. Sci. Technol.*, **28**(12), pp. 5107–5115.
- [58] Guo, E., Hong, R., Huang, X., and Fang, C., 2016, "A Novel Power Skiving Method Using the Common Shaper Cutter," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **83**(1–4), pp. 157–165.
- [59] Guo, E., Hong, R., Huang, X., and Fang, C., 2015, "Research on the Cutting Mechanism of Cylindrical Gear Power Skiving," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **79**(1–4), pp. 541–550.
- [60] Guo, Z., Mao, S. M., Li, X. E., and Ren, Z. Y., 2016, "Research on the Theoretical Tooth Profile Errors of Gears Machined by Skiving," *Mech. Mach. Theory*, **97**, pp. 1–11.
- [61] Guo, Z., Mao, S. M., Du, X. F., and Ren, Z. Y., 2017, "Influences of Tool Setting Errors on Gear Skiving Accuracy," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **91**(9–12), pp. 3135–3143.
- [62] Uriu, K., Osafune, T., Murakami, T., Nakamura, M., Iba, D., Funamoto, M., and Moriwaki, I., 2017, "Effects of Shaft Angle on Cutting Tool Parameters in Internal Gear Skiving," *J. Mech. Sci. Technol.*, **31**(12), pp. 5665–5673.
- [63] Moriwaki, I., Osafune, T., Nakamura, M., Funamoto, M., Uriu, K., Murakami, T., Nagata, E., Kurita, N., Tachikawa, T., and Kobayashi, Y., 2017, "Cutting Tool Parameters of Cylindrical Skiving Cutter with Sharpening Angle for Internal Gears," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, **139**(3).
- [64] Guo, Z., Mao, S. M., Huan, L., and Duan, D. S., 2018, "Research and Improvement of the Cutting Performance of Skiving Tool," *Mech. Mach. Theory*, **120**, pp. 302–313.
- [65] Shih, Y. P., and Li, Y. J., 2018, "A Novel Method for Producing a Conical Skiving Tool with Error-Free Flank Faces for Internal Gear Manufacture," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, **140**(4).
- [66] Shih, Y.-P., Li, Y.-J., Lin, Y.-C., and Tsao, H.-Y., 2022, "A Novel Cylindrical Skiving Tool with Error-Free Flank Faces for Internal Circular Splines," *Mech. Mach. Theory*, **170**(July 2021), p. 104662.
- [67] Balabanov, I. P., Gilman, V. N., Timofeeva, T. S., and Faskhutdinov, A. I., 2018, "Modeling of the Cutting Edge Rounding Influence on the Tool Life in Processing a Gear Wheel by the Power Skiving Method," *Int. J. Eng. Technol.*, **7**(4), pp. 71–73.
- [68] Astashchenko, V. I., and Gilazov, I. N., 2019, "A Comparative Analysis of Machining of Parts from 38H2MYuA by Cutting Tool of Different Materials," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **570**(1), pp. 4–7.

- [69] Arndt, T., Klose, J., Gerstenmeyer, M., and Schulze, V., 2021, "Tool Wear Development in Gear Skiving Process of Quenched and Tempered Internal Gears," *Forsch. im Ingenieurwesen/Engineering Res.*
- [70] Guo, E., Ren, N., Ren, X., and Liu, C., 2019, "An Efficient Tapered Tool Having Multiple Blades for Manufacturing Cylindrical Gears with Power Skiving," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **102**(9–12), pp. 2823–2832.
- [71] Monden, T., Kikuchi, T., Yoshikawa, K., Fujimura, N., and Georgoussi, A., 2019, "Super Skiving Cutter," *Gear Technol.*, (August), pp. 20–25.
- [72] Guo, E., Shi, Z., Hu, L., Zhang, E., and Ren, X., 2022, "Design Method of a Multi-Blade Skiving Tool for Gear Skiving," *Mech. Mach. Theory*, **173**(March), p. 104848.
- [73] Tsai, C. Y., 2021, "Power-Skiving Tool Design Method for Interference-Free Involute Internal Gear Cutting," *Mech. Mach. Theory*, **164**, p. 104396.
- [74] Kyratsis, P., Bilalis, N., and Antoniadis, A., 2011, "CAD-Based Simulations and Design of Experiments for Determining Thrust Force in Drilling Operations," *Comput. Des.*, **43**, pp. 1879–1890.
- [75] Tapoglou, N., and Antoniadis, A., 2012, "3-Dimensional Kinematics Simulation of Face Milling," *Measurement*, **45**, pp. 1396–1405.
- [76] Vasilis, D., Nectarios, V., and Aristomenis, A., 2007, "Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of Three-Dimensional Kinematics Modeling," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, **129**(5), pp. 911–918.
- [77] Nikolaos, T., and Aristomenis, A., 2012, "CAD-Based Calculation of Cutting Force Components in Gear Hobbing," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, **134**(3).
- [78] Antoniadis, A., 2012, "Gear Skiving - CAD Simulation Approach," *CAD Comput. Aided Des.*, **44**(7), pp. 611–616.
- [79] 1981, *DIN 3972, Bezugsprofile von Verzahnwerkzeugen Für Evolventen-Verzahnungen Nach DIN 867*, Taschenbuch 106.
- [80] Petri, H., 1975, "Zahnfuß-Analyse Bei Außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil I: Vorbetrachtungen," *Antriebstechnik*, **14**, pp. 19–22.
- [81] Petri, H., 1975, "Zahnfuß-Analyse Bei Außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil II: Berechnung," *Antriebstechnik*, **14**, pp. 125–131.
- [82] Petri, H., 1975, "Zahnfuß-Analyse Bei Außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil III: Berechnung," *Antriebstechnik*, **14**, pp. 289–297.
- [83] Petri, H., 1975, "Zahnfuß-Analyse Bei Außenverzahnten Evolventenstirnrädern. Teil IV: Bildliche Darstellung Mittels EDV," *Antriebstechnik*, **14**, pp. 369–371.
- [84] König W., and K., E., 1973, *Spezifische Schnittkraftwerte Für Die Zerspanung Metallischer Werkstoffe*, Verlag Stahleisen.