



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα
στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και
βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής**

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

ΥΠΟ ΤΟΝ

Μπελή Ταξιάρχη

Χανιά, Ιούλιος 2013



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

**Drilling simulation with use of the finite elements method
considering dynamic phenomena and cutting conditions
optimization**

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

by

Belis Taxiarchis

Chania, July 2013

Copyright © υπό Ταξιάρχη Μπελή
Χανιά 2013

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

Η διατριβή του Μπελή Ταξιάρχη εγκρίνεται από τους:

Αντωνιάδης Αριστομένης (Επιβλέπων)
Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

Σταυρουλάκης Γεώργιος (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)
Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

Τσιάφης Ιωάννης (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μπιλάλης Νικόλαος
Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

Μανσούρ Γκαμπριέλ
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Δουλάμης Αναστάσιος
Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

Σταυρουλάκη Μαρία
Επίκουρη Καθηγήτρια Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Πολυτεχνείο Κρήτης

στην Οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	III
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα	IV
Περίληψη	V
Abstract.....	VI
Λίστα μεταβλητών.....	VII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο της διατριβής	1
1.2 Στόχοι της διατριβής	1
1.3 Δομή της διατριβής	2
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	4
2.1 Συνοπτική παρουσίαση της κατεργασίας και του εργαλείου.....	4
2.2 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία της διάτρησης.....	7
2.2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του εργαλείου διάτρησης.....	8
2.2.2 Προσομοίωση της διάτρησης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων - ΜΠΣ	10
2.3 Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής.....	24
3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ.....	27
3.1 Προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία.....	27
3.2 Περιβάλλοντα ανάπτυξης του μοντέλου	28
3.3 Δομή του μοντέλου	30
3.4 Τρισδιάστατη μοντελοποίηση του εργαλείου	31
3.4.1 Διαδικασία μοντελοποίησης.....	32
3.4.2 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων κωνικών εργαλείων διάτρησης.....	34
3.4.3 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων υπερβολοειδών εργαλείων διάτρησης	36
3.4.4 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων ελλειψοειδών εργαλείων διάτρησης	37
3.5 Προσεγγίσεις προσομοίωσης της διάτρησης.....	38
3.5.1 Προσέγγιση της κοπής στις κύριες κόψεις με διαδοχικές λοξές κοπές.....	39
3.5.2 Προσέγγιση της κοπής στην εγκάρσια κόψη με διαδοχικές ορθογωνικές κοπές	42
3.5.3 Ανάλυση της γεωμετρίας του εργαλείου.....	42
3.6 Διαδικασία προσομοίωσης της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία.....	43
3.6.1 Διακριτοποίηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου	44
3.6.2 Διακριτοποίηση του στοιχειώδους κοπτικού εργαλείου - ΣΚΕ.....	47
3.6.3 Συνολικό αριθμητικό μοντέλο	48
3.6.4 Οριακές συνθήκες.....	53
3.6.5 Περιγραφή των μοντέλων υλικών.....	53
3.6.6 Επίλυση μοντέλου και σύγκλιση.....	56
3.7 Μετα-επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	58
3.7.1 Υπολογισμός δύναμης κοπής.....	60
3.7.2 Υπολογισμός ροπής	61
3.8 Το λογισμικό DIATRISIS Pre\Post	62
3.8.1 Περιβάλλον δημιουργίας κοπτικών εργαλείων διάτρησης	63
3.8.2 Διεπαφή προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία	64
3.8.3 Διεπαφή ανάλυσης κατεργασμένων οπών.....	66

4.	ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	68
4.1	Εξοπλισμός	68
4.2	Επιβεβαίωση μοντέλου δυνάμεων.....	69
4.2.1	Σχεδιασμός των πειραμάτων	70
4.2.2	Αποτελέσματα	71
5.	ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΟΠΗΣ.....	75
5.1	Πειραματική διερεύνηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίπτου	77
5.1.1	Πειραματική διάταξη.....	77
5.1.2	Σχεδιασμός των πειραμάτων	79
5.1.3	Αποτελέσματα	80
5.2	Στατική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης	82
5.2.1	Περιγραφή του μοντέλου DRILL3D.....	82
5.2.2	Περιγραφή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του εργαλείου.....	83
5.2.3	Αλγόριθμος κατανομής δυνάμεων στις παρειές του εργαλείου.....	84
5.2.4	Αποτελέσματα κατανομής τάσεων.....	86
5.3	Δυναμική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης	90
5.3.1	Ιδιομορφική ανάλυση του εργαλείου.....	90
5.3.2	Απόκριση συχνοτήτων του εργαλείου σε αρμονική φόρτιση.....	92
5.3.3	Αλγόριθμος κατανομής δυναμικών φορτίσεων στις παρειές του εργαλείου	93
5.3.4	Χρονική απόκριση του εργαλείου σε δυναμική φόρτιση.....	93
5.3.5	Αποτελέσματα κατανομής τάσεων υπό δυναμική φόρτιση	95
5.4	Πρόβλεψη ποιοτικών χαρακτηριστικών οπής.....	97
5.5	Επιβεβαίωση μοντέλου ανάλυσης εργαλείων και οπής	100
5.5.1	Σχεδιασμός των πειραμάτων	101
5.5.2	Αποτελέσματα	101
5.6	Διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας σε σχέση με την ποιότητα της οπής.....	108
5.6.1	Επίδραση της ταχύτητας κοπής στα χαρακτηριστικά της οπής	108
5.6.2	Επίδραση του εργαλείου στα χαρακτηριστικά της οπής	109
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	111
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114

Ευχαριστίες

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

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την αδιάκοπη καθοδήγησή του και τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε. Η συμβολή του υπήρξε ουσιαστική, αφού ήταν πάντα παρών για να με βοηθήσει να πετύχω τους σωστούς στόχους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και κ. Ιωάννη Τσιάφη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για το χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγησή της και τις παρατηρήσεις τους για βελτίωση της ποιότητάς της.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ το φίλο και συνάδελφό μου Δρ. Μηχ. Νικόλαο Ταπόγλου για τη βοήθεια, την ενθάρρυνση και τις γνώσεις που απέκτησα κοντά του. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και συνάδελφο Διπλ. Μηχ. Δημήτριο Βακόνδιο για τη φιλία, την ακούραστη βοήθεια και στήριξή του. Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Μηχ. Παναγιώτη Κυράτση, τη Δρ. Μηχ. Μαρία Παππά, τη Δρ. Μηχ. Αναστασία Κατσαμάκη και την ασυναγώνιστη ομάδα του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης για την πολύπλευρη βοήθειά τους.

Για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την Οικογένειά μου και την Ελευθερία.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Ταξίαρχης Μπελής γεννήθηκε στην Αθήνα το 1985. Το 2003 εισήχθη στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης από όπου και αποφοίτησε το 2008. Εν συνεχεία εισήχθη στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του τομέα Συστημάτων Παραγωγής του ίδιου τμήματος, ενώ από τον Ιούνιο του 2010 είναι υποψήφιος διδάκτωρ στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

Από το 2009 έως σήμερα εργάστηκε ως εργαστηριακός συνεργάτης των μαθημάτων «Στοιχεία Μηχανών», «Μετρολογία» και «Κατασκευαστικές Τεχνολογίες σε Μικροκλίμακα». Από το 2009 έως σήμερα έχει εργαστεί με συμβάσεις έργου σε εθνικά ερευνητικά προγράμματα όπως: «Προσδιορισμός φθοράς σε κατεργασίες οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση» και «Ανάπτυξη νέων προϊόντων και αντιγράφων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση ψηφιοποίησης και τεχνολογιών παραγωγής σε μικροκλίμακα».

Κεφάλαια βιβλίων:

- Belis T., Kyratsis P., Antoniadis A., “Stress analysis on twist drill tools combining CAD based methodology and finite element analysis”, MACHINING operations, technology and management, NOVA Science Publishers USA

Δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές:

- Belis T., Antoniadis A., “An explicit 3D Lagrangian finite element model for the determination of the thrust force distribution in drilling of AL7075”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing
- Belis T., Pappa M., Antoniadis A., “Chip formation characteristics in high speed machining of AL7075-T6 utilizing high-speed microvideography”, International Journal of Machining and Forming Technologies

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές:

- Tapoglou N., Belis T., Vakondios D., Antoniadis A., “CAD based Simulation of Gear Hobbing”, 31th International Workshop on Mechanics and Materials, 9-14/5 Chania, Greece
- Belis T., Antoniadis A., “Hobbing Wear Prediction Model Based on 3D Chips Determination” International Conference on Design, Technology and Management in Manufacturing 2010 SPECIAL PRIZE AWARDED, 14-16/5 Iasi, Romania.
- Belis T., Tsafarakis S., Doulamis A., “Real-time Traceability and Intelligent Product Management in the Supply Chain. An ontology based approach with use of RFID and RSS.” International Workshop on RFID Technology-Concepts, Applications, Challenges 2009. 6-7/5 Milan, Italy.
- Belis T., Doulamis A., “Distributed Multimedia Metadata Tracking and Management. An ontology-based approach with use of RSS.” IEEE International Workshop on Systems, Signals and Image Processing 2009. 18-20/6 Chalkida, Greece.

Περίληψη

Η κατασκευή μηχανολογικών τεμαχίων απαιτεί μια σειρά από διαμορφώσεις. Από τις διαμορφώσεις αυτές οι οπές είναι οι πιο διαδεδομένες, καθώς είναι απαραίτητες στη συναρμολόγηση τεμαχίων και ειδικότερα στις κοχλιώσεις, στις ηλώσεις, στις συναρμογές εδράνων κύλισης και ολίσθησης, αλλά και στη ροή ρευστών για λίπανση ή ψύξη. Είναι λοιπόν σαφές πως η παραμικρή βελτίωση της κατεργασίας, των εργαλείων και της ποιότητας των τελικών προϊόντων, είναι ικανή να δώσει το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην εκάστοτε βιομηχανία. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στο επιστημονικό πεδίο της διάτρησης έχει ενταθεί.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης της διάτρησης καθώς και της επίδρασης των δυναμικών χαρακτηριστικών, τόσο στο εργαλείο όσο και στην τελική ποιότητα της οπής. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση της κατεργασίας αφορά την εστίαση στις περιοχές κοπής και τον χωρισμό του μακροσκοπικού μοντέλου της διάτρησης σε μια σειρά ισοδύναμων λοξών και ορθογωνικών μοντέλων κοπής. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης εντοπίζονται στον ακριβή προσδιορισμό της κατανομής της δύναμης κοπής και της ροπής στις κόψεις του εργαλείου, αλλά και στη δραστική μείωση του χρόνου επίλυσης.

Για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών αναπτύχθηκε λογισμικό το οποίο ενσωματώνει όλα τα στάδια της προεπεξεργασίας και της μεταεπεξεργασίας του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό σχεδιάζει αυτόματα τη 3D γεωμετρία του εργαλείου διάτρησης και αναλαμβάνει την προεπεξεργασία των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων μέχρι την εξαγωγή του τελικού αρχείου επίλυσης. Η διακριτοποίηση των δισδιάστατων τεμαχίων της ορθογωνικής κοπής και των τρισδιάστατων τεμαχίων της λοξής, έγινε μέσω ειδικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, με αυτόματη πύκνωση του πλέγματος στο επίπεδο κοπής ή πάνω από αυτό. Για τη διακριτοποίηση του κοπτικού εργαλείου με πύκνωση του πλέγματος στην κοπτική ακμή, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος τριγωνοποίησης Delaunay. Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν τη ροπή και τις συνολικές δυνάμεις κοπής, την κατανομή τους στις κόψεις του εργαλείου και τις τάσεις που αναπτύσσονται στο τεμάχιο. Τα αποτελέσματα των δυνάμεων επαληθεύτηκαν μέσω εκτενούς σειράς πειραμάτων δυναμομέτρησης.

Για τη μελέτη των τάσεων και των μετατοπίσεων του εργαλείου, υπό στατικό ή δυναμικό φορτίο, αναπτύχθηκε ειδικός αλγόριθμος κατανομής των δυνάμεων κοπής. Τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου εντοπίζονται στην ενσωμάτωσή του σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων αυτοματοποιώντας τη διαδικασία μοντελοποίησης, όπως επίσης και η διασύνδεσή του με άλλα μοντέλα υπολογισμού δυνάμεων. Ένα βασικό δεδομένο εισόδου για την ανάλυση των κοπτικών εργαλείων αποτελεί ο λόγος συμπίεσης αποβλίπτου. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό αυτής της ποσότητας αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ανάλυσης των εργαλείων διάτρησης περιλαμβάνουν την κατανομή των τάσεων και των μετατοπίσεων. Επιπλέον, η δυναμική απόκριση του εργαλείου χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορισθεί η τρισδιάστατη οπή και εν συνεχεία να υπολογιστούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της. Τα χαρακτηριστικά αυτά επαληθεύτηκαν με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Μηχανουργικές κατεργασίες, Υπολογιστική μηχανική, Δυναμική

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Διάτρηση, FEM, Δυναμική, Σχεδιασμός εργαλείων, Ποιότητα οπών

Abstract

Hole defects can lead to expensive production waste, as drilling operations are usually among the final stages in a manufacturing plan. A significant percentage of these problems refer to the wrong selection of cutting conditions. Common problems include unnecessary forces that lead to stress concentrations and thus reduced drill life and self-exciting vibrations. These problems affect the surface finish and final dimensional accuracy. To overcome these problems an extensive tool force analysis has to be conducted in order to investigate the distribution and magnitude of the forces arising, for different tool geometries and cutting conditions.

The present thesis introduces a novel simulation code called DIATRISIS that simulates the process of drilling, considering dynamic phenomena and their effects on the cutting tool and workpiece.

The first step of the proposed method involves the accurate tool modeling. For this purpose a custom standalone application based on the API (Application Programming Interface) of a commercial CAD system has been developed. The application is able to create 3D solid models of conical, hyperboloidal and ellipsoidal twist drills. Furthermore the software is able to model the drill shank and margin, which is very useful in the cutting tool's static and dynamic analysis.

The method proposed, considers the drill's main cutting edge as a series of ten oblique sub models whereas the half of chisel edge is divided in two orthogonal sub models. This approach provides user with faster calculation times and more accurate results. For each sub model, the elementary cutting tool and workpiece geometry are determined, as well as their positioning and assembly. The geometry of each section is derived from analysis of the 3D solid model. The third step involves the customized discretization of each model as well as defining the contacts, the material model, the boundary conditions and the simulation parameters. DIATRISIS is then used for developing the appropriate input file for the solver. Finally the software post processes the results in order to extract the thrust force and torque distribution, both in the main cutting edge and the chisel. The simulation results were extensively verified by a number of experiments, approving the reliability of DIATRISIS. A graphical user interface has been developed in order to automate the above procedure.

Moreover, a finite element program was used to simulate the displacements and the stresses distribution on all the cutting edges under static or dynamic loading. The algorithm developed combines the resulting cutting forces distribution with DRILL3D chip thickness results in order to calculate the model boundary conditions. In the first step the contact length of the chip-tool interface was accurately calculated using the chip compression ratio (CCR). The CCR was accurately measured by a special experimental setup that has been introduced, utilizing a high-speed camera. The second step involves the interpolation of the time dependent tool displacements into the tool trajectory, forming a 3D deformed hole. In the last step the software calculates the hole quality characteristics such as roundness, cylindricity, concentricity and coaxiality according to the ISO standards.

SUBJECT AREA: Machining simulation, Computational mechanics, Dynamics

KEYWORDS: Drilling, FEM, Dynamics, Tool design, Hole quality

Λίστα μεταβλητών

A	: τάση διαρροής που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0,2% [MPa]
A_i	: εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχείου στο οποίο διεισδύει ο δευτερεύον κόμβος [m ²]
A_{max}	: εμβαδόν της μεγαλύτερης πλευράς του πεπερασμένου στοιχείου [m ²]
a_p	: βάθος κοπής [mm]
B, n	: σταθερές που σχετίζονται με τα φαινόμενα σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης
C	: σταθερά του μοντέλου σχετικά με το ρυθμό παραμόρφωσης
c	: αδιαβατική ταχύτητα του ήχου σε στερεά [m/sec]
D	: διάμετρος του εργαλείου σε [mm]
d	: μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Z* [mm]
d_x	: απόσταση εργαλείου από το τεμάχιο [mm]
d_k	: απόσταση κόμβου k από την ακμή του εργαλείου [mm]
e	: απόσταση που διανύει ο δευτερεύων κόμβος [m]
E_t	: εφαπτομενικό μέτρο [Pa]
E	: μέτρο ελαστικότητας [Pa]
$F_{z_{b_{k,i,j}}}$: δύναμη που αντιστοιχεί στον κόμβο k, του στοιχειώδους αποβλίττου j, του στοιχειώδους υπο-αποβλίττου i [N]
F_f	: δύναμη τριβής [N]
F_n	: δύναμη κάθετη στο επίπεδο επαφής [N]
F_{Ni}	: δύναμη που αντιστοιχεί στον περιφερειακό κόμβο i [N]
f_{min}	: πρόωση ανά λεπτό [mm/min]
f_{si}	: παράγοντας δυσκαμψίας της διεπαφής
f_{ni}	: ιδιομορφή i του εργαλείου
f_z	: πρόωση ανά περιστροφή [mm/rev]
G	: μέτρο διάτμησης [Pa]
h	: γωνία ελίκωσης [deg]
h_j	: πάχος στοιχειώδους αποβλίττου j [N]
h_{min}	: ελάχιστο ύψος του τετράεδρου πεπερασμένου στοιχείου [m]
h_w	: ύψος τεμαχίου [mm]
$init$: κόμβος αναφοράς της διακριτοποίησης
k	: δυσκαμψία της διεπαφής [N/m]
K	: μέτρο συμπίεσης [Pa]
K_i	: μέτρο συμπίεσης πεπερασμένου στοιχείου i [Pa]
k_i	: παράγοντας δυσκαμψίας πρωτεύοντος τμήματος
L_e	: χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου το οποίο εξαρτάται από τον τύπο και το πλήθος των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου
l	: απόσταση διείσδυσης του δευτερεύοντα κόμβου στο πρωτεύον τμήμα [m]
l_w	: μήκος τεμαχίου [mm]
mat_{mt}	: αριθμός μοντέλου υλικού του εργαλείου
mat_{mw}	: αριθμός μοντέλου υλικού του τεμαχίου
mat_{tid}	: αριθμός υλικού εργαλείου στη βάση δεδομένων
mat_{wid}	: αριθμός υλικού τεμαχίου στη βάση δεδομένων
m_c	: μάζα των κόμβων του τμήματος της επαφής [Kg]
m	: σταθερά που σχετίζεται με την αποσκλήρυνση του υλικού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας

m_{master} : μάζα πρωτεύοντος τμήματος [Kg]
 m_{slave} : μάζα δευτερεύοντος τμήματος [Kg]
 m_{cpe} : διακριτοποίηση τεμαχίου πάνω από το επίπεδο κοπής κατά τον άξονα z
 m_{tw} : διακριτοποίηση του πλάτους του εργαλείου κατά τον άξονα y
 m_{rd} : αριθμός επαναλήψεων πύκνωσης του πλέγματος
 m_{hr} : ύψος πύκνωσης της διακριτοποίησης
 m_{tmm} : αριθμός μεθόδου διακριτοποίησης του εργαλείου
 m_{wmm} : αριθμός μεθόδου διακριτοποίησης του τεμαχίου
 m_x : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα x
 m_y : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα y
 m_z : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα z
 n : στροφές της ατράκτου σε [rpm]
 n_i : κάθετο διάνυσμα στο σημείο επαφής στο πρωτεύον τμήμα
 N : συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων
 N_p : συνολικός αριθμός κόμβων σε κάθε επίπεδο διακριτοποίησης
 N_{tot} : συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων
 NCE : πλήθος των κόμβων της κοπτικής ακμής
 n : πλήθος των στοιχειωδών αποβλίπτων
 N_{pi} : πλήθος των επιλεγμένων κόμβων της περιοχής που αντιστοιχεί στον κόμβο i
 p_f : πίεση που ασκείται στο στοιχείο [Pa]
 ρ : ημιγωνία της κορυφής του εργαλείου [deg]
 P_{tz} : μητρώο συντεταγμένων z των κόμβων εργαλείου
 r : πολική συντεταγμένη της διατομής του εργαλείου, η οποία μεταβάλλεται από w/2 έως D/2 [mm]
 r_i : κάθετη απόσταση του στοιχειώδους εργαλείου i από τον άξονα του εργαλείου [m]
 s : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Y* [mm]
 $t(n,k)$: μητρώα αριθμών κόμβων
 T^* : θερμοκρασία [K]
 T_{test} : θερμοκρασία των δοκιμών αντοχής [K]
 T_{room} : θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]
 T_{asm} : πίνακας μετασχηματισμού για την σχετική τοποθέτηση του εργαλείου
 T_t : πίνακας των συντεταγμένων των κόμβων του εργαλείου
 u : πολική συντεταγμένη της διατομής του εργαλείου [deg]
 v_c : ταχύτητα κοπής [m/min]
 v_{ci} : ταχύτητα κοπής του στοιχειώδους εργαλείου i [m/sec]
 v_f : ταχύτητα της πρόωσης [m/sec]
 V_i : όγκος πεπερασμένου στοιχείου i [m³]
 V : όγκος [m³]
 v : σχετική ταχύτητα μεταξύ του δευτερεύοντα κόμβου και του κύριου τμήματος επαφής [m/sec]
 W : πάχος του πυρήνα του εργαλείου [mm]
 w_w : πλάτος τεμαχίου [mm]
 \dot{x}_i^j : ταχύτητα του κόμβου j στη διεύθυνση i [m/sec]
 x_o^* : συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα x [mm]
 y_o^* : συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα y [mm]

z	: ο αριθμός των κόψεων
z_0^*	: συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα z [mm]
a, c	: παράμετροι της υπερβολής
α	: παράγοντας ασφαλείας
γ	: γωνία αποβλίπτου [deg]
Δt	: χρονικό βήμα [sec]
Δt_{n+1}	: χρονικό βήμα ολοκλήρωσης [sec]
Δt_i	: χρονικό βήμα ολοκλήρωσης πεπερασμένου στοιχείου i [sec]
δ	: γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής [deg]
ϵ_p	: ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
ϵ_y	: παραμόρφωση στη θέση διαρροής
ϵ_{ult}	: παραμόρφωση στη θέση αστοχίας
$\dot{\epsilon}^*$: αδιάστατος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης για $\dot{\epsilon}_0 = 1/\text{sec}$
$\dot{\epsilon}$: ρυθμός παραμόρφωσης [sec^{-1}]
$\dot{\epsilon}_{ij}$: ρυθμός παραμόρφωσης κόμβου j στη διεύθυνση i [sec^{-1}]
$\bar{\epsilon}_p$: ενεργός πλαστική παραμόρφωση
ζ_c	: κρίσιμος λόγος απόσβεσης
θ	: ημιγωνία του κώνου τροχίσματος [deg]
θ_i	: προβολή της γωνίας κλίσης του στοιχειώδους εργαλείου i στο επίπεδο $x-y$ [deg]
λ	: γωνία κλίσης του εργαλείου [deg]
λ_i	: γωνία κλίσης του στοιχειώδους εργαλείου i σε σχέση με το τεμάχιο [deg]
λ_{c_j}	: λόγος συμπίεσης αποβλίπτου j
μ	: ολικός συντελεστής τριβής του μοντέλου
μ_d	: συντελεστής τριβής ολίσθησης
μ_s	: συντελεστής στατικής τριβής
ν	: λόγος Poisson
ξ	: γωνία εγκάρσιας κόψης [deg]
ρ	: πυκνότητα υλικού [Kg/m^3]
σ_y	: στατικό όριο διαρροής [Pa]
σ_d	: δυναμικό όριο διαρροής [Pa]
σ_x	: ορθή τάση στη διεύθυνση x [Pa]
σ_y	: ορθή τάση στη διεύθυνση y [Pa]
σ_z	: ορθή τάση στη διεύθυνση z [Pa]
σ_y	: τάση διαρροής υλικού [MPa]
σ_{eff}	: ενεργός τάση [Pa]
σ_{ult}	: τάση αστοχίας [Pa]
σ_y	: τάση διαρροής [Pa]
τ_{xy}	: διατμητική τάση στο επίπεδο xy [Pa]
τ_{yz}	: διατμητική τάση στο επίπεδο yz [Pa]
τ_{zx}	: διατμητική τάση στο επίπεδο zx [Pa]
φ	: γωνία τοποθέτησης του κώνου τροχίσματος σε σχέση με το εργαλείο [deg]
φ_k	: συναρτήσεις παρεμβολής
ω_n	: ιδιοσυχνότητα συστήματος [Hz]

1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας προσομοίωσης της διάτρησης λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά, τη μελέτη των συνθηκών κοπής καθώς και την επίδρασή τους στο τελικό προϊόν. Η διάτρηση είναι μια από τις κυριότερες μηχανουργικές κατεργασίες δεδομένου ότι σχεδόν όλα τα μηχανολογικά εξαρτήματα περιλαμβάνουν οπές. Επιπλέον, η κατεργασία της διάτρησης λαμβάνει χώρα στα τελευταία στάδια μιας παραγωγικής διαδικασίας και συνεπώς οποιαδήποτε αστοχία ανεβάζει αρκετά το κόστος παραγωγής.

Η πολύπλοκη γεωμετρία του εργαλείου, η αδυναμία παρακολούθησης της κοπής, η δυσχερής απομάκρυνση των αποβλίπων και η ελλιπής ψύξη της περιοχής κοπής, αποτελούν μερικούς από τους βασικότερους παράγοντες που δυσχεραίνουν τη μελέτη της κατεργασίας. Από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς από τους ερευνητές ξεχωρίζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία χρησιμοποιείται στο πεδίο της προσομοίωσης κατεργασιών κοπής κυρίως κατά την τελευταία εικοσαετία. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δίνει τη δυνατότητα συνδυαστικής προσομοίωσης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην κοπή, δίνοντας έτσι μια καλή και γενικευμένη προσέγγιση των αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτείται πληθώρα χρονοβόρων και κοστοβόρων πειραμάτων για την ανάπτυξη εμπειρικών και αναλυτικών μοντέλων.

Τέλος, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της εφαρμοσμένης έρευνας σε βιομηχανικό επίπεδο με πληθώρα νέων και βελτιωμένων εργαλείων διάτρησης, ως προϊόν της αύξησης των διαθέσιμων εργαλείων προσομοίωσης και της ανάγκης για αύξηση της παραγωγικότητας.

1.2 Στόχοι της διατριβής

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

- **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία, εστιασμένο στην περιοχή κοπής.** Το μοντέλο έπρεπε να αναλαμβάνει όλα τα στάδια της προεπεξεργασίας των δεδομένων και της μεταεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν την τρισδιάστατη μοντελοποίηση εργαλείων διάτρησης, την τρισδιάστατη ανάλυση της γεωμετρίας τους, το μετασχηματισμό σε ισοδύναμο μοντέλο λοξής και ορθογωνικής κοπής, τη συναρμολόγηση του μοντέλου, τη 2D και 3D διακριτοποίηση του συστήματος τεμαχίου-εργαλείου, την εισαγωγή οριακών συνθηκών, μοντέλων υλικών, δεδομένων επαφής, δεδομένων προσομοίωσης και τέλος την εξαγωγή τελικού αρχείου επιλύτη. Το μοντέλο έπρεπε να επιβεβαιωθεί μέσα από σειρά πειραμάτων για διάφορες συνθήκες κοπής. Τα παραπάνω έπρεπε να ενσωματωθούν σε μια ενιαία πλατφόρμα προσομοίωσης της κατεργασίας η οποία θα συνοδεύεται από πλήρως λειτουργικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη.
- **Ανάπτυξη μοντέλου στατικής και δυναμικής ανάλυσης του κοπτικού εργαλείου με πεπερασμένα στοιχεία.** Το μοντέλο έπρεπε να ενσωματωθεί σε γενικής φύσης λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία ανάλυσης των εργαλείων. Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει την εισαγωγή της γεωμετρίας, τη διακριτοποίηση με κατάλληλη πύκνωση πλέγματος στις περιοχές

ενδιαφέροντος, την εισαγωγή οριακών συνθηκών, την ανάπτυξη νέου αλγορίθμου κατανομής των δυνάμεων κοπής και την ανάπτυξη ενός μεταεπεξεργαστή για την κατάλληλη παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή συμπίεσης αποβλίπτου που απαιτείται από τον αλγόριθμο κατανομής δυνάμεων έπρεπε να αναπτυχθεί ειδική πειραματική διάταξη μέτρησης με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών.

- **Ανάπτυξη μοντέλου υπολογισμού χαρακτηριστικών οπής.** Το μοντέλο έπρεπε να κάνει χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου δυναμικής ανάλυσης του εργαλείου και να κατασκευάζει την τρισδιάστατη οπή. Από την προσομοιωμένη οπή θα εξάγονται τα χαρακτηριστικά της οπής σύμφωνα με πρότυπα ISO ενώ θα έπρεπε να γίνει και εκτενής πειραματική επαλήθευση. Για τη μέτρηση των οπών θα έπρεπε να αναπτυχθεί πρωτόκολλο μετρήσεων βασισμένο σε πενταξονικό κέντρο κατεργασιών και με χρήση τρισδιάστατου αισθητήρα επαφής.
- **Έλεγχος της επίδρασης των συνθηκών κοπής.** Στο τέλος έπρεπε να ελεγχθεί η επίδραση των συνθηκών κοπής στις μέγιστες τιμές της δύναμης, στην κατανομή της στις κύριες και στην εγκάρσια κόψη, στις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται, στην κατανομή τους στο εργαλείο και στα χαρακτηριστικά της οπής.

1.3 Δομή της διατριβής

Στο **κεφάλαιο 2** της στάθμης των γνώσεων παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας στα θέματα της διάτρησης. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται οι ερευνητικές προσεγγίσεις των ερευνητικών ομάδων στα επιμέρους θέματα της προσομοίωσης της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία, οι οποίες χωρίζονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες :

- **Μελέτη εργαλείου:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μελέτες που ασχολούνται με το εργαλείο διάτρησης και ειδικότερα με τις τάσεις και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του, τις επικαλύψεις και τις μηχανικές αντοχές του.
- **Μελέτη κατεργαζόμενης οπής:** Οι μελέτες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία ασχολούνται με την κατεργαζόμενη οπή και ειδικότερα με τις αστοχίες που λαμβάνουν χώρα. Ένα σημαντικό μέρος αυτών των ερευνών έχει να κάνει με τη μελέτη της απόληξης, ενώ άλλα μοντέλα μελετούν την ανάπτυξη των τάσεων και των θερμοκρασιών στο τεμάχιο.
- **Μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μελέτες που ασχολούνται με τα μεγέθη που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία της διάτρησης. Τα μοντέλα αυτά μελετούν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, τα χαρακτηριστικά της κοπής και τη μελέτη του παραγόμενου αποβλίπτου.

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

- Σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος που αναπτύχθηκε η εφαρμογή και περιγραφή των συνεργαζόμενων υποσυστημάτων.
- Περιγραφή της δομής του μοντέλου και ειδικότερα των δεδομένων εισόδου, της διαδικασίας προσομοίωσης και της παρουσίασης των αποτελεσμάτων.
- Παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης εργαλείων διάτρησης με κωνική, υπερβολοειδή και ελλειψοειδή κεφαλή.

- Προσέγγιση της διαδικασίας της διάτρησης και μετασχηματισμός του μακροσκοπικού μοντέλου σε σειρά μοντέλων 2D ορθογωνικής και 3D λοξής κοπής.
- Περιγραφή του προεπεξεργαστή που αναπτύχθηκε με έμφαση στις επιμέρους διαδικασίες.
- Περιγραφή της διεπαφής του λογισμικού DIATRISIS που αναπτύχθηκε για την αυτοματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών.
- Μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων και κατάλληλος μετασχηματισμός σε δύναμη κοπής και ροπή διάτρησης.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται ο εξοπλισμός και η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής. Επιπλέον περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό, τόσο της συνολικής δύναμης κοπής, όσο και της κατανομής της στις κύριες και στην εγκάρσια κόψη του εργαλείου. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του μοντέλου που αναπτύχθηκε για διάφορες συνθήκες κοπής.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το μοντέλο ανάλυσης του εργαλείου και της οπής. Η δομή του κεφαλαίου συνοπτικά είναι η εξής:

- Περιγραφή της πειραματικής διάταξης με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών για παρακολούθηση της κοπής και υπολογισμό του συντελεστή συμπίεσης αποβλίπτου.
- Στατική ανάλυση του εργαλείου με περιγραφή του αλγορίθμου κατανομής των δυνάμεων κοπής και τη διασύνδεση του συστήματος με το σύστημα DRILL3D.
- Προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών του εργαλείου και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων.
- Περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης των χαρακτηριστικών της οπής και περιγραφή του λογισμικού παρουσίασης των αποτελεσμάτων.
- Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας μέτρησης των χαρακτηριστικών της οπής με τρισδιάστατο αισθητήρα επαφής.

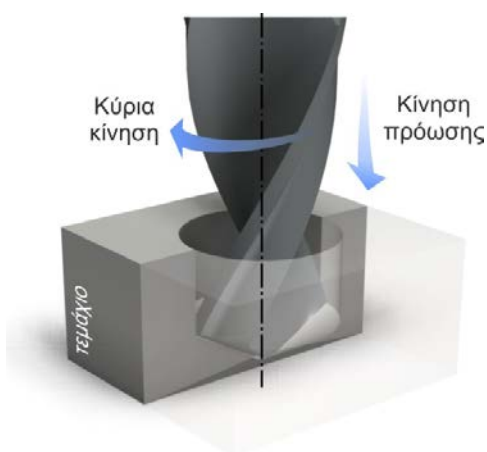
Τέλος, στα **Κεφάλαιο 6** και **7** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές κατευθύνσεις της διατριβής καθώς και η βιβλιογραφία.

Η κατασκευή μηχανολογικών τεμαχίων απαιτεί μια σειρά από διαμορφώσεις, εκ των οποίων οι οπές είναι οι πιο διαδεδομένες. Οι οπές είναι απαραίτητες στη συναρμολόγηση τεμαχίων και ειδικότερα στις κοχλιώσεις, στις ηλώσεις, στις συναρμογές εδράνων κύλισης και ολίσθησης, αλλά και στη ροή ρευστών για λίπανση ή ψύξη. Ως διάτρηση εννοείται η μηχανουργική κατεργασία διάνοιξης ή διεύρυνσης οπών διαμέτρου συνήθως από 0,1mm έως 60mm. Μικρότερες οπές συνήθως γίνονται με τη βοήθεια laser ή ηλεκτροδιάβρωσης, ενώ οι μεγαλύτερες με εσωτερική τόννευση. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα στο επιστημονικό πεδίο της διάτρησης έχει ενταθεί, με εκατοντάδες ερευνητές σε όλον τον κόσμο να ασχολούνται σε διάφορους σχετικούς τομείς. Οι κυριότεροι λόγοι αυτής της αύξησης της ερευνητικής δραστηριότητας είναι οι εξής :

- Η διάτρηση έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογής, καθώς τα περισσότερα μηχανολογικά εξαρτήματα έχουν οπές. Η παραμικρή λοιπόν βελτίωση της κατεργασίας μπορεί να δώσει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην βιομηχανία.
- Η διάτρηση έχει προστιθέμενη αξία, λόγω του ότι λαμβάνει χώρα στα τελευταία στάδια της παραγωγής. Έτσι, πιθανή αστοχία στη διάτρηση των τεμαχίων, αυξάνει πολύ το κόστος παραγωγής.
- Η δυσχερής απομάκρυνση του αποβλίπτου λόγω της εισχώρησης και της γεωμετρίας του κοπτικού, οδηγεί σε αύξηση της τριβής, της θερμοκρασίας και της φθοράς του τρυπανιού.
- Η φύση της διάτρησης καθιστά αδύνατη την παρακολούθηση της κοπής και δυσχεραίνει τον έλεγχο της κατεργασίας.
- Η εισχώρηση ψυκτικού υγρού στην περιοχή κοπής είναι εξαιρετικά δύσκολη και δυσχεραίνεται από την ροή του αποβλίπτου.
- Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου είναι πολύπλοκη και παρουσιάζει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης.
- Η αυξανόμενη χρήση προηγμένων υλικών, υψηλών μηχανικών αντοχών, οδηγεί στην υιοθέτηση νέων στρατηγικών διάτρησης.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ερευνητικές μελέτες της επιστημονικής κοινότητας σχετικά με τη γεωμετρία του εργαλείου και την προσομοίωση της κατεργασίας με πεπερασμένα στοιχεία με σκοπό τη μελέτη των διάφορων φαινομένων.

2.1 Συνοπτική παρουσίαση της κατεργασίας και του εργαλείου



Σχήμα 2.1 Κινηματική της διάτρησης

Η κινηματική της διάτρησης είναι απλή και παρόμοια με αυτήν της τόννευσης. Ειδικότερα η διάτρηση αποτελεί ένα συνδυασμό δύο επιμέρους κινήσεων, όπως αυτές φαίνονται στο [Σχήμα 2.1](#).

- Η κύρια κίνηση κοπής είναι περιστροφική και αντιστοιχεί στην περιστροφή του εργαλείου γύρω από τον άξονά του. Η συνθήκη που συνδέεται άμεσα με την κίνηση αυτή είναι η ταχύτητα κοπής που εκφράζεται σε [m/min] και μεταφράζεται στις εργαλειομηχανές σε ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε [rpm], με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.1)
- Η δευτερεύουσα κίνηση είναι μεταφορική και αντιστοιχεί στην πρόωση του εργαλείου με φορά

προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η συνθήκη που συνδέεται με την κίνηση αυτή είναι η πρόωση που εκφράζεται σε [mm/rev] και συνήθως δίνεται στις εργαλειομηχανές ως [m/min], με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.2).

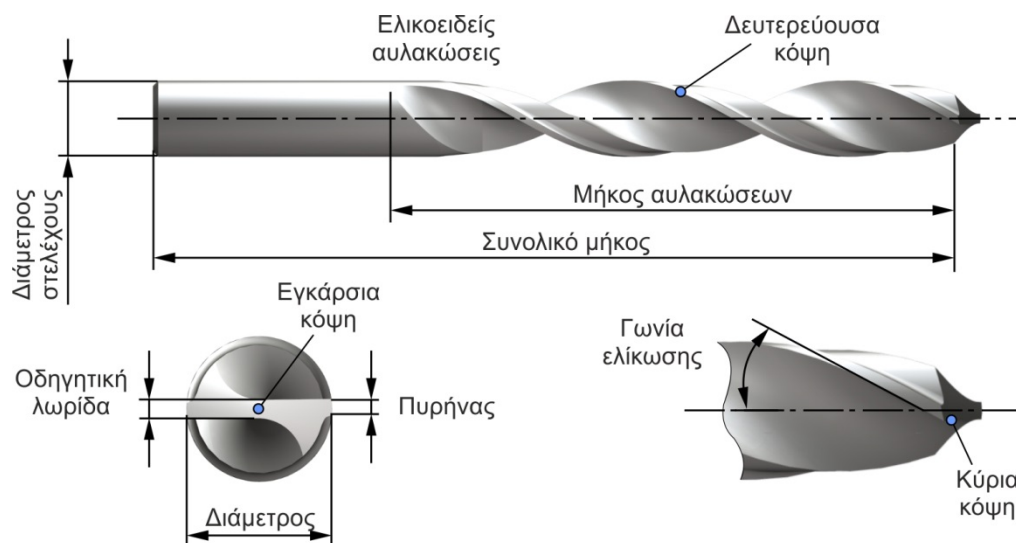
$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2.1)$$

$$f_{\min} = f_z z n \quad (2.2)$$

όπου:

- f_{\min} : πρόωση ανά λεπτό [mm/min]
- f_z : πρόωση ανά περιστροφή [mm/rev]
- z : ο αριθμός των κόψεων
- n : οι στροφές της ατράκτου σε [rpm]
- v_c : η ταχύτητα κοπής [m/min] και
- D : η διάμετρος του εργαλείου σε [mm]

Η ενδεδειγμένη εργαλειομηχανή για κατεργασίες διάτρησης είναι το δράπανο, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί εξίσου και σε φραιζες, τόνρους και σύγχρονα κέντρα κατεργασίας. Το εργαλείο διάτρησης είναι το ελικοειδές τρυπάνι του οποίου η βασική γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου διάτρησης

Η πιο σημαντική περιοχή του τρυπανιού είναι η κορυφή, διότι εκεί συντελείται η κοπή. Η κορυφή αποτελείται από δύο κύριες κόψεις και από μια εγκάρσια κόψη, η οποία ενώνει τις δύο κύριες. Η κορυφή αποτελεί επίσης την αφετηρία των δύο δευτερευουσών κόψεων. Στις κύριες κόψεις η κοπή γίνεται όπως σε όλες τις κλασσικές μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, υπό την έννοια πως η κόψη αποτελεί μια κοπτική σφήνα μεταβλητής γεωμετρίας η οποία περιστρεφόμενη και προωθούμενη προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αφαιρεί υλικό. Στην εγκάρσια κόψη η γωνία αποβλίπτου είναι έντονα αρνητική και η ταχύτητα κοπής σχεδόν μηδενική. Υπό αυτές τις συνθήκες το υλικό δεν αφαιρείται αλλά παραμορφώνεται και εξωθείται προς τις κύριες κόψεις.

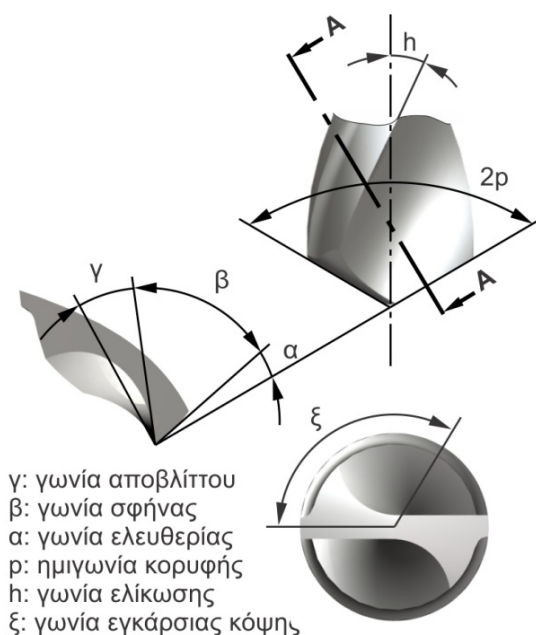
Οι δευτερεύουσες κόψεις, οι οποίες βρίσκονται στα άκρα των αυλακώσεων, βελτιώνουν την ποιότητα της οπής, βοηθούν στην πλευρική στήριξη του εργαλείου, ενώ παρέχουν και την απαραίτητη γωνία ελευθερίας ώστε να μπορεί να περιστρέφεται το εργαλείο. Κατά τη διάρκεια της κοπής η έλικα του εργαλείου τείνει να ξεδιπλώσει, παραμορφώνοντας έτσι ακτινικά το εργαλείο. Σε περίπτωση που η γωνία ελευθερίας των δευτερευουσών κόψεων

δεν είναι ικανοποιητική, θα υπάρξει επαφή της πλάγιας επιφάνειας των αυλακώσεων με τα τοιχώματα της οπής με μεγάλο κίνδυνο να αστοχήσει το εργαλείο και να καταστραφεί το τεμάχιο.

Το πάχος του πυρήνα αποτελεί μια σημαντική παράμετρος του εργαλείου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του πυρήνα τόσο το εργαλείο γίνεται πιο στιβαρό αλλά παράλληλα μειώνεται ο χώρος ροής του αποβλίπτου στις αυλακώσεις και αυξάνεται το μήκος της εγκάρσιας κόψης.

Οι αυλακώσεις του εργαλείου καταλήγουν σε ένα συμπαγές κυλινδρικό κομμάτι που λέγεται στέλεχος. Το στέλεχος χρησιμεύει για τη συγκράτηση του κοπτικού στον κώνο της εργαλειομηχανής. Ανάλογα με τον τύπο του κώνου, το στέλεχος μπορεί να έχει μια εγκάρσια αυλάκωση για πρόσδεση σε κώνο τύπου Weldon. Σε τρυπάνια μεγάλης διαμέτρου και ανάλογα με τον τύπο της εργαλειομηχανής, το στέλεχος μπορεί να έχει ελαφρώς κωνικό σχήμα με μία διαμόρφωση συγκράτησης στο τέλος για απευθείας πρόσδεση στην άτρακτο της εργαλειομηχανής.

Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζει τις βασικές γωνίες του εργαλείου διάτρησης. Η γωνία ελίκωσης είναι η γωνία που σχηματίζει μια ευθεία εφαπτόμενη στην έλικα του εργαλείου με τον άξονά του. Τα εργαλεία με πολύ μικρή ή μηδενική γωνία ελίκωσης αντέχουν μεγαλύτερη αξονική



Σχήμα 2.3 Βασικές γωνίες του εργαλείου διάτρησης

δύναμη αλλά δεν αντέχουν σε μεγάλες στρεπτικές καταπονήσεις. Η ημιγωνία κορυφής είναι η γωνία που σχηματίζει η εφαπτόμενη στον κώνο της κορυφής με τον άξονα του εργαλείου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία, τόσο μικρότερο ύψος θα έχει η κωνική διαμόρφωση στο τέλος της κατεργασμένης οπής, γεγονός το οποίο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις επιθυμητό. Η ύπαρξη όμως της γωνίας κορυφής είναι αναγκαία για τη σταδιακή είσοδο του κοπτικού στο τεμάχιο και το καλύτερο κεντράρισμα της οπής. Η γωνία εγκάρσιας κόψης είναι η γωνία που σχηματίζει η εγκάρσια κόψη με την παράλληλη ευθεία στις δύο κύριες κόψεις. Λόγω της εξώθησης που λαμβάνει χώρα, η γωνία αυτή είναι πολύ σημαντική για τη ροή του υλικού προς τις κύριες κόψεις.

Η τομή κάθετα στην κύρια ή στην εγκάρσια κόψη σχηματίζει μια σφήνα κοπής. Η σφήνα έχει περίπου σταθερή γεωμετρία κατά μήκος της εγκάρσιας κόψης αλλά έχει μεταβαλλόμενη γεωμετρία κατά μήκος της κύριας.

Τα εργαλεία διάτρησης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη γεωμετρία ή ορισμένες από τις ιδιότητές τους. Η πρώτη κατηγοριοποίηση αφορά την ικανότητα διέλευσης ψυκτικού υγρού μέσα από το σώμα των αυλακώσεων, διαχωρίζοντας τις εξής δύο κατηγορίες:

- **Τρυπάνια με ικανότητα ψύξης (coolant through):** Οι δίοδοι εξόδου του ψυκτικού υγρού διέρχονται μέσα από το σώμα του εργαλείου και συνήθως ενώνονται στην περιοχή του στελέχους καταλήγοντας σε μία οπή εισαγωγής στο πίσω μέρος του στελέχους. Είναι εργαλεία τελευταίας τεχνολογίας από καρβίδια και παράγονται με πυροσσωματώση. Εκτός από την ψύξη της περιοχής κοπής, η πίεση της ροής του ψυκτικού υγρού διευκολύνει και την απομάκρυνση των αποβλίπτων.
- **Απλά τρυπάνια (non-coolant through):** Πρόκειται για κλασικά εργαλεία διάτρησης, όπου η ψύξη γίνεται μέσω των παρειών των αυλακώσεων.

Η δεύτερη παραλλαγή αφορά τη γεωμετρία της κορυφής. Η κορυφή αποτελεί το σπουδαιότερο τμήμα του εργαλείου αφού εκεί λαμβάνει χώρα η κοπή. Η κάθε κατασκευάστρια εταιρεία κοπτικών προσφέρει το δικό της σχεδιασμό τρυπανιών, ο οποίος όμως εμπίπτει σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες ή σε συνδυασμό αυτών :

- **Κωνικής κορυφής (conical point):** Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα απλά ελικοειδή τρυπάνια με εγκάρσια κόψη.
- **Επίπεδης κορυφής (planar point):** Η περίπτωση αυτή αφορά εργαλεία στα οποία η επιφάνεια ελευθερίας έχει τροχιστεί σε δύο επίπεδα παράλληλα με τις κύριες κόψεις, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το μήκος της εγκάρσιας κόψης.
- **Διαιρητής κορυφής (split point):** Σε αυτόν τον τύπο κορυφής η εγκάρσια κόψη αφαιρείται και διαιρείται σε δύο κύριες κόψεις με δύο επιμέρους τμήματα στην καθεμία.
- **Ακτινικής διαιρητής κορυφής (radial split point):** Έχουν ίδια γεωμετρία με τα εργαλεία κωνικής κορυφής με τη διαφορά πως η εγκάρσια κόψη αφαιρείται με κατάλληλο ακτινικό τρόχισμα.
- **Διορθωμένης κύριας κόψης (corrected cutting edge point):** Η γεωμετρία τους είναι ίδια με αυτήν των εργαλείων κωνικής κορυφής με τη διαφορά πως οι κύριες κόψεις τροχίζονται επαπτομενικά ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη γωνία αποβλίπτου.

2.2 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία της διάτρησης

Οι κατευθύνσεις που έχουν ακολουθηθεί από τους ερευνητές για τη μελέτη των κατεργασιών κοπής συμπεριλαμβανομένου της διάτρησης χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες :

- Η μηχανιστική προσέγγιση είναι από τις πιο παλιές μεθόδους που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση των κατεργασιών κοπής. Περιλαμβάνει πειραματική μελέτη της κατεργασίας και εξαγωγή εμπειρικών τύπων οι οποίοι δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου εντοπίζονται στο υψηλό κόστος των πειραμάτων και στην αδυναμία γενίκευσης των αποτελεσμάτων.
- Οι μαθηματικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την περιγραφή της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου, τη μοντελοποίηση της κινηματικής αλλά και την περιγραφή βασικών μεγεθών που αφορούν την κατεργασία της διάτρησης με μαθηματικές συναρτήσεις.
- Οι γεωμετρικές μέθοδοι προσομοίωσης έχουν χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια και βασίζονται στη δυνατότητα προγραμματισμού των σύγχρονων συστημάτων σχεδίασης CAD. Προσφέρουν τρισδιάστατη προσομοίωση των κατεργασιών και είναι υπολογιστικά συμφέρουσες. Ο μηχανισμός στον οποίο βασίζονται είναι οι λογικές πράξεις μεταξύ τρισδιάστατων στερεών γεωμετριών, ενώ σε συνδυασμό με μαθηματικές μεθόδους και μηχανιστικές προσεγγίσεις δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Η αριθμητική προσομοίωση των κατεργασιών κοπής κερδίζει συνεχώς έδαφος τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης της διαθέσιμης επεξεργαστικής ισχύος. Κυρίαρχη μέθοδος στην κατηγορία αυτή είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ενώ τα τελευταία χρόνια κερδίζουν έδαφος και οι μη πλεγματικές μέθοδοι σωματιδίων όπως η μέθοδος υδροδυναμικής ρεόντων σωματιδίων και η μέθοδος μοριακής δυναμικής η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση κοπών σε μικροκλίμακα. Οι μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης αποτελούν γενικευμένες μεθόδους με εφαρμογή σε όλες τις κατεργασίες κοπής, για οποιοδήποτε συνδυασμό κοπτικού-τεμαχίου και συνθηκών κοπής με σχετικά καλή ακρίβεια.
- Η χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και στατιστικών μεθόδων αποτελούν μακροσκοπικές μεθόδους οι οποίες δε λαμβάνουν υπόψη τους τη φύση της κατεργασίας και δεν προτείνονται για γενικευμένη χρήση. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν μεγάλο όγκο

δεδομένων για να καταλήξουν σε ασφαλή συμπεράσματα το οποίο αποτελεί και το κυριότερο μειονέκτημά τους.

2.2.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του εργαλείου διάτρησης

Η πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης των ελικοειδών τρυπανιών έγινε το 1957 από τον Galloway [1]. Για την μαθηματική περιγραφή της διατομής του εργαλείου πρότεινε την εξίσωση (2.3) η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα από τους περισσότερους ερευνητές.

$$u = \arcsin\left(\frac{W/2}{r}\right) + \frac{\sqrt{r^2 - (W/2)^2} \tan(h)}{D/2 \tan(p)} \quad (2.3)$$

όπου

W : πάχος του πυρήνα του εργαλείου [mm]

D : διάμετρος του εργαλείου [mm]

h : γωνία ελίκωσης [deg]

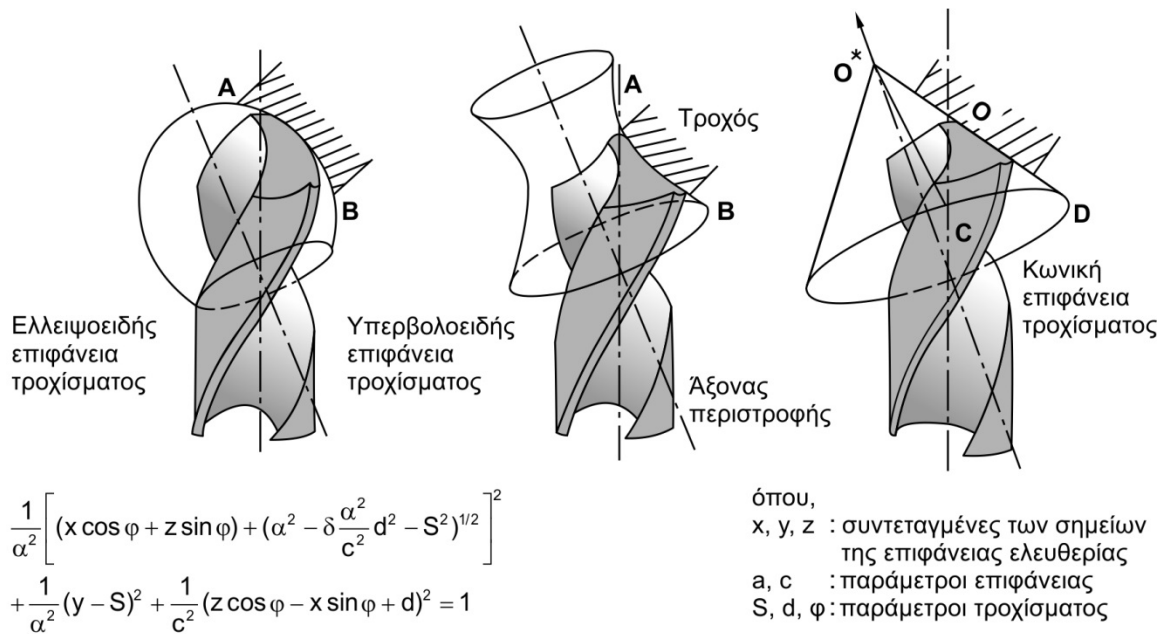
p : ημιγωνία της κορυφής του εργαλείου [deg]

r : πολική συντεταγμένη της διατομής του εργαλείου, η οποία μεταβάλλεται από $w/2$ έως $D/2$ [mm]

u : πολική συντεταγμένη της διατομής του εργαλείου [deg]

Ο Fujii και άλλοι [2] ανέλυσαν τη γεωμετρία του εργαλείου αναφορικά με την αυλάκωση και τις παρειές λαμβάνοντας τομές κάθετες στον άξονα του εργαλείου. Το μοντέλο αυτό εν συνεχεία γενικεύτηκε ώστε ο υπολογισμός να γίνεται σε επίπεδα τομής με οποιαδήποτε γωνία ως προς τον άξονα του εργαλείου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα υπολογισμού των γωνιών ελευθερίας και αποβλίτου. Στο δεύτερο μέρος της μελέτης τους [3] ανέπτυξαν ένα πρόγραμμα σχεδίασης για τον προσδιορισμό της διατομής η οποία συγκρίθηκε με μια αντίστοιχη μετρημένη, ενώ εξετάστηκε και η επιρροή της γωνίας ελίκωσης και του πάχους του πυρήνα. Σε μια άλλη εργασία τους [4] έγινε διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της απόστασης τροχίσματος και της γωνίας της εγκάρσιας κόψης. Η μελέτη έδειξε πως η αντοχή του εργαλείου αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία αυτή αλλά παράλληλα δυσχεραίνεται η ροή του αποβλίτου. Στο Σχήμα 2.4, παρουσιάζεται η μελέτη των Wu και Tsai [5, 6], οι οποίοι περιέγραψαν με αναλυτικές εξισώσεις τη γεωμετρία υπερβολοειδών και ελλειψοειδών τρυπανιών. Επιπλέον, με τα κατάλληλα ορίσματα, οι σχέσεις αυτές καλύπτουν και την απλή περίπτωση των κωνικών εργαλείων διάτρησης. Οι Wu και Tsai ανέλυσαν επίσης με τη βοήθεια H/Y την επίδραση των παραμέτρων τροχίσματος στην τελική γεωμετρία.

Οι Armarego και Rotenberg [7-9] βασίστηκαν στις εργασίες των Galloway και Fujii για να μελετήσουν τις παραμέτρους τροχίσματος ώστε να κατασκευαστεί το επιθυμητό εργαλείο. Διερεύνησαν επίσης πιθανά κριτήρια βελτιστοποίησης της γεωμετρίας καταλήγοντας στην πρόταση πως η ημιγωνία του κώνου τροχίσματος πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατόν μικρότερη, ώστε να βελτιστοποιείται η επίδραση της εγκάρσιας κόψης. Η πρόταση αυτή διερευνήθηκε πειραματικά και αποδείχτηκε πως οι δυνάμεις κοπής και η ισχύς ελαττώθηκαν ενώ παράλληλα βελτιώθηκε και η θέση των οπών στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Σε επόμενες μελέτες τους [10, 11] διερευνήθηκαν οι δυνατές παράμετροι τροχίσματος και προτείνονται αντίστοιχες τιμές. Επίσης ο Armarego και άλλοι [12] πρότειναν ένα νέο σχεδιασμό split point εργαλείου το οποίο αφαιρεί την επίδραση της εγκάρσιας κόψης και μειώνει την απαιτούμενη δύναμη κοπής. Ο Fugelso [13, 14] πρότεινε μια νέα μεθοδολογία τροχίσματος η οποία δίνει τη δυνατότητα κατασκευής εργαλείων με μεγάλη γωνία ελευθερίας και επίσης μια νέου τύπου εργαλειομηχανή με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 2.4 Μαθηματική μοντελοποίηση της γεωμετρίας κορυφής κατά Tsai και Wu

Ο Vangsness και άλλοι [15] μελέτησαν μια κλειστού τύπου επίλυση των εξισώσεων κινηματικής του τροχίσματος τρυπανιών βασισμένοι στη σύμβαση Denavit-Hartenburg, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και ταχύτερη επίλυση. Ο Hsieh και άλλοι [16-19] ασχολήθηκαν με τη μαθηματική μοντελοποίηση εργαλείων διάτρησης τριών κύριων κόψεων και την κατασκευή τους σε ένα κέντρο κατεργασίας έξι αξόνων, αυτοματοποιώντας τη διαδικασία τροχισμού και αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Ο Li και άλλοι [20] ασχολήθηκαν με την κινηματική και τον χώρο εργασίας για την κατασκευή εργαλείων διάτρησης και ανέπτυξαν ένα εικονικό πρωτότυπο για επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Οι Wang και Zhang [21, 22] πρότειναν ένα νέο σχεδιασμό εργαλείου του οποίου οι κύριες κόψεις είναι τροχισμένες έτσι ώστε να έχουν έντονα θετικές γωνίες αποβλίπτου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν μείωση της δύναμης κοπής κατά 46,9% και της ροπής κατά 13,2%, ενώ παράλληλα αυξήθηκε η διάρκεια ζωής τους εργαλείου. Ο Thornley και άλλοι [23] μελέτησαν τη διατομή του τρυπανιού ώστε να προσδιορίσουν τη στιβαρότητα του εργαλείου κατά την κατεργασία διάφορων μετάλλων. Ο Xiong και άλλοι [24] πρότειναν μια νέα μεθοδολογία σχεδιασμού εργαλείων διάτρησης με καμπύλες κύριες κόψεις. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα έδειξαν 28,5% μείωση της ροπής και 24,6% μείωση της δύναμης κοπής σε σχέση με το κλασικό ελικοειδές τρυπάνι.

Με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή ο Audy [25-27] συσχέτισε τη μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας της κορυφής του τρυπανιού με διάφορα μέτρα απόδοσης της κατεργασίας, με σκοπό να συμβάλει στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του εργαλείου. Ο Watson [28] ανέλυσε τη γεωμετρία στοιχειωδών κόψεων του εργαλείου και τις περιέγραψε με μαθηματικές σχέσεις. Οι Chyan και Ehmann [29] μελέτησαν τη μεταβολή ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε ελλειψοειδή και κωνικά εργαλεία διάτρησης. Σε επόμενη μελέτη τους [30] πρότειναν μια μέθοδο κατασκευής μικροεργαλείων διάτρησης με ελλειψοειδή κορυφή. Την κατασκευή μικροεργαλείων διάτρησης μελέτησαν και ο Lin και οι συνεργάτες του [31, 32], προτείνοντας παραμέτρους τροχίσματος ανάλογα με την επιθυμητή γεωμετρία. Οι Salama και ElSawy [33] αλλά και αργότερα ο Williams [34], ασχολήθηκαν με την ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας του εργαλείου. Ειδικότερα μελέτησαν τη μεταβολή της γωνίας ελευθερίας και της γωνίας αποβλίπτου κατά μήκος της κύριας κόψης.

Ο Zhang και άλλοι [35] ανέπτυξαν ένα σύστημα προσδιορισμού των γωνιών αποβλίπτου μετρώντας την κύρια κόψη μέσω εικόνων από το μικροσκόπιο. Σε επόμενη δημοσίευσή τους

μοντελοποίησαν σύγχρονα τρυπάνια με ελικοειδή κορυφή με βάση την κινηματική του τροχίσματος τους. Έτσι, κατέληξαν σε διαφορετικές γεωμετρίες τις οποίες εξέτασαν πειραματικά αναφορικά με την δύναμη κοπής και τη φθορά που αναπτύσσεται. Σημαντική παράμετρος στη μοντελοποίηση αυτού του είδους εργαλείων παίζει το πάχος του τροχού το οποίο επηρεάζει το πάχος του πυρήνα και την δύναμη κοπής. Οι Kang και Armarego [36, 37] ασχολήθηκαν με τη διαδικασία σχηματισμού αυλακώσεων, μελετώντας το τελικό προφίλ της αυλάκωσης και το προφίλ του τροχού ενώ διεξήγαγαν και μελέτες περιπτώσεων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις διάτρησης παρατηρείται φθορά εκτός από την παρειά του εργαλείου και στην επιφάνεια ελευθερίας. Ο Billau και McGoldrick [38] εντόπισαν το πρόβλημα στην ανεπαρκή γωνία ελευθερίας που παρατηρείται σε πολλά κοινά ελικοειδή τρυπάνια και προχώρησαν στη μαθηματική μοντελοποίηση της γεωμετρίας αυτής της περιοχής.

Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονων split-point εργαλείων διάτρησης υψηλής απόδοσης απασχόλησε τους Abele και Fajara [39]. Αφού όρισαν τη γεωμετρία του εργαλείου παραμετρικά, υλοποίησαν έναν πολυκριτήριο εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Στην αντικειμενική συνάρτηση έλαβαν υπόψη τους τις κύριες τάσεις στη διατομή, τις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται, τη δυνατότητα απομάκρυνσης αποβλίπτου, την αντίσταση ροής του ψυκτικού υγρού και τη δυνατότητα τροχίσματος των αυλακώσεων. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας ήταν η δημιουργία μιας βελτιστοποιημένης στερεής γεωμετρίας. Οι Spur και Masuha [40] πειραματίστηκαν με διάφορες διατομές εργαλείων και μελέτησαν την επίδρασή τους στις δυνάμεις κοπής, τη ροπή αλλά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του τρυπανιού. Ο Vijayaraghavan [41] χρησιμοποίησε τη δυνατότητα προγραμματισμού του Solidworks™ και ανέπτυξε ένα λογισμικό αυτόματης σχεδίασης κοινών τρυπανιών βασισμένος στη μεθοδολογία του Galloway. Για τον υπολογισμό της γεωμετρίας του εργαλείου, ο Sambhan και οι συνεργάτες του [42] χρησιμοποίησαν επιφάνειες NURBS μέσα από το υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB™. Η μοντελοποίηση σε ένα τέτοιο περιβάλλον δίνει στους συγγραφείς το πλεονέκτημα της εύκολης χρήσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης για περαιτέρω εξέλιξη της γεωμετρίας.

2.2.2 Προσομοίωση της διάτρησης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων - ΜΠΣ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ευρέως διαδεδομένη στην προσομοίωση των μηχανουργικών κατεργασιών. Πρόκειται για μια παλιά μέθοδο η οποία όμως εφαρμόστηκε στην επίλυση προβλημάτων προσομοίωσης κατεργασιών κυρίως την τελευταία εικοσαετία λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της υπολογιστικής ισχύος. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι των υπολοίπων είναι πως μπορεί να λάβει υπόψη της φαινόμενα επαφής με τριβή, μη-γραμμικά υλικά, θερμοκρασία και δυναμικές φορτίσεις τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την κοπή.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους όλα τα παραπάνω φαινόμενα. Τα λογισμικά αυτά μπορούν να χωριστούν σε λογισμικά γενικής χρήσης και σε εξειδικευμένα λογισμικά. Στην κατηγορία των εξειδικευμένων λογισμικών ανήκουν το DEFORM™ της SFTC και το AdvantEdge™ της Third Wave Systems. Το βασικότερο πλεονέκτημα των παραπάνω λογισμικών είναι η αυτοματοποιημένη διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος. Στην αντίθετη περίπτωση ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει μεγάλο όγκο δεδομένων για όλα τα φαινόμενα που συμμετέχουν στην κοπή καθώς και για τα υλικά και τη γεωμετρία του κοπτικού. Το βασικότερο μειονέκτημα είναι οι περιορισμένες δυνατότητες παρέμβασης του χρήστη στη διαδικασία της προεπεξεργασίας του προβλήματος και κυρίως στη μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τα λογισμικά γενικής χρήσης που έχουν χρησιμοποιηθεί από τους ερευνητές για την προσομοίωση κατεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι κυρίως το ABAQUS/Explicit™ της Simulia Dassault Systems, το ANSYS-LS-DYNA™ της ANSYS σε συνεργασία με την LSTC και το MSC.Marc

της MSC Software. Σε αντίθεση με τα εξειδικευμένα πακέτα, στα γενικής χρήσης λογισμικά η μοντελοποίηση ξεκινά από μηδενικό στάδιο αλλά στα περισσότερα από αυτά υπάρχουν απεριόριστες δυνατότητες παρέμβασης στη μοντελοποίηση του προβλήματος και τη μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων.

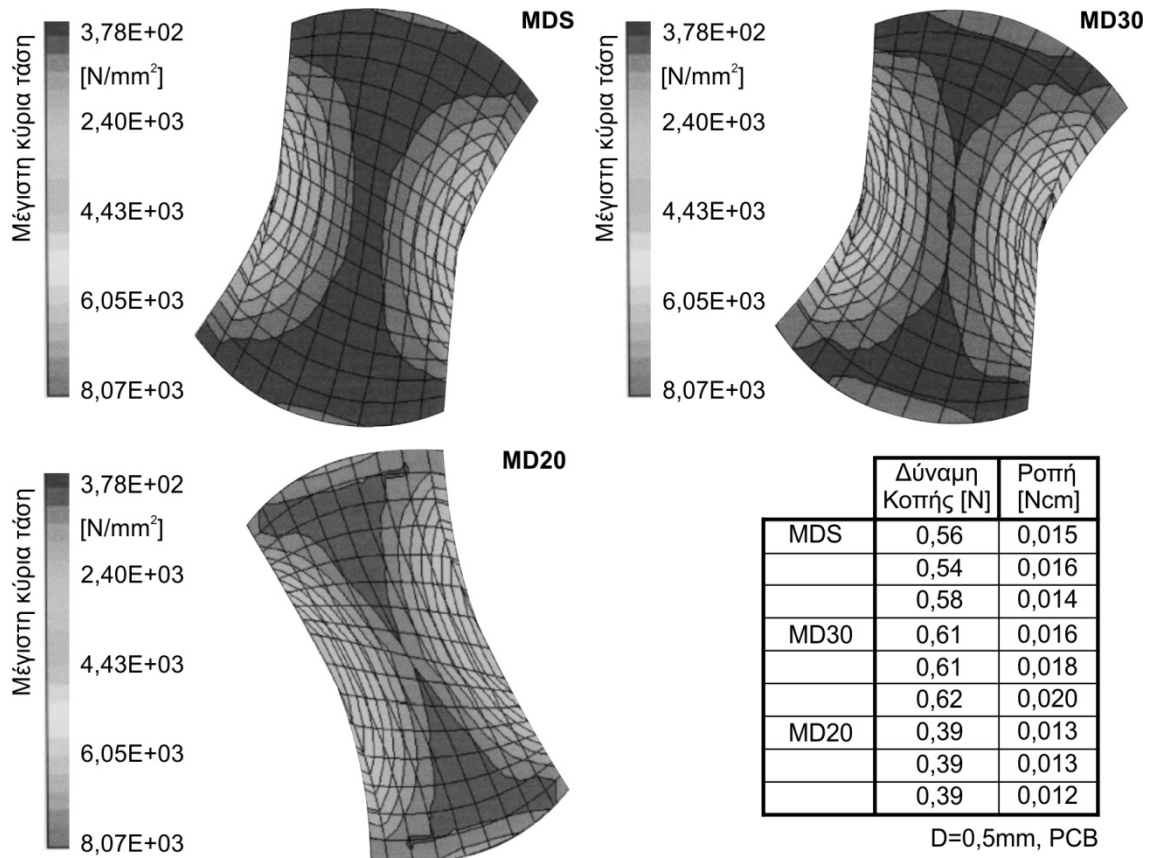
Η συγκριτική μελέτη των Gardner και άλλων [43] σχετικά με τα επικρατέστερα λογισμικά προσομοίωσης μηχανουργικών κατεργασιών, αναλύει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε πακέτου, όπως αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1. Σε επόμενη μελέτη τους οι Gardner και Dornfield [44] χρησιμοποίησαν το λογισμικό DEFORM 3D™ για να προσομοιώσουν τη διάτρηση. Σχεδιάζοντας από την αρχή το δικό τους κοπτικό εργαλείο ανέλυσαν τα βήματα που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας, ενώ κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το DEFORM αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο προσομοίωσης χωρίς να μπορεί όμως ο χρήστης να παρέμβει σε εξειδικευμένες λειτουργίες του λογισμικού.

	DEFORM™ SFTC	ADVANTEDGE™ THIRD WAVE SYSTEMS	ABAQUS™ SIMULIA
Ευκολία προεπεξεργασίας της προσομοίωσης	Ενσωματωμένοι οδηγοί για κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Διαθέσιμη βιβλιοθήκη εργαλείων αλλά και δυνατότητα εισαγωγής.	Γρήγορη προεπεξεργασία. Παρέχονται βιβλιοθήκες εργαλείων.	Απουσία βιβλιοθηκών εργαλείων. Χειροκίνητος έλεγχος πλέγματος και συνθηκών.
Μοντέλα υλικών	Εκτενής βιβλιοθήκη υλικών. Εύκολο περιβάλλον διαχείρισης ιδιοτήτων.	Εκτενής βιβλιοθήκη υλικών. Υποστήριξη κραμάτων που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική.	Απουσία βιβλιοθήκης μοντέλων υλικών. Λεπτομερής περιγραφή υλικού.
Προσαρμοστική πλεγματοποίηση	Χρήση προσαρμοστικής πλεγματοποίησης. Μερικός έλεγχος των παραμέτρων.	Χρήση προσαρμοστικής πλεγματοποίησης. Αδυναμία ελέγχου της διαδικασίας.	Μερική υποστήριξη. Χωρίς ιδιαίτερο έλεγχο της διαδικασίας.
Συνολικός έλεγχος της προσομοίωσης	Μερικός έλεγχος της διαδικασίας. Οι παράμετροι των επιλυτών δεν μπορούν να μεταβληθούν.	Ελάχιστες αλλαγές επιτρέπονται στις παραμέτρους των επιλυτών.	Πολύ υψηλός έλεγχος. Ο χρήστης μπορεί να παρέμβει στους επιλύτες.

Πίνακας 2.1 Σύγκριση λογισμικών προσομοίωσης κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία κατά Gardner

Οι Selvam και Sujatha [45] διακριτοποίησαν με συντεταγμένες τη γεωμετρία του εργαλείου και τη χώρισαν σε 32 πεπερασμένα στοιχεία με 273 κόμβους στο σύνολο. Στη συνέχεια διεξήγαγαν προσομοιώσεις με διαφορετικές γεωμετρίες (γωνία ελίκωσης, γωνία εγκάρσιας κόψης, γωνία κορυφής και πάχος οδηγητικής λωρίδας) και συνθήκες φόρτισης ώστε να προτείνουν τη βέλτιστη γεωμετρία. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης που εξέτασαν είναι η αξονική και η ακτινική μετατόπιση της κορυφής του εργαλείου. Ακολουθώντας την ίδια λογική για την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου, οι Hinds και Treanor [46] ανέλυσαν τις τάσεις που αναπτύσσονται σε μικροεργαλεία διάτρησης. Οι συνθήκες φόρτισης προσδιορίστηκαν πειραματικά, ενώ η επίλυση έγινε με τη βοήθεια του ABAQUS™. Η δύναμη κοπής

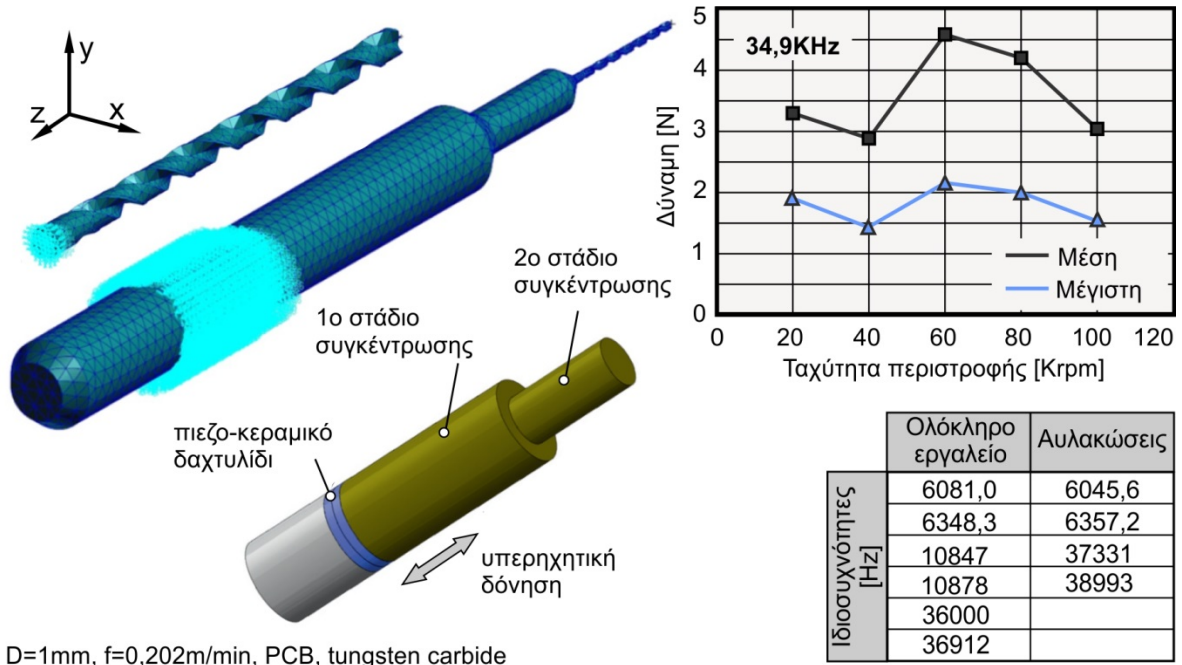
κατανεμήθηκε μόνο στους κόμβους της εγκάρσιας κόψης η οποία χωρίστηκε σε 8 πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι η δύναμη κοπής διαιρέθηκε με τους 16 κόμβους των στοιχείων και κατανεμήθηκε στο μοντέλο με λόγο 1-2-2-2-2-2-2-1, ενώ η ροπή κατανεμήθηκε στις δύο κύριες κόψεις με την ίδια λογική. Στο [Σχήμα 2.5](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τάσεων για διάφορες διατομές του εργαλείου.



Σχήμα 2.5 Ανάλυση τάσεων μικροεργαλείου διάτρησης κατά Hinds και Treanor

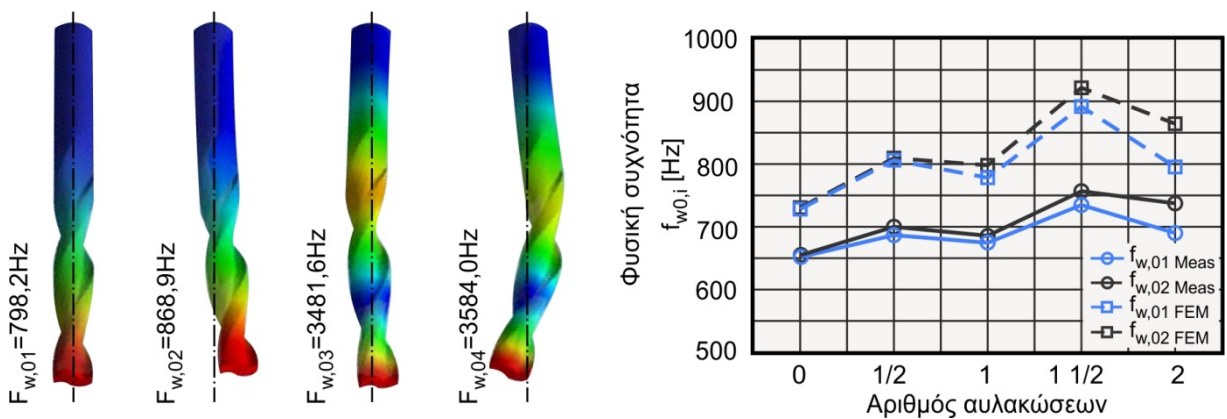
Οι Zhang και Babitsky [47] εξέτασαν τις ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες ενός μικροεργαλείου για ένα απλουστευμένο μοντέλο μόνο των αυλακώσεων του εργαλείου, αλλά και για ολόκληρο το εργαλείο. Στο σημείο αυτό συμπέραναν πως το στέλεχος έχει σημαντική συμμετοχή στη δυναμική του εργαλείου στις υψηλές συχνότητες όπως παρουσιάζεται στο [Σχήμα 2.6](#). Επιπλέον εκπόνησαν μια συγκριτική μελέτη των δυνάμεων της διάτρησης με δόνηση και χωρίς, σε υλικό PCB. Η μελέτη τους έδειξε σημαντική μείωση των δυνάμεων στην περίπτωση της διάτρησης με δόνηση.

Ο Chen στη μελέτη του [48] εφάρμοσε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να καταλήξει σε μια νέα γεωμετρία εργαλείου. Η διακριτοποίηση του εργαλείου βασίστηκε σε χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι συντεταγμένες ελήφθησαν από συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Έγινε ανάλυση των διατμητικών τάσεων και μετατοπίσεων για διάφορες διατομές και συνθήκες φόρτισης και εξετάστηκε η επίδραση του πάχους του πυρήνα και του σχήματος της δευτερευουσών κόψων στην περιστροφική στιβαρότητα του εργαλείου. Τέλος κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι εργαλείων τα οποία δοκιμάστηκαν πειραματικά σε διάτρηση θερμικά επεξεργασμένου χάλυβα JIS S50C και έδειξαν μειωμένη δύναμη κοπής, μειωμένη ροπή αλλά και αυξημένη διάρκεια ζωής. Ο Chen και άλλοι [49] χρησιμοποίησαν την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να προσδιορίσουν τις μετατοπίσεις και τις τάσεις που αναπτύσσονται στη διάτρηση χάλυβα JIS S45C, οι οποίες σε συνδυασμό με υπολογισμένες δυνάμεις κοπής χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας split-point τρυπανιών.



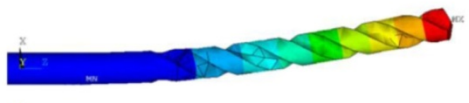
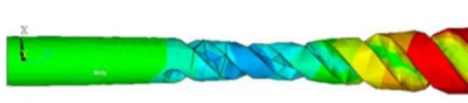
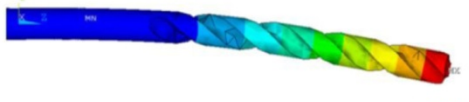
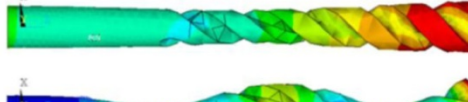
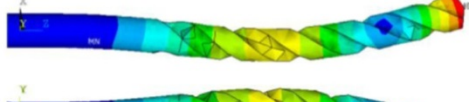
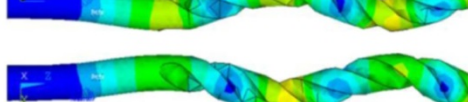


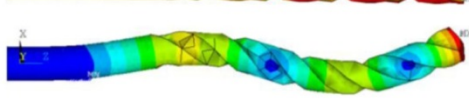
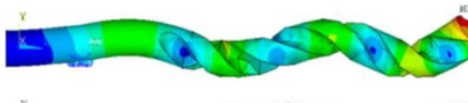
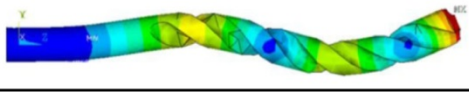
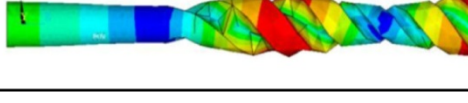
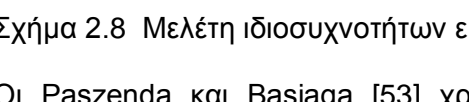
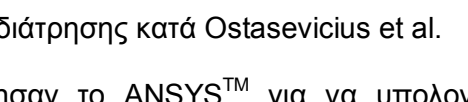
Σχήμα 2.6 Μελέτη ιδιοσυχνοτήτων και δυνάμεων σε μικρο εργαλείο κατά Zhang et al.

Ο Gong και άλλοι [50] μελέτησαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά μικροεργαλείων διάτρησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα εργαλεία μοντελοποιήθηκαν σαν ελικοειδείς δοκοί και εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας, των οριακών συνθηκών, της ταχύτητας περιστροφής και του εμβαδού της διατομής. Στη μελέτη [51], ο Denkena και οι συνεργάτες του μελέτησαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εργαλείων διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία και επαληθεύσαν πειραματικά τα αποτελέσματά τους. Οι ιδιοσυχνότητες που μετρήθηκαν ήταν τέσσερις, και λάμβαναν χώρα στα 798.2, 868.9, 3481.6, 3584 Hz αντίστοιχα (Σχήμα 2.7).



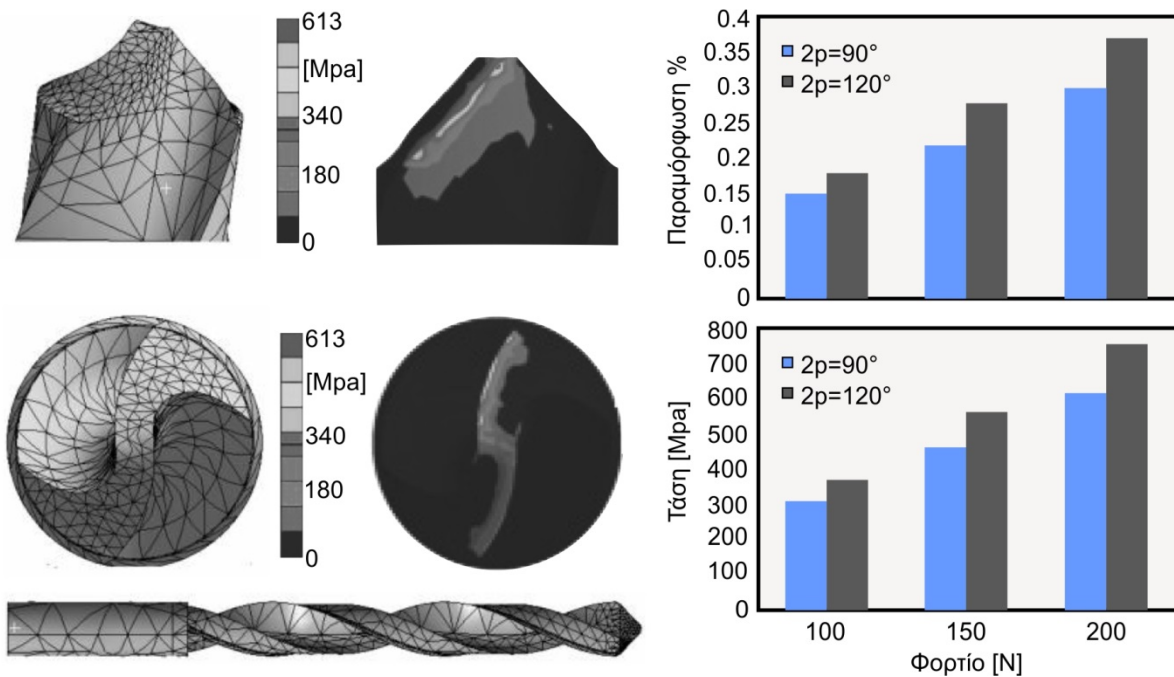
Σχήμα 2.7 Μελέτη ιδιοσυχνοτήτων εργαλείου διάτρησης κατά Denkena et al.

Ο Ostasevicius και οι συνεργάτες του [52] μελέτησαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός δονούμενου εργαλείου διάτρησης διαμέτρου 10mm με πεπερασμένα στοιχεία, ώστε να διερευνηθεί η πλέον αποτελεσματική μέθοδος διέγερσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας επαληθεύτηκαν με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, ενώ εξετάστηκε και η επιρροή των συνθηκών διέγερσης στην τραχύτητα της επιφάνειας, στις δυνάμεις κοπής και τη ροπή. Στην ανάλυση του εργαλείου εξετάστηκαν 14 ιδιομορφές οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.

Ιδιομορφή	f_n [KHz]	Ιδιομορφή	f_n [KHz]
	0,494		8,870
	0,522		11,100
	2,561		11,688
	2,610		12,229
	3,025		18,151
	6,419		18,894
	6,461		19,843

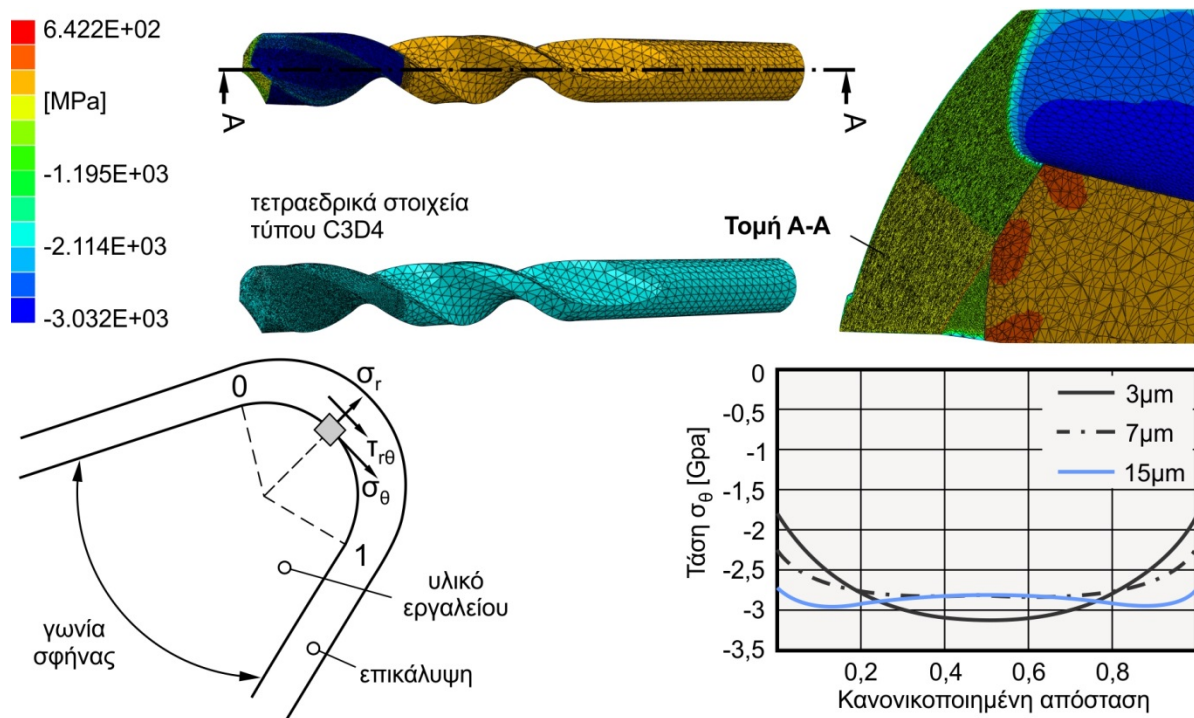
Σχήμα 2.8 Μελέτη ιδιοσυχνοτήτων εργαλείου διάτρησης κατά Ostasevicius et al.

Οι Paszenda και Basiaga [53] χρησιμοποίησαν το ANSYS™ για να υπολογίσουν την κατανομή των τάσεων σε τρυπάνια διαμέτρου 6mm από χάλυβα X39Cr13 τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη χειρουργική οστών. Στόχος τους ήταν ο προσδιορισμός των περιοχών που αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις ώστε να αποφεύγεται η θραύση τους. Τα αποτελέσματά τους περιλαμβάνουν το μέγεθος και την κατανομή των τάσεων και το μέγεθος των παραμορφώσεων (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 Ανάλυση τάσεων εργαλείου διάτρησης κατά Paszenda και Basiaga

Ο Μiao και άλλοι [54] μελέτησαν τις παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται στο εργαλείο από τη διαφορά θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία εναπόθεσης επικάλυψης διαμαντιού. Το εργαλείο μελετήθηκε ως προς τα μακροσκοπικά γεωμετρικά του χαρακτηριστικά αλλά και σε μικροκλίμακα αναφορικά με την καμπυλότητα της κοπτικής ακμής η οποία κυμαίνεται από 3 έως 15 μm . Τα αποτελέσματά τους αφορούν κυρίως τις αναπτυσσόμενες τάσεις στη διεπαφή επικάλυψης-υποστρώματος (Σχήμα 2.10).



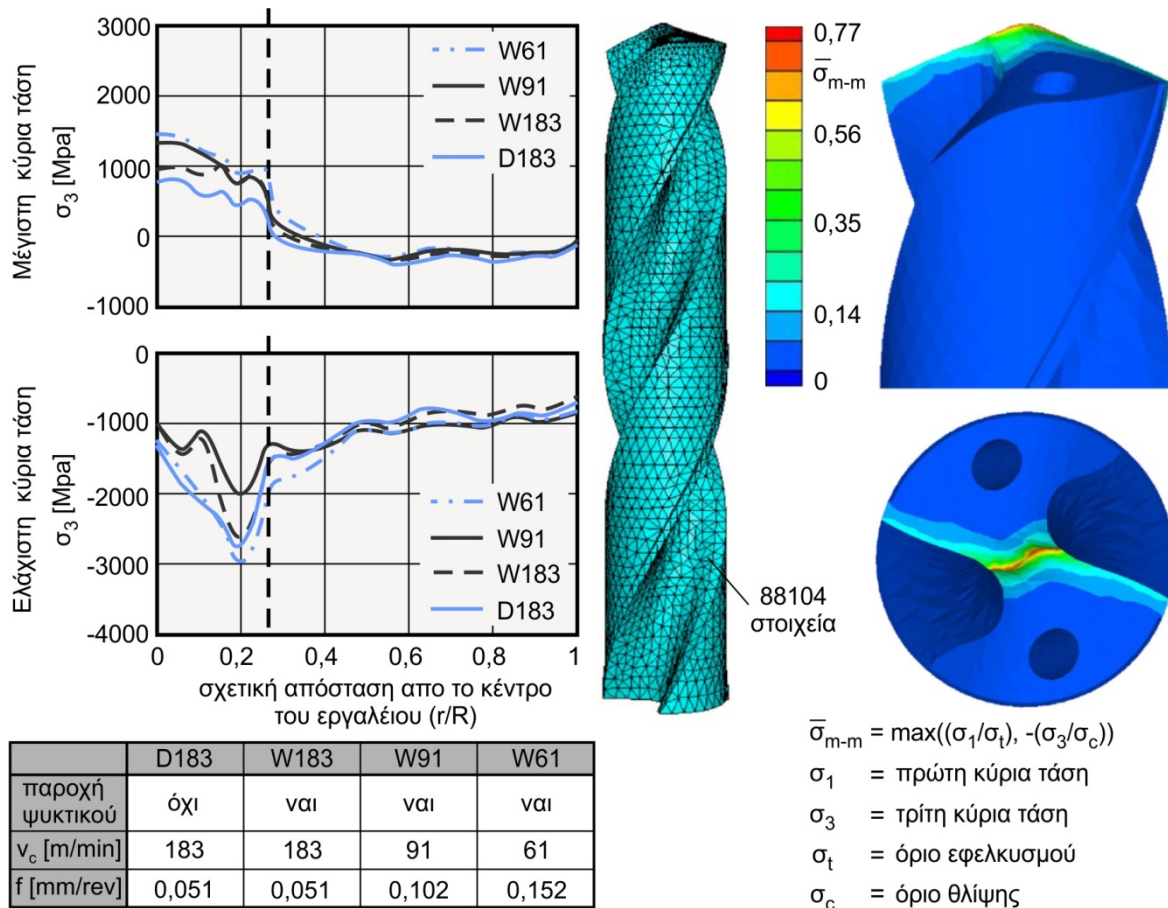
Σχήμα 2.10 Ανάλυση τάσεων στην επικάλυψη του εργαλείου διάτρησης κατά Miao et al.

Ο Li και ο Shih στις μελέτες [55, 56] αφού προσομοίωσαν την κατεργασία της διάτρησης, χρησιμοποίησαν τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που προέκυψαν, για να προσδιορίσουν τις μετατοπίσεις τις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις ενός τρισδιάστατου αντίγραφου εργαλείου διάτρησης με σπειροειδή κορυφή (spiral point drill). Εκτός από τη μελέτη των τάσεων, οι ερευνητές προχώρησαν και στον υπολογισμό διάφορων κριτηρίων αστοχίας (Σχήμα 2.11).

Ο Wern [57] ανέπτυξε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων των οπών μετά από διάτρηση. Ο Guo και άλλοι [58] εφάρμοσαν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να αναλύσουν τα χαρακτηριστικά συγκέντρωσης τάσεων σε μικρο-οπές και στη συνέχεια πρότειναν βέλτιστες συνθήκες κοπής για μικροδιάτρηση Ti6Al4V. Ο Sicot και οι συνεργάτες του [59, 60] μελέτησαν τις παραμένουσες τάσεις σε σύνθετα υλικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της διαδοχικής διάνοιξης οπής. Η μελέτη τους έδειξε πως οι συνθήκες ψύξης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις παραμένουσες τάσεις. Μελετώντας επίσης τη διάτρηση σε σύνθετο υλικό UD-GFRP, ο Singh και άλλοι εξέτασαν την επίδραση της διαφορετικής γωνίας κορυφής των τρυπανιών στην αστοχία του υλικού.

Ο Aurich και άλλοι [61] παρουσίασαν μια ανασκόπηση για την ανάλυση και τον έλεγχο απολήξεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι Guo και Dornfield [62-64] προσομοίωσαν την κατεργασία διάνοιξης οπών σε ανοξείδωτο χάλυβα 304 με τη βοήθεια του ABAQUSTM ενώ εξέτασαν τις δυνάμεις κοπής και το μέγεθος της απόληξης. Ο Min και άλλοι [65] μοντελοποίησαν τη διαδικασία σχηματισμού απόληξης σε κατεργασίες διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία και τη συσχέτισαν με τις πλαστικές παραμορφώσεις που

αναπτύσσονται στην περιοχή εξόδου. Το κοπτικό τους εργαλείο μοντελοποιήθηκε σε περιβάλλον CAD ενώ τα αποτελέσματά τους επαληθεύτηκαν πειραματικά με τη χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας (Σχήμα 2.12). Οι ίδιοι ερευνητές σε άλλη εργασία τους [66] μελέτησαν την επίδραση του σχηματισμού απόληξης στη δύναμη κοπής στη διάτρηση ανοξείδωτου χάλυβα AISI304L.



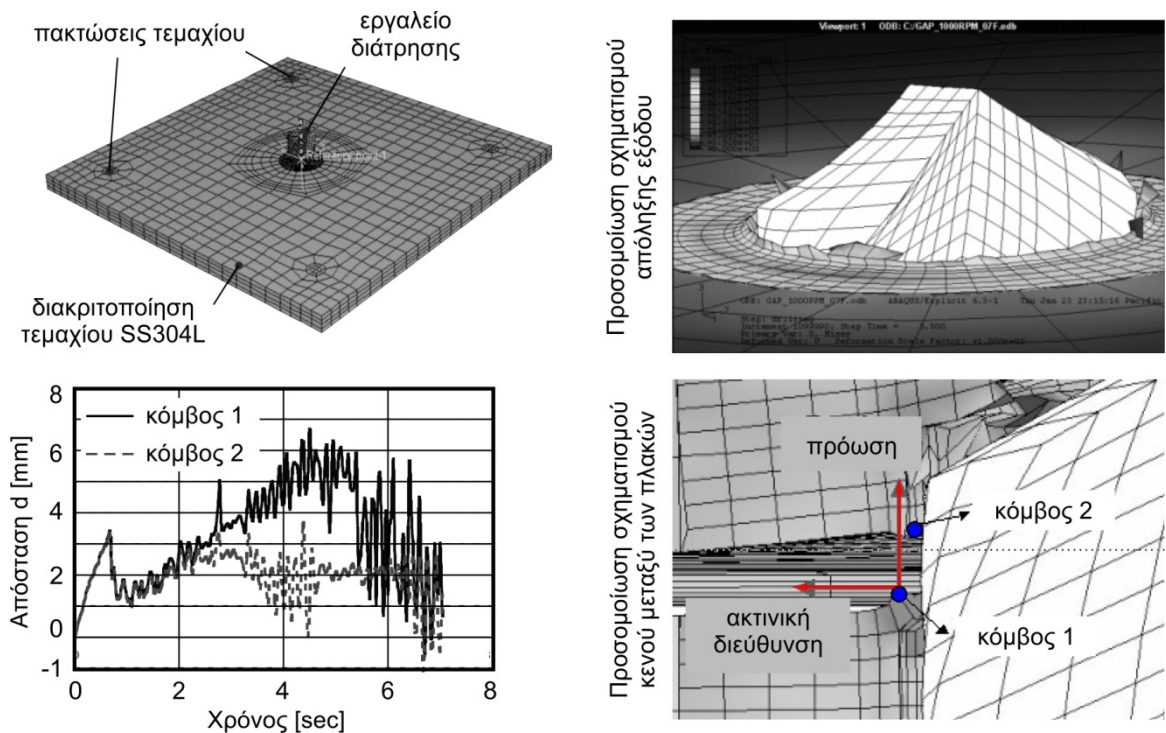
Σχήμα 2.11 Ανάλυση τάσεων σε σπειροειδές εργαλείο διάτρησης κατά Li και Shih

Ο Choi και άλλοι [67] προσομοίωσαν με τη χρήση του ABAQUS™ τη διάτρηση δύο πλακών ανοξείδωτου χάλυβα 304L διαστάσεων 8x8mm και πάχους 1,5mm για να μελετήσουν την ελαστική κάμψη και το κενό μεταξύ των δύο πλακών. Οι πλάκες θεωρήθηκαν πακτωμένες σε τέσσερα σημεία που βρίσκονται κοντά στις γωνίες των τετραγωνικών πλακών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.

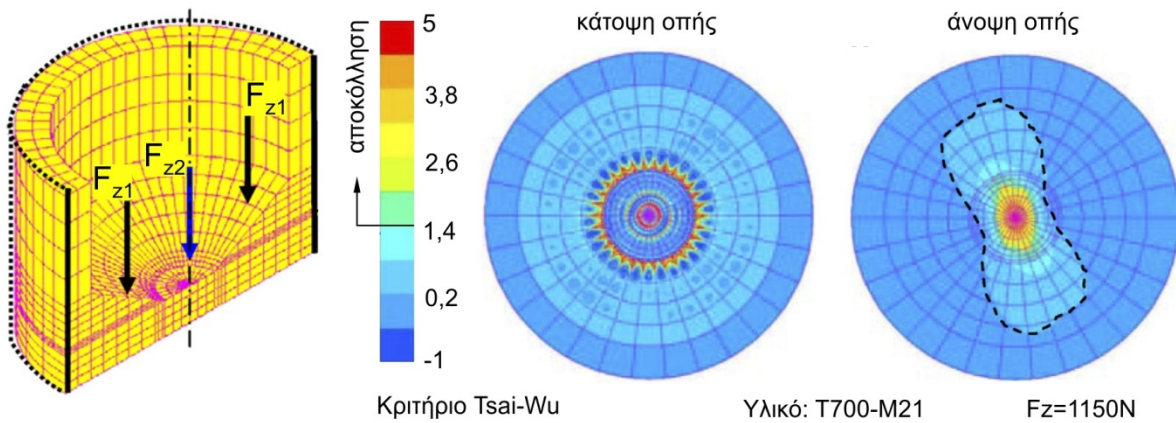
Βασισμένοι στο παραπάνω μοντέλο υπολογισμού της απόληξης των Guo και Dornfield ο Anίλα και οι συνεργάτες του [68] ανέπτυξαν ένα μοντέλο υπολογισμού της διάτρησης σε καμπύλη επιφάνεια, ενώ παράλληλα πρότειναν και στρατηγικές μείωσης της απόληξης. Οι Zitoune και Colombet [69] μελέτησαν την κρίσιμη δύναμη κοπής για τη διαστρωματική αποκόλληση στην έξοδο του κοπτικού κατά τη διάτρηση των σύνθετων υλικών T2H-EH25 και T700-M21. Το μοντέλο τους βασίστηκε στη μηχανική της θραύσης των υλικών και επιλύθηκε με τον κώδικα SAMCEF™. Για τον προσδιορισμό της αποκόλλησης υπολογίστηκε το κριτήριο των Tsai και Wu, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.

	Προτεινόμενος μηχανισμός ανάπτυξης	Προσομοίωση FEM	Κάμερα υψηλής ταχύτητας	Προτεινόμενος μηχανισμός ανάπτυξης	Προσομοίωση FEM	Κάμερα υψηλής ταχύτητας
Μόνιμη κατάσταση						
Έναρξη						
Ανάπτυξη						
Έναρξη θραύσης						
Τελική φάση						

Σχήμα 2.12 Διαδικασία σχηματισμού απόληξης κατά Min et al.



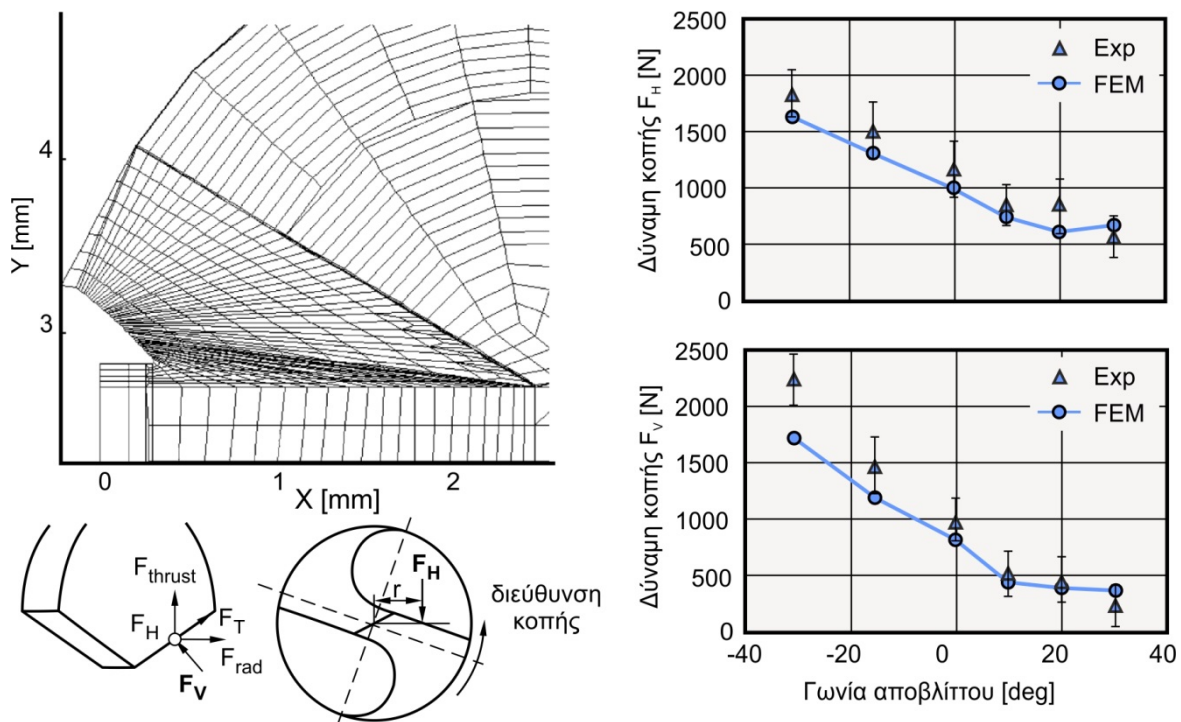
Σχήμα 2.13 Μελέτη απόληξης και κενού σε πολυστρωματικό υλικό κατά Choi et al.



Σχήμα 2.14 Μελέτη αποκόλλησης σε σύνθετα υλικά κατά Zitoune και Colombet.

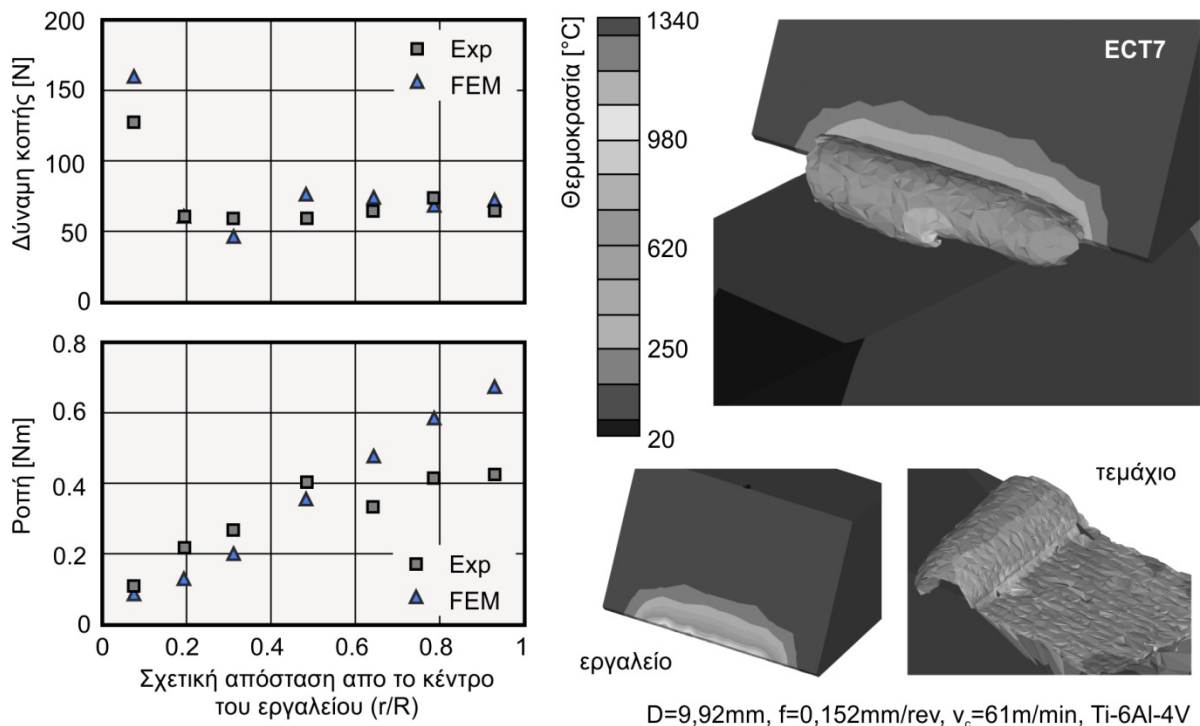
Ο Yunming και άλλοι [70] μελέτησαν τρεις τύπους απόληξης κατά τη διάτρηση 0Cr18Ni9. Η αστοχία του υλικού βασίστηκε στο μοντέλο Cockroft & Latham. Ο Saunders [71] ανέπτυξε ένα μοντέλο βασισμένο στο ANSYS για τον υπολογισμό του ύψους της απόληξης και την ανάπτυξη των τάσεων κατά τη διάτρηση αλουμινίου AL2024T6.

Ο Strenkowski και άλλοι [72] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία βασισμένο στην προσέγγιση κατά Euler. Η κάθε μια από τις κύριες κόψεις χωρίστηκε σε 5 τμήματα τα οποία προσομοιώθηκαν με λοξή κοπή, ενώ η εγκάρσια κόψη προσομοιώθηκε με ορθογωνική κοπή. Η εύρεση της ροπής και των δυνάμεων κοπής έγινε με αναλυτικό τρόπο βασισμένο στην προσέγγιση ελάχιστης ενέργειας του U_{sui} . Το μοντέλο των πεπερασμένων που αναπτύχθηκε υπολόγιζε την τάση, τη γωνία διάτμησης και τη γωνία τριβής, χαρακτηριστικά τα οποία αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου στο μοντέλο U_{sui} για τον προσδιορισμό των δυνάμεων. Ο τελικός προσδιορισμός των δυνάμεων έγινε μετά από κατάλληλο μετασχηματισμό στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου, ενώ τα αποτελέσματά τους επαληθεύτηκαν πειραματικά σε χάλυβα AISI 1020 (Σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15 Μελέτη διάτρησης κατά Strenkowski

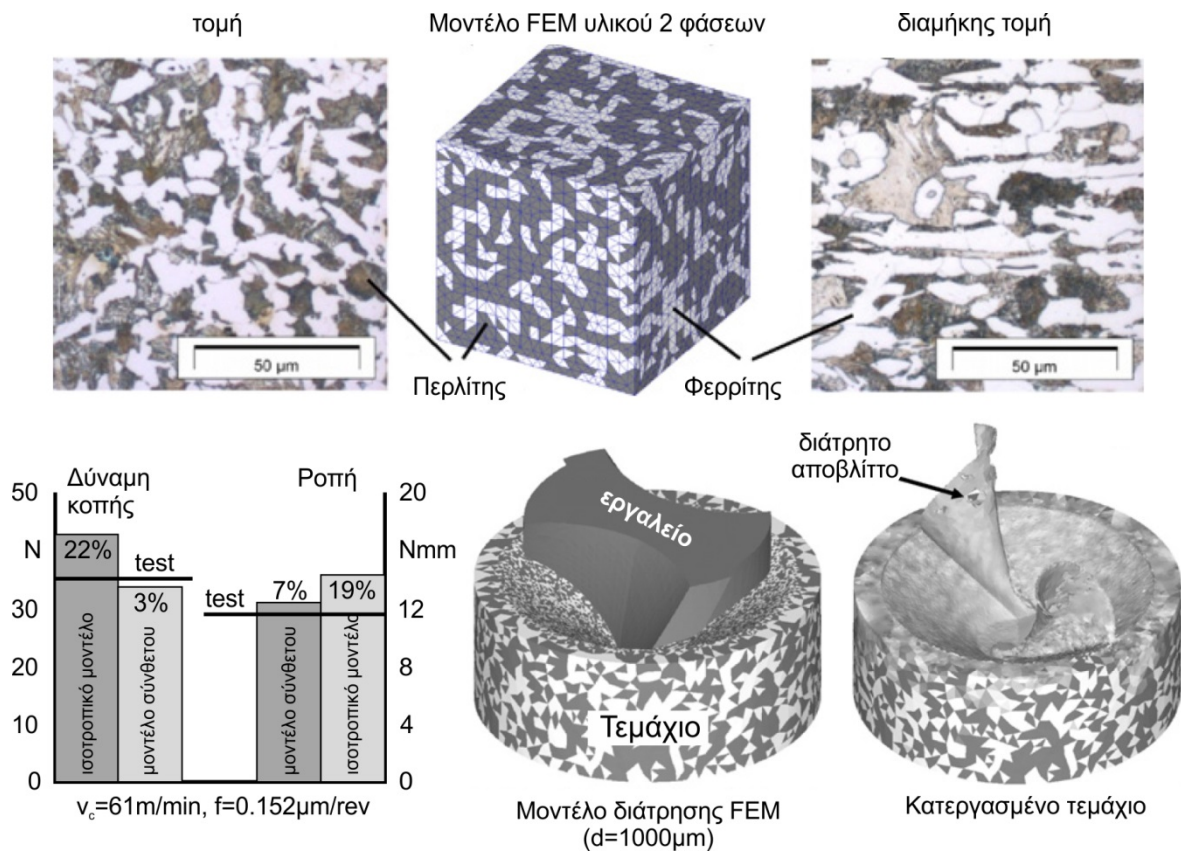
Ο Li και ο Shih [73] χώρισαν την κόψη ενός εργαλείου διάτρησης με σπειροειδή κορυφή σε 7 στοιχειώδεις κόψεις και χρησιμοποίησαν το AdvantEdge™ για να προσομοιώσουν διαδοχικές λοξές κοπές. Στη συνέχεια μελέτησαν τις δυνάμεις, τη ροπή και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εργαλείο κατά την κοπή κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V ενώ τα αποτελέσματά τους επαληθεύτηκαν πειραματικά, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.16](#). Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποίησαν δύο θερμοστοιχεία τα οποία πέρασαν μέσα από τις διόδους ψυκτικού υγρού ενός ακίνητου εργαλείου, ενώ το κατεργαζόμενο κομμάτι δέθηκε στην άτρακτο της εργαλειομηχανής.



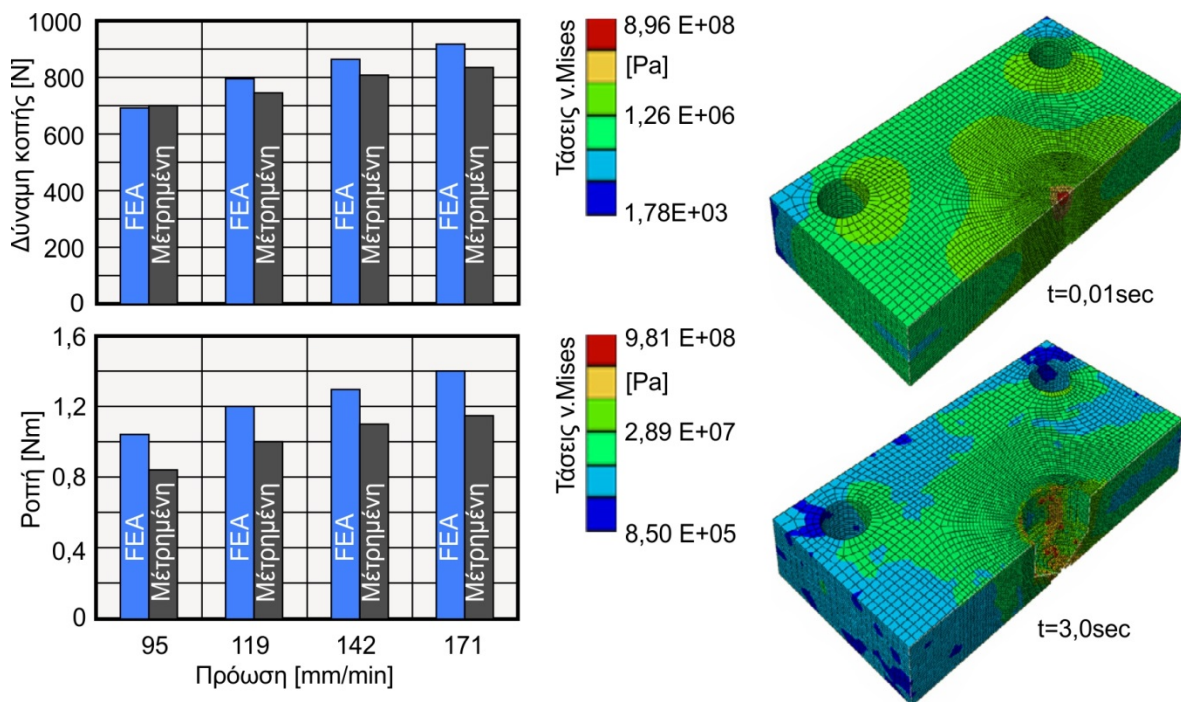
Σχήμα 2.16 Προσομοίωση διάτρησης κατά Li και Shih.

Οι Han και Wu [74] βασίστηκαν στο AdvantEdge™ για να υλοποιήσουν μια τρισδιάστατη θερμομηχανική προσομοίωση με σκοπό να μελετήσουν τη μορφοποίηση του αποβλίττου, τις δυνάμεις κοπής και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη διάτρηση χάλυβα AISI 1045 και κράματος τιτανίου Ti6Al4V. Οι Li και Liang [75] προσομοίωσαν τη διάτρηση του υλικού ZGMn13 με χρήση του πακέτου DEFORM™. Στη μελέτη τους παρατήρησαν ότι αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής, ενώ αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε ελάττωση της ροπής. Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρήθηκε στην κύρια κόψη του εργαλείου. Ο Abouridouane και άλλοι [76] προσομοίωσαν τη διάτρηση του AISI1045 με μικροεργαλεία για να ερευνήσουν την κοπή, την παραμόρφωση, τους τριβολογικούς μηχανισμούς και τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας στη μικροκλίμακα. Η προσομοίωσή τους βασίστηκε στο DEFORM3D™ και έγινε χρήση υλικού δύο φάσεων, η κάθε μια από τις οποίες περιγράφηκε σύμφωνα με το μοντέλο των Johnson-Cook. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν πειραματικά και παρατηρήθηκε ότι η χρήση του πολυφασικού υλικού προσεγγίζει πολύ καλύτερα τις πειραματικές τιμές σε σχέση με ένα ιστροπικό μοντέλο, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.17](#).

Ο Chakladar και άλλοι [77] προσέγγισαν τη διάτρηση σύνθετων υλικών βασισμένοι στο ANSYS AUTODYN™. Τα αποτελέσματά τους προσέγγισαν τα αντίστοιχα πειραματικά, αλλά η αδυναμία χρήσης ελαστοπλαστικού υλικού οδήγησε σε αποκλίσεις. Οι Isbilir και Ghassemieh [78] βασίστηκαν στο λογισμικό ABAQUS™ για να προσομοιώσουν τη διάτρηση κράματος τιτανίου Ti6Al4V. Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό των Johnson-Cook, ενώ τα αποτελέσματά τους επιβεβαιώθηκαν πειραματικά ([Σχήμα 2.18](#)).



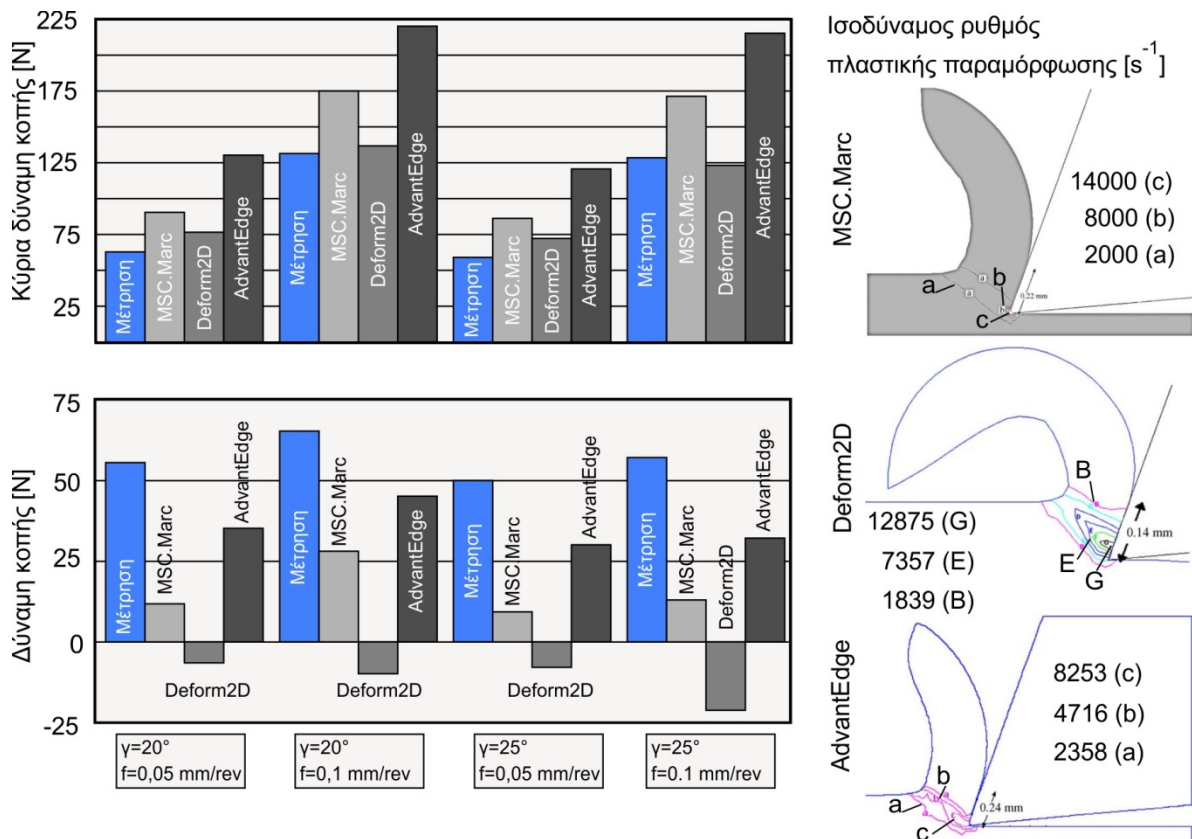
Σχήμα 2.17 Προσομοίωση διάτρησης πολυφασικού υλικού κατά Abouridouane et al.



Σχήμα 2.18 Προσομοίωση διάτρησης κράματος τιτανίου κατά Isbilir και Ghassemieh.

Οι Marusich και άλλοι [79] χρησιμοποίησαν το AdvantEdge™ για να υπολογίσουν την δύναμη κοπής και τη ροπή στη διάτρηση κράματος τιτανίου Ti6Al4V. Το μοντέλο υλικού που

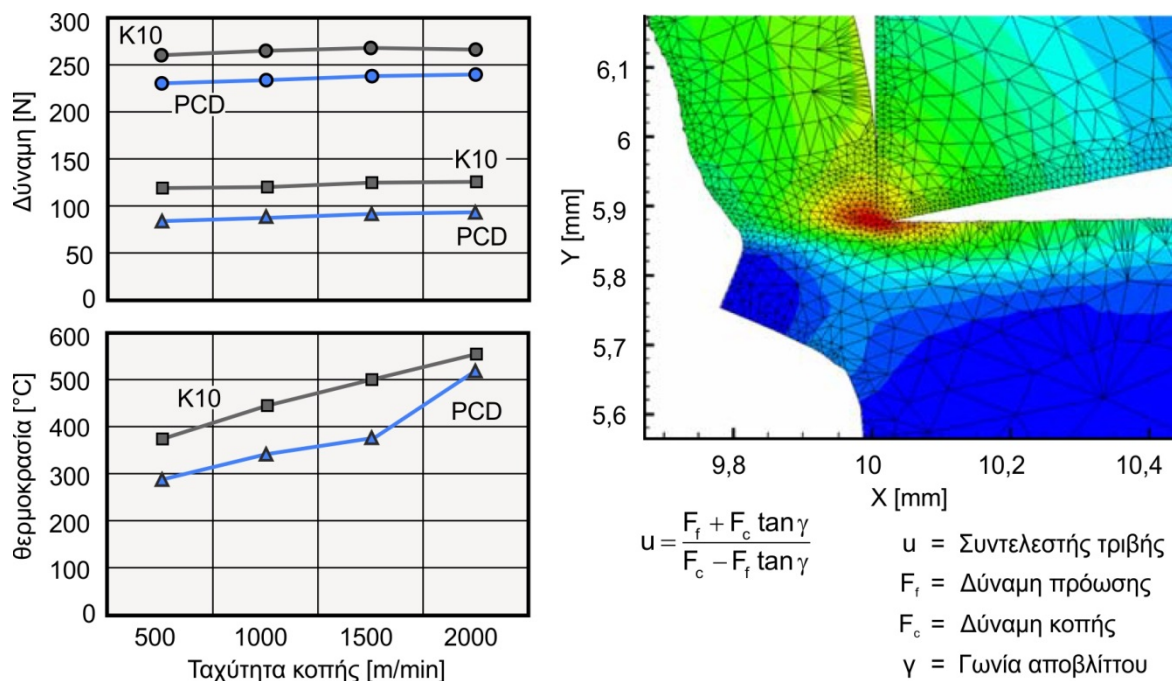
χρησιμοποιήθηκε ήταν των Marusich και Ortiz, ενώ τα αποτελέσματά τους ήρθαν σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά. Ο Bil και οι συνεργάτες του [80] σύγκριναν τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ορθογωνικής κοπής χάλυβα C15 με το DEFORM2D™, το MSC.Marc™ και το AdvantEdge™. Τα τρία λογισμικά είχαν αρκετή απόκλιση στον υπολογισμό της κάθετης δύναμης κοπής, ενώ το DEFORM2D™ δεν μπόρεσε να προβλέψει ούτε τη φορά της δύναμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Οι ερευνητές διαπίστωσαν τον πολύ σημαντικό ρόλο της τριβής στα παραγόμενα αποτελέσματα και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η τριβή Coulomb δίνει καλά αποτελέσματα δυνάμεων αλλά δίνει πολύ υψηλές τάσεις. Η αύξηση αυτή αποδόθηκε στο γεγονός πως ο νόμος Coulomb εισάγει τάσεις τριβής οι οποίες ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού στη διεπαφή κοπτικού-τεμαχίου.



Σχήμα 2.19 Σύγκριση αποτελεσμάτων δυνάμεων εμπορικών πακέτων κατά Bil et al.

Ο Davim και οι συνεργάτες του [81] μελέτησαν την κατεργασία AL7075-O σε υψηλές ταχύτητες κοπής, χρησιμοποιώντας εργαλεία από πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD και επικαλυμμένα εργαλεία καρβιδίου K10. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα εργαλεία PCD αναπτύσσουν μικρότερες δυνάμεις κοπής αλλά μεγαλύτερες θερμοκρασίες, οι οποίες όταν ξεπεράσουν τους 700°C καταστρέφουν το διαμάντι το οποίο μετατρέπεται σε γραφίτη (Σχήμα 2.20).

Ο Raczky και άλλοι [82] ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατά Euler για να προσομοιώσουν τρισδιάστατα την ορθογωνική κοπή χαλκού ETP C11000. Το κοπτικό εργαλείο θεωρήθηκε ακίνητο και μοντελοποιήθηκε κατά Lagrange. Για το ακατέργαστο υλικό χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση Euler με δύο διαφορετικά μοντέλα, το μοντέλο Johnson-Cook καθώς και ένα ελαστοπλαστικό υδροδυναμικό μοντέλο. Οι ερευνητές παρατήρησαν πως το υδροδυναμικό μοντέλο υλικού προσέγγισε καλύτερα το πάχος αποβλίπτου με μόλις 5% σφάλμα καθώς και τη δύναμη κοπής με 13% σφάλμα. Η μέγιστη ισοδύναμη τάση 410 MPa παρατηρήθηκε στην περιοχή της μύτης του κοπτικού εργαλείου. Επιπλέον, μελετήθηκε και η επίδραση του συντελεστή τριβής στις αναπτυσσόμενες τάσεις (Σχήμα 2.21).



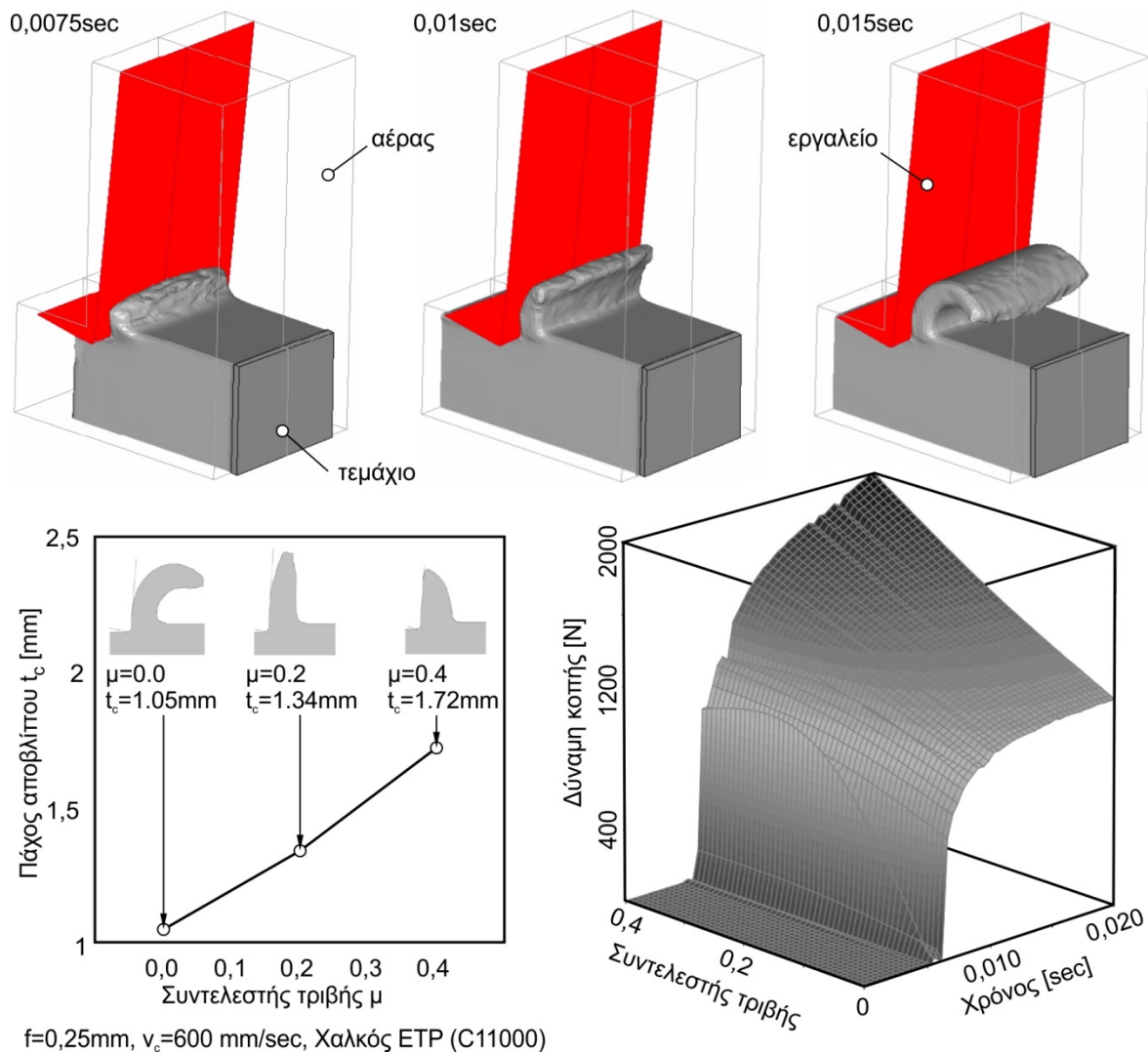
Σχήμα 2.20 Αποτελέσματα δυνάμεων και θερμοκρασιών κατά Davim et al.

Ο Arrazola και άλλοι [83] ανέπτυξαν ένα μοντέλο A.L.E. (Arbitrary Lagrangian Eulerian) με τη χρήση του Abaqus/Explicit™ για να προσομοιώσουν τη μορφοποίηση αποβλίττου κατά την κατεργασία κράματος Inconel718. Το μοντέλο τους επιβεβαιώθηκε πειραματικά ενώ παρατηρήθηκε πως για ταχύτητα κοπής 70m/min οι δυνάμεις κοπής ελαχιστοποιούνται. Ο Filice και άλλοι [84] μελέτησαν την επίδραση τριών μοντέλων τριβής και τριών διαφορετικών μοντέλων υλικών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών. Τα μοντέλα υλικών που εξετάστηκαν ήταν το μοντέλο του Oxley, των Johnson-Cook και το μοντέλο ERC/NSM σε συνδυασμό με τα μοντέλα τριβής διάτμησης, Coulomb και προσκόλλησης-ολίσθησης. Οι ερευνητές μετά από πειραματική μελέτη του AISI1045 κατέληξαν πως η καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνεται με το συνδυασμό των μοντέλων ERC και τριβής Coulomb. Ο Marusich [85] μελέτησε την επίδραση της τριβής και της ταχύτητας κοπής στις δυνάμεις κατά την ορθογωνική κοπή AL6061T6 χρησιμοποιώντας το AdvantEdge™.

Οι Guo και Ming [86] μοντελοποίησαν τη λοξή κοπή με πεπερασμένα στοιχεία με τη βοήθεια του LS-DYNA™. Για το διαχωρισμό του αποβλίττου χρησιμοποίησαν ένα επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων σε απόσταση ίση με το βάθος κοπής. Στο επίπεδο αυτό ορίστηκε επαφή σφιχτής συναρμογής. Σύμφωνα με αυτό το είδος επαφής ο διαχωρισμός λαμβάνει χώρα όταν το κοπτικό διεισδύσει στο τεμάχιο για απόσταση μεγαλύτερη από κάποιο κατώφλι. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως προσομοιώνει καλύτερα τη μορφοποίηση αποβλίττου. Οι Villumsen και Fauerholdt [87] μοντελοποίησαν την ορθογωνική κοπή AL6082-T6 με τη βοήθεια του LS DYNA™. Το υλικό μοντελοποιήθηκε κατά Johnson-Cook ενώ χρησιμοποιήθηκε επαφή με διαγραφή στοιχείων για το διαχωρισμό του αποβλίττου. Οι υπολογισμένες δυνάμεις κοπής προσέγγισαν με καλή ακρίβεια τις αντίστοιχες μετρημένες αλλά η μορφοποίηση του αποβλίττου ήταν μη ρεαλιστική.

Οι Wu και Han [88] προσομοίωσαν τη διάτρηση με χωρισμό των κόψεων του εργαλείου σε στοιχειώδη κομμάτια και υποθέτοντας ορθογωνική κοπή προσδιόρισαν τη μέγιστη θερμοκρασία στη διάτρηση του AISI 1045 χωρίς ψυκτικό υγρό (Σχήμα 2.22). Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν τρία διαφορετικά λογισμικά το Deform 2D™, το AdvantEdge™ και το ABAQUS™ με διαφορετικά μοντέλα υλικού και κριτήρια διαχωρισμού αποβλίττου, τα οποία απέκλιναν από τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις 15%, 8% και 10% αντίστοιχα. Τα

συμπεράσματά τους ήταν πως η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στις κύριες κόψεις είναι 20% μεγαλύτερη από τη μέγιστη θερμοκρασία στην εγκάρσια κόψη, ενώ σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα φάνηκε να έχει το μοντέλο του υλικού.

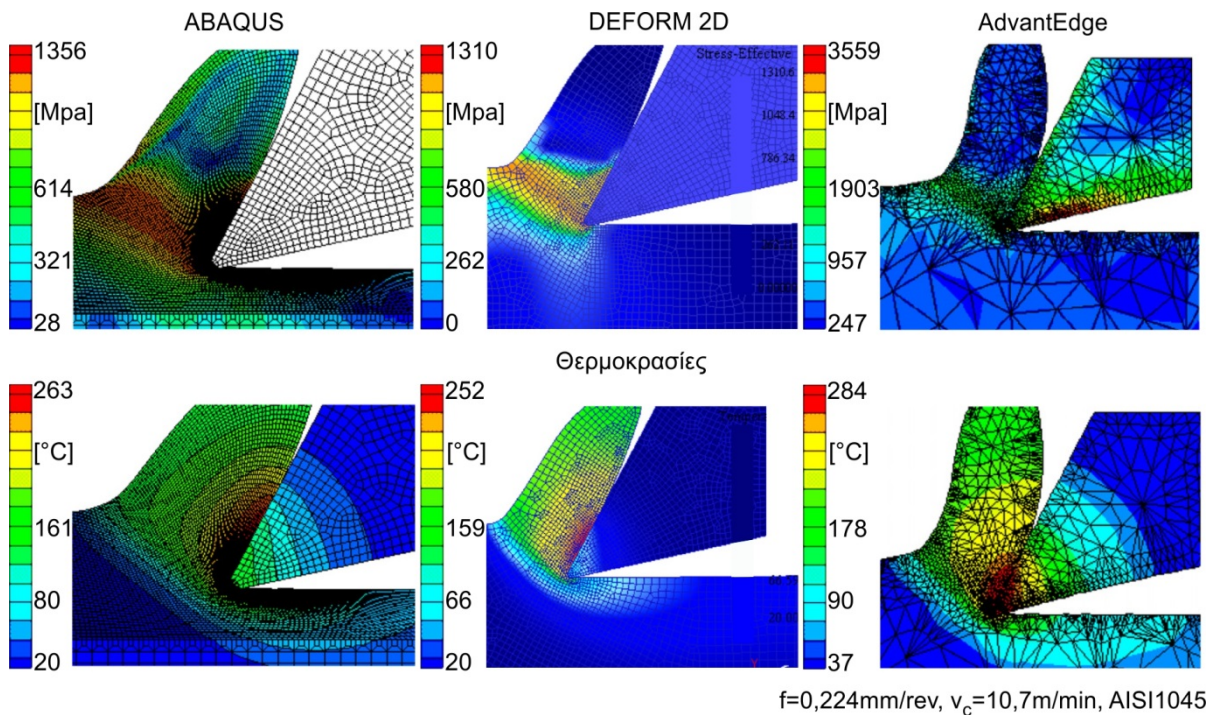


Σχήμα 2.21 Μοντελοποίηση κοπής κατά Euler με χρήση του LS-DYNA κατά Raczky et al.

Οι Kalidas και άλλοι [89, 90] μελέτησαν τη ροή θερμότητας που δημιουργείται κατά τη διάτρηση καθώς και την επίδραση της στην ελαστική επαναφορά των κατεργασμένων οπών. Τα αποτελέσματά τους επιβεβαιώθηκαν πειραματικά με σημαντικές όμως αποκλίσεις. Οι Bagci και Ozcelik [91, 92] μελέτησαν την κατανομή της θερμοκρασίας σε στοιχειώδεις κόψεις δύο διαστάσεων κατά τη διάτρηση AL 7075-T651 και χάλυβα AISI 1040. Η προσομοίωσή τους βασίστηκε στο πακέτο AdvantEdge™ και επαληθεύτηκε πειραματικά με εργαλεία με διπλή επικάλυψη TiN/TiAlN.

Ο Miller και άλλοι [93] μελέτησαν τη διάτρηση με τριβή αναπτύσσοντας ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο στο ANSYS, ενώ οι φορτίσεις και η ροή θερμότητας προς το κατεργαζόμενο υλικό υπολογίστηκαν αναλυτικά. Η πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου έγινε σε χάλυβα AISI 1020. Ένα χρόνο αργότερα, οι Miller και Shih [94] ανέπτυξαν ένα explicit μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS\Explicit™ το οποίο προσομοιώνει πλήρως την κατεργασία και υπολογίζει τη δύναμη, τη ροπή, τις τάσεις, τις παραμορφώσεις αλλά και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η μελέτη επαληθεύτηκε

πειραματικά σε AL 6061-T6. Αντίστοιχη πειραματική και στατιστική μελέτη διεξήγαγε ο Krasauskas [95] σε ελάσματα χαλύβων S235, AISI 4301 και αλουμινίου AL 5652.



Σχήμα 2.22 Προσομοίωση διάτρησης με τρία διαφορετικά λογισμικά κατά Wu και Han.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι βασικές ερευνητικές προσεγγίσεις της διάτρησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μαζί με την αντίστοιχη λίστα δημοσιεύσεων που τις αφορούν.

	Περιγραφή	Βιβλιογραφία
Κοπτικό εργαλείο	Ανάλυση τάσεων στις κόψεις και τη διατομή, μελέτη μετατοπίσεων, μελέτη δυναμικών χαρακτηριστικών, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, επικαλύψεις	[45-56]
Κατεργαζόμενο τεμάχιο	Μελέτη απόληξης, μελέτες αποκόλλησης και άλλων αστοχιών σύνθετων υλικών, μελέτες ποιοτικών χαρακτηριστικών οπών, παραμένουσες τάσεις	[57-71]
Προσομοίωση κατεργασίας	Δυνάμεις κοπής, μελέτη θερμοκρασιακών πεδίων, τριβολογικές μελέτες, βελτιστοποίηση συνθηκών κοπής	[72-93]

Πίνακας 2.1 Συνοπτικός πίνακας βασικών ερευνητικών προσεγγίσεων της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία

2.3 Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη : Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης. Η βασική συμβολή αυτού του μέρους είναι ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πακέτου προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων εστιασμένο στην περιοχή κοπής. Τα στάδια και οι επιμέρους καινοτομίες που εισάγει το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι τα εξής :

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

- **Αυτοματοποίηση της σχεδίασης εργαλείων διάτρησης:** Το λογισμικό που αναπτύχθηκε βασίζεται στη μαθηματική μοντελοποίηση των Galloway [1] και Tsai και Wu [6] για να αναπτύξει 3D παραμετρικά μοντέλα εργαλείων διάτρησης με κωνική, υπερβολοειδή και ελλειψοειδή κορυφή. Μια επιπλέον καινοτομία προκύπτει από την ικανότητα του λογισμικού να μοντελοποιεί αυτόματα και το στέλεχος αλλά και την οδηγτική λωρίδα των εργαλείων, το οποίο αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό για τη μετέπειτα ανάλυσή τους.
- **Ανάπτυξη ολοκληρωμένου προεπεξεργαστή FEM:** Ο προεπεξεργαστής που αναπτύχθηκε βασίζεται στην προσομοίωση της 2D ορθογωνικής και της 3D λοξής κοπής προσφέροντας έτσι της δυνατότητα γενίκευσης και προσομοίωσης και άλλων κατεργασιών πέραν της διάτρησης. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε αναλαμβάνει όλα τα στάδια της προεπεξεργασίας. Συνοπτικά τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν τη δημιουργία της γεωμετρίας, τη συναρμολόγηση του μοντέλου, την 2D και 3D διακριτοποίηση, την εισαγωγή των οριακών συνθηκών, τα διαφορετικά μοντέλα υλικών, τα δεδομένα επαφής, τις παραμέτρους προσομοίωσης και την εξαγωγή του τελικού αρχείου του επιλύτη. Οι αλγόριθμοι διακριτοποίησης που υιοθετήθηκαν είναι ο αλγόριθμος Delaunay 2D και 3D, ενώ προτείνεται και μια νέα απλή μέθοδος διακριτοποίησης του τεμαχίου με τρεις διαφορετικές επιλογές πύκνωσης του πλέγματος σε σχέση με το επίπεδο κοπής. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ταχύτητα επίλυσης του μοντέλου, η οποία είναι κατά πολύ μικρότερη των αντίστοιχων εμπορικών πακέτων προσομοίωσης κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία για ίδιες συνθήκες κοπής. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαίρεση του μακροσκοπικού μοντέλου σε πολλά μικρότερα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα παράλληλης επίλυσης.
- **Ανάπτυξη μεταεπεξεργαστή αποτελεσμάτων:** Ο μεταεπεξεργαστής αναλαμβάνει τον κατάλληλο μετασχηματισμό των δυνάμεων κοπής που προκύπτουν, τόσο από τις 3D προσομοιώσεις της λοξής κοπής, όσο και από τις 2D προσομοιώσεις της ορθογωνικής, σε δύναμη και ροπή διάτρησης. Μια σημαντική καινοτομία του μοντέλου είναι ότι μπορεί να υπολογίσει με πολύ καλή ακρίβεια όχι μόνο τη συνολική δύναμη κοπής και ροπή διάτρησης αλλά και την κατανομή τους στις παρειές του εργαλείου, το οποίο αποτελεί πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, τόσο στην ανάλυση του κοπτικού, όσο και στη διαδικασία σχεδίασης νέων εργαλείων.

Το μοντέλο προσομοίωσης επιβεβαιώθηκε μέσω σειράς πειραμάτων για τη μέτρηση, τόσο της συνολικής δύναμης κοπής, όσο και της κατανομής της στην εγκάρσια και τις κύριες κόψεις.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τη στατική και δυναμική ανάλυση εργαλείων διάτρησης. Μελετάται επίσης η επίδραση των συνθηκών κοπής, τόσο στο εργαλείο, όσο και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα στάδια και οι επιμέρους συνεισφορές του προτεινόμενου μοντέλου είναι τα εξής:

- **Ανάπτυξη αλγορίθμου κατανομής των δυνάμεων κοπής:** Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα από την επιστημονική κοινότητα θεωρούν την κατανομή των δυνάμεων κοπής στις κόψεις του εργαλείου ως ομοιόμορφη. Ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασιζόμενος στο μοντέλο των Antoniadis και των συνεργατών του [96, 97] λαμβάνει υπόψη του τα πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου όπως την καμπυλότητα της παρειάς και την εγκάρσια κόψη. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ενσωμάτωση του αλγορίθμου σε ένα γενικής φύσης λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων επιτρέποντας έτσι την περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας.
- **Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης μέτρησης χαρακτηριστικών της κοπής:** Η πρότυπη διάταξη που αναπτύχθηκε έχει βάση ένα πενταξονικό κέντρο κατεργασίας

χρησιμοποιώντας κάμερα υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών για την παρακολούθηση της κοπής. Έπειτα από σειρά πειραμάτων υπολογίστηκαν οι συντελεστές συμπίεσης αποβλίττου αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου.

- **Μηχανική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης:** Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα ανάλυσης των τάσεων και των μετατοπίσεων του εργαλείου υπό στατικό ή δυναμικό φορτίο. Μια ακόμα καινοτομία προκύπτει από τη συνεργασία του με το σύστημα προσομοίωσης DRILL3D [98], το οποίο είναι ικανό να υπολογίζει το μεταβαλλόμενο πάχος αποβλίττου με μεγάλη ακρίβεια, συμβάλλοντας έτσι στην ευρωστία του μοντέλου.
- **Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης των χαρακτηριστικών της οπής:** Στόχος του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η πρόβλεψη χαρακτηριστικών της οπής όπως ομοαξονικότητα, ομοκυλινδρική και ομοκυκλικότητα βάσει προτύπων ISO. Τα μοντέλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα από την επιστημονική κοινότητα βασίζονται σε αναλυτικά δυναμικά μοντέλα δύο διαστάσεων. Η καινοτομία του μοντέλου προκύπτει από τη κατάλληλη διαχείριση των δυναμικών μετατοπίσεων από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο, κατασκευάζοντας έτσι μια τρισδιάστατη οπή.
- **Ανάπτυξη πρωτοκόλλου τρισδιάστατων μετρήσεων οπών:** Οι μετρήσεις έγιναν σε πενταξονικό κέντρο κατεργασίας με τη χρήση τρισδιάστατου αισθητήρα επαφής. Για τη λήψη του μεγάλου όγκου μετρήσεων αναπτύχθηκε λογισμικό για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, την καταγραφή των μετρήσεων, τη διαχείριση τους από το χρήστη και τον τελικό υπολογισμό των χαρακτηριστικών, σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα ISO.

Τέλος τα παραπάνω ενσωματώθηκαν σε μια ενιαία πλατφόρμα ενώ σχεδιάστηκε και ένα σύγχρονο περιβάλλον διεπαφής χρήστη με γνώμονα την αυτοματοποίηση των διαδικασιών και την πληρέστερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

3

Μοντέλο Προσομοίωσης Κατεργασίας Διάτρησης

3.1 Προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία

Τα μεγέθη που εμπλέκονται στις μηχανουργικές κατεργασίες και αναλύουν τις καταπονήσεις που δέχονται τα εμπλεκόμενα σε αυτές μέρη, όπως είναι οι μετατοπίσεις, οι παραμορφώσεις, οι τάσεις και οι θερμοκρασίες, μπορούν να περιγραφούν από συστήματα διαφορικών εξισώσεων. Η εξαγωγή και η επίλυση των εξισώσεων αυτών στην περίπτωση των μηχανουργικών κατεργασιών με αναλυτικό τρόπο καθίσταται αδύνατη, λόγω της πολυπλοκότητας των γεωμετριών, της κινηματικής και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Η λύση στο πρόβλημα δίνεται μέσω της χρήσης των παρακάτω αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, οι οποίες μπορούν να δώσουν αποτελέσματα με πολύ καλή προσέγγιση :

- Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (ΜΠΔ), Finite Differences Method (FDM)
- Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), Finite Elements Method (FEM)
- Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ), Boundary Elements Method (BEM)
- Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων (ΜΠΟ), Finite Volume Method (FVM)

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην προσέγγιση Galerkin και διαφοροποιούνται ουσιαστικά μόνο στον τρόπο προσέγγισης της λύσης. Στην προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών έχει επικρατήσει η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), λόγω της δυνατότητάς της να χειρίζεται τρισδιάστατα προβλήματα με συνυπολογισμό πολλών διαφορετικών δυναμικών φαινομένων και προβλημάτων επαφής.

Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση των μηχανουργικών κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία είναι ο διαχωρισμός του ακατέργαστου υλικού και η μετατροπή του σε κατεργασμένο τεμάχιο και σε απόβλητο. Για τη μοντελοποίηση της πλαστικής ροής του υλικού υπάρχουν οι εξής προσεγγίσεις:

Μέθοδος Lagrange: Στην προσέγγιση αυτή το πλέγμα ταυτίζεται με το υλικό και την κίνησή του στο χώρο. Τα πεπερασμένα στοιχεία αλλάζουν σχήμα και προσανατολισμό καθώς το υλικό ρέει στις ζώνες παραμόρφωσης. Έτσι, το διάνυσμα θέσης του κάθε στοιχείου ορίζεται ως συνάρτηση του χρόνου, εξαρτώμενο από την αρχική του θέση. Στη μοντελοποίηση κατά Lagrange χρειάζονται μεγαλύτεροι χρόνοι επίλυσης λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών. Τα πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να παραμορφωθούν τόσο πολύ ώστε να προκύψουν αρνητικοί όγκοι. Στην περίπτωση αυτή τα πεπερασμένα στοιχεία θα πρέπει είτε να αφαιρεθούν για να διασφαλιστεί η σύγκλιση της μεθόδου, είτε να γίνει επαναδιακριτοποίηση. Η τεχνική προσαρμοστικής διακριτοποίησης χρησιμοποιείται από όλα σχεδόν τα εμπορικά λογισμικά προσομοίωσης κατεργασιών. Με αυτή την τεχνική αυξάνεται η ακρίβεια επίλυσης αλλά αυξάνεται κατακόρυφα και ο χρόνος επίλυσης. Η αύξηση του χρόνου επίλυσης οφείλεται από τη μια στον υπολογισμό της νέας διακριτοποίησης και από την άλλη στην εξαιρετικά πολύπλοκη γεωμετρία του κατεργασμένου τεμαχίου η οποία απαιτεί πολύ μικρά στοιχεία για να διακριτοποιηθεί.

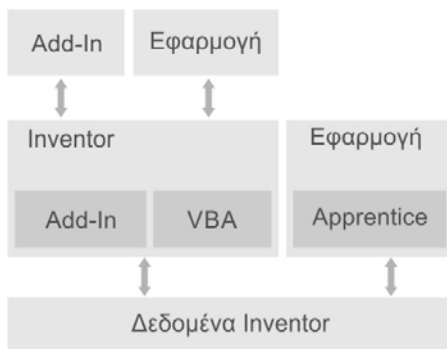
Μέθοδος Euler: Τα πεπερασμένα στοιχεία σε αυτή την προσέγγιση παραμένουν σταθερά στο χρόνο, χωρίς να παραμορφώνονται, καθιστώντας τη μέθοδο υπολογιστικά συμφέρουσα. Η μοντελοποίηση κατά Euler χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις κατεργασίας όπου οι συνθήκες διατηρούνται σταθερές. Έτσι, η μέθοδος δεν ενδείκνυται για τη μοντελοποίηση των μεταβατικών περιοχών εισόδου και εξόδου του εργαλείου, για διακοπτόμενες κοπές όπως στο φραιζάρισμα και για κοπές με περίπλοκη γεωμετρία αποβλήτου, όπως στη διάτρηση. Ένα ακόμα πρόβλημα για τη μοντελοποίηση κατά

Euler αποτελεί η περιγραφή των ιδιοτήτων του υλικού καθώς και η δυσκολία διαχείρισης των κινούμενων οριακών συνθηκών.

Μέθοδος ALE: Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα συνδυασμό των μεθόδων απεικόνισης κατά Lagrange και κατά Euler. Στην απεικόνιση ALE το πλέγμα εσωτερικά του υλικού μπορεί να κινείται αυθαίρετα ώστε να βελτιστοποιείται το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ το πλέγμα στα όρια του τεμαχίου μπορεί να κινείται μαζί με το υλικό. Η εξομάλυνση αυτή λαμβάνει χώρα όταν ξεπεραστεί ένα άνω όριο παραμόρφωσης, ενώ πριν από αυτό, το πλέγμα ακολουθεί το υλικό. Για αυτόν το λόγο η μέθοδος είναι ευρέως διαδεδομένη σε προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεών με ρευστά όπου δημιουργούνται μεγάλοι λόγοι παραμόρφωσης του υλικού. Στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού το κοπτικό εργαλείο μοντελοποιείται κατά Lagrange ενώ η μέθοδος ALE χρησιμοποιείται στην περιοχή κοπής του τεμαχίου όπου παρατηρούνται και οι μέγιστες παραμορφώσεις.

3.2 Περιβάλλοντα ανάπτυξης του μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά περιβάλλοντα τα οποία ενσωματώθηκαν σε μια ενιαία πλατφόρμα προσομοίωσης. Το πρώτο περιβάλλον αφορά την προγραμματιστική διεπαφή εφαρμογών API (Application Programming Interface) του Autodesk Inventor 2012 για την ανάπτυξη λογισμικού αυτόματης σχεδίασης εργαλείων διάτρησης. Το πλεονέκτημα που παρέχει η χρήση της API προκύπτει από την ικανότητα χειρισμού προγραμματιστικά των λειτουργιών ενός συστήματος CAD. Αυτό σημαίνει πολλή μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου, ειδικότερα σε επαναληπτικές διαδικασίες πολύπλοκης σχεδίασης. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό της API προκύπτει από την ικανότητα της εφαρμογής να συνεργάζεται με εξωτερικές αυτόνομες εφαρμογές.



Σχήμα 3.1 Διαθέσιμοι τρόποι προγραμματισμού του API

προγραμματισμό μέσα από το περιβάλλον της VBA (Visual Basic for Application) το οποίο είναι ενσωματωμένο στο Inventor. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία σύνταξης και αποσφαλμάτωσης του κώδικα λόγω της αμεσότητας αλληλεπίδρασης. Και οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις εσωτερικού προγραμματισμού έχουν το πλεονέκτημα της ταχύτητας αφού δεν απαιτείται επιπλέον μεταφορά δεδομένων από εξωτερικά περιβάλλοντα.

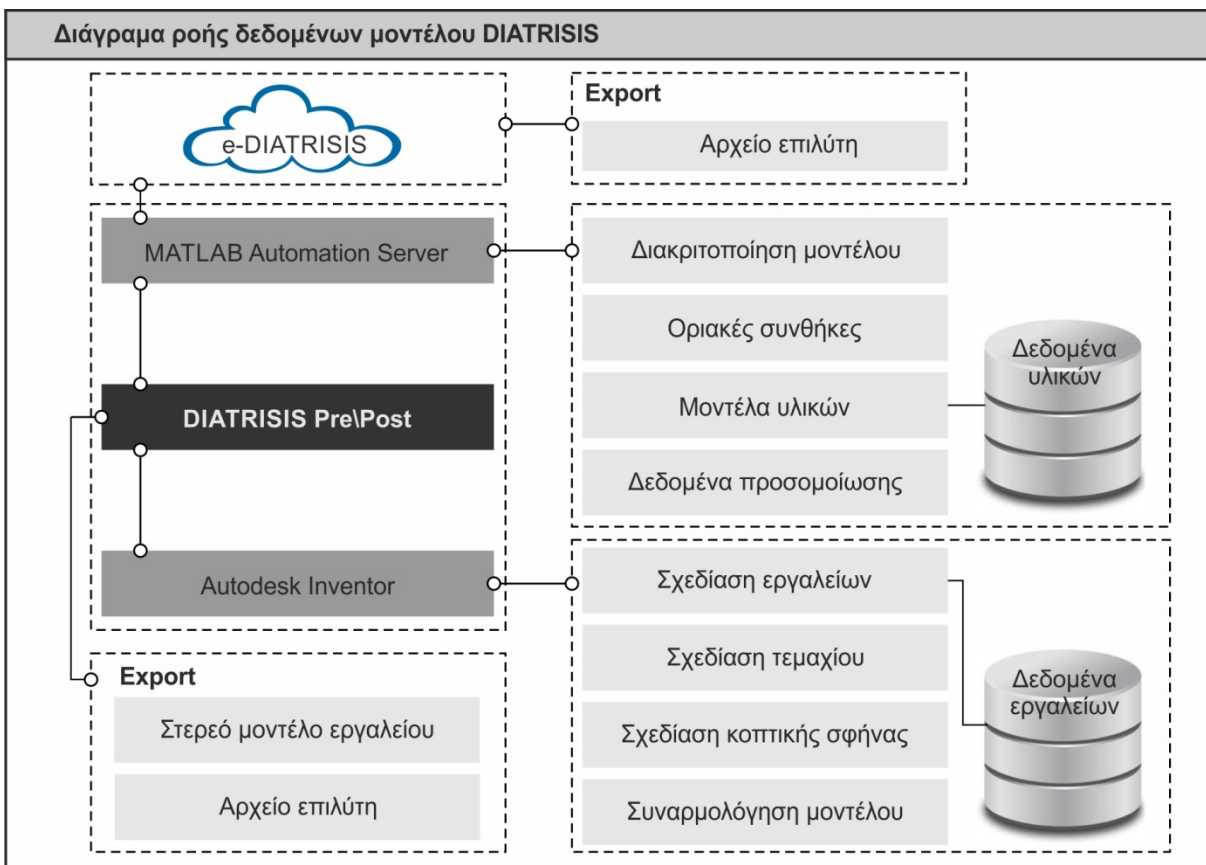
Στην περίπτωση προγραμματισμού του συστήματος εξωτερικά του Inventor υπάρχουν τρεις διαθέσιμες επιλογές: Η πρώτη επιλογή αφορά την ανάπτυξη ενός εξωτερικού πρόσθετου (Add-In). Η περίπτωση αυτή έχει το μειονέκτημα πως βασίζεται στην εκτέλεση του Inventor και επιπροσθέτως κοστίζει σε χρόνο διαμετακόμισης δεδομένων στον πυρήνα του προγράμματος. Η δεύτερη επιλογή αφορά με την ανάπτυξη αυτόνομης εφαρμογής η οποία έχει το πλεονέκτημα ότι δε βασίζεται στην εκτέλεση του Inventor. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα προγραμματισμού αυτόνομης εφαρμογής βασισμένη στον εξυπηρετητή Apprentice. Το πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η ταχύτητα εκτέλεσης η οποία είναι μεγαλύτερη από οποιονδήποτε άλλο τρόπο προγραμματισμού αφού παρακάμπτει εντελώς την εφαρμογή του

Inventor, αλλά οι διαθέσιμες δυνατότητες είναι πολύ περιορισμένες και αναφέρονται κυρίως σε διαχείριση και τροποποίηση υπάρχοντων μοντέλων και όχι σε ανάπτυξη νέων.

Για τον προγραμματισμό του μοντέλου προσομοίωσης επιλέχθηκε η ανάπτυξη αυτόνομης εφαρμογής για δύο κυρίως λόγους: Ο πρώτος λόγος σχετίζεται με την αυτονομία του συστήματος εφόσον δε βασίζεται στην εκτέλεση του Inventor και ο δεύτερος με την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών επιπλέον εξωτερικών προγραμμάτων.

Το δεύτερο περιβάλλον που επιλέχθηκε και ενσωματώθηκε στο κυρίως πρόγραμμα είναι το περιβάλλον της MATLAB. Η ενσωμάτωσή του στο κυρίως πρόγραμμα έγινε μέσω του εξυπηρετητή MATLAB Automation Server. Το περιβάλλον αυτό επιλέχθηκε λόγω της ευκολίας διαχείρισης και ανάπτυξης αλγορίθμων αλλά κυρίως για τις πολύ καλές δυνατότητες δημιουργίας γραφημάτων και γραφικών, πράγμα ιδιαίτερως σημαντικό για την γραφική αναπαράσταση πεπερασμένων στοιχείων και των αποτελεσμάτων.

Τέλος για την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε ο μη-γραμμικός επιλύτης LS-DYNA της LSTC. Ο συγκεκριμένος επιλύτης επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητας που παρέχει στο χρήστη να παρεμβαίνει στις παραμέτρους του αλλά και να διαχειρίζεται ολοκληρωτικά το στάδιο της προεπεξεργασίας όπως επίσης και να έχει πλήρη πρόσβαση στα αποτελέσματα της επίλυσης. Για τη μελέτη και τη γραφική απεικόνιση ορισμένων αποτελεσμάτων, όπως η κατανομή τάσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LS-PrePost. Λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων του ο συγκεκριμένος επιλύτης έχει επίσης ενσωματωθεί και σε αρκετά εμπορικά λογισμικά. Στο [Σχήμα 3.2](#) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των δεδομένων στα συνεργαζόμενα με το DIATRISIS συστήματα τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ροής δεδομένων της πλατφόρμας προσομοίωσης

Για ευκολία του χρήστη και περαιτέρω διάδοση του μοντέλου αναπτύχθηκε ένας διαδικτυακός μηχανισμός (e-DIATRISIS) μοντελοποίησης της ορθογωνικής και της λοξής κοπής. Αφού ο χρήστης παρέχει τα κατάλληλα δεδομένα στο σύστημα, αυτό του επιστρέφει το αρχείο LS-DYNA προς επίλυση. Το σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να ανταλλάσει δεδομένα, τόσο με το API του Inventor, όσο και με τον εξυπηρετητή της MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, το Inventor αναλαμβάνει τη σχεδίαση των εργαλείων διάτρησης ενώ υπάρχει και μια βάση τεχνολογικών παραμέτρων των εργαλείων για βοήθεια του χρήστη. Επίσης, το Inventor αναλαμβάνει τη σχεδίαση του τεμαχίου, της κοπτικής σφήνας και τη συναρμολόγηση του μοντέλου. Η MATLAB αναλαμβάνει τη διακριτοποίηση του μοντέλου, την εισαγωγή των οριακών συνθηκών, τον ορισμό των διαφορετικών μοντέλων υλικών σε συνεργασία με μια βάση δεδομένων υλικών και τον ορισμό των διαφόρων δεδομένων προσομοίωσης.

3.3 Δομή του μοντέλου

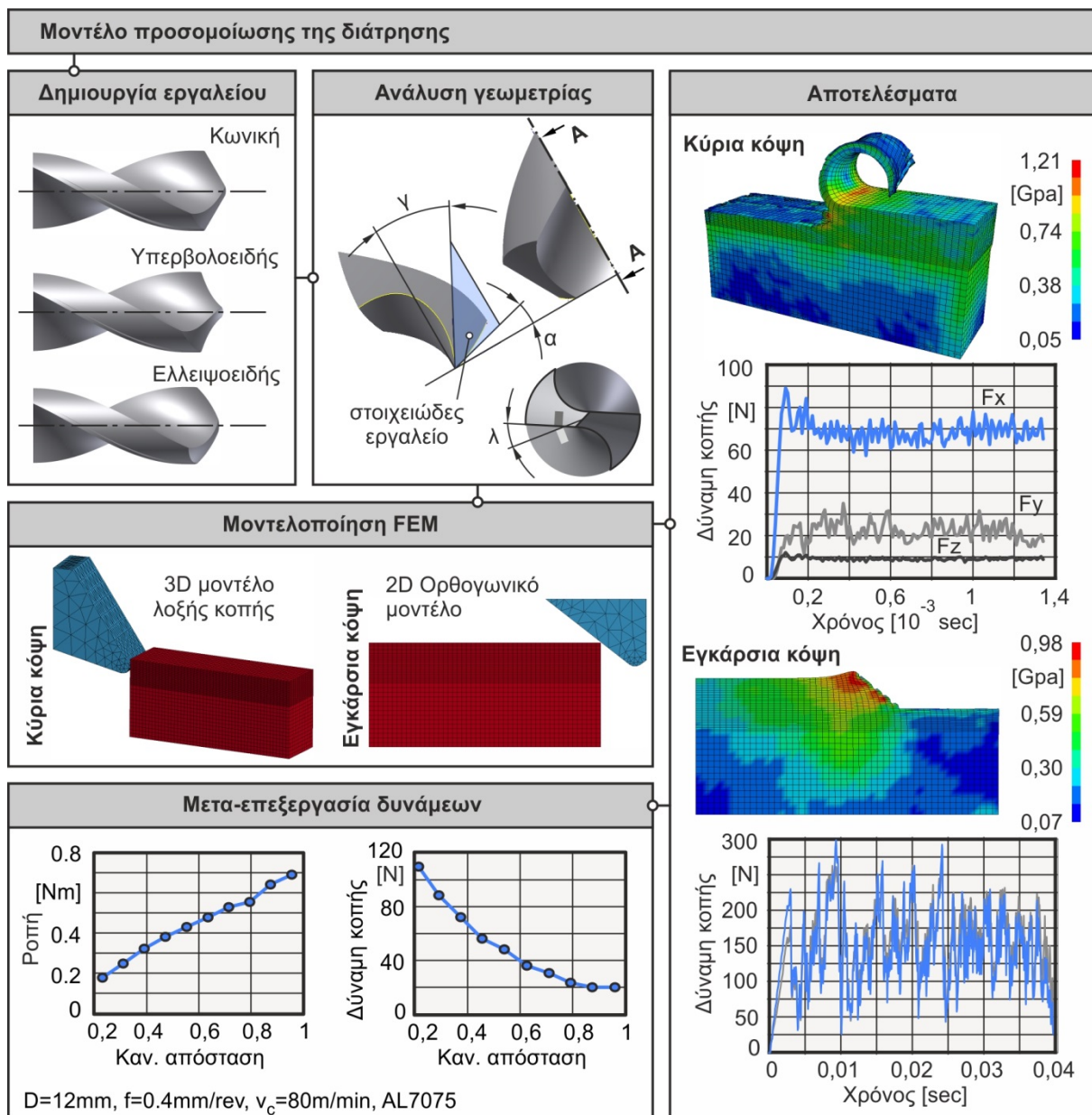
Η προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης έγινε μέσω της ανάπτυξης της παραπάνω ενιαίας πλατφόρμας και περιλαμβάνει τα διακριτά στάδια που εικονίζονται στο [Σχήμα 3.3](#). Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει η κατεργασία αλλά και το εργαλείο διάτρησης, η παρακάτω δομή αφορά τη μελέτη του μισού εργαλείου το οποίο περιλαμβάνει τη μια από τις δύο κύριες κόψεις και τη μισή εγκάρσια.

Τα τελικά αποτελέσματα αφορούν ολόκληρο το εργαλείο και μετασχηματίζονται κατάλληλα θεωρώντας δύο ίδιες και συμμετρικές κόψεις. Η διαδικασία της προσομοίωσης συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

- **Δημιουργία του 3D εργαλείου διάτρησης:** Στο στάδιο αυτό ο χρήστης εισάγει τα κατάλληλα γεωμετρικά και κατασκευαστικά δεδομένα του εργαλείου ενώ δίνεται επίσης η δυνατότητα επιλογής της κατασκευής είτε του μισού εργαλείου χωρίς στέλεχος και οδηγητική λωρίδα, είτε του ολόκληρου και λεπτομερούς τρισδιάστατου σχεδίου. Τα εργαλεία που προκύπτουν έχουν είτε κωνική, είτε υπερβολοειδή, είτε ελλειψοειδή κορυφή.
- **Ανάλυση της γεωμετρίας του εργαλείου:** Στο στάδιο αυτό αναλύεται η γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου του εργαλείου που προκύπτει από το προηγούμενο βήμα. Το μοντέλο ορίζεται παραμετρικά και η μελέτη των απαιτούμενων γωνιών γίνεται σε ελάχιστο χρόνο από το χρήστη.
- **Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:** Το στάδιο αυτό είναι πολύ βασικό και περιλαμβάνει αρχικά τον κατάλληλο μετασχηματισμό του μακροσκοπικού μοντέλου της διάτρησης σε μια σειρά από 2D προβλήματα ορθογωνικής κοπής και 3D προβλήματα λοξής κοπής. Στη συνέχεια τα μοντέλα αυτά διακριτοποιούνται, εισάγονται οι οριακές συνθήκες, τα μοντέλα και τα δεδομένα των υλικών καθώς και τα δεδομένα της προσομοίωσης. Τέλος εξάγονται μετά από κατάλληλη επεξεργασία τα αρχεία του επιλύτη.
- **Επίλυση των μοντέλων:** Το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει την επίλυση των μοντέλων όπου σαν είσοδος λαμβάνονται τα αρχεία που προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα. Λόγω του χωρισμού του κυρίως μοντέλου σε πολλά μικρότερα, η επίλυση λαμβάνει χώρα παράλληλα σε διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα.
- **Παρουσίαση των αποτελεσμάτων:** Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των μοντέλων. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν κυρίως την κατανομή και το μέγεθος των τάσεων στο τεμάχιο και κυρίως τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Οι δυνάμεις αυτές αφορούν τα μοντέλα της λοξής και της ορθογωνικής κοπής.

- Μετα-επεξεργασία των δυνάμεων κοπής:** Στο τελευταίο αυτό στάδιο γίνεται μετασχηματισμός των δυνάμεων κοπής των επιμέρους μοντέλων σε ολική δύναμη κοπής και ροπή διάτρησης.

Τα παραπάνω στάδια περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.



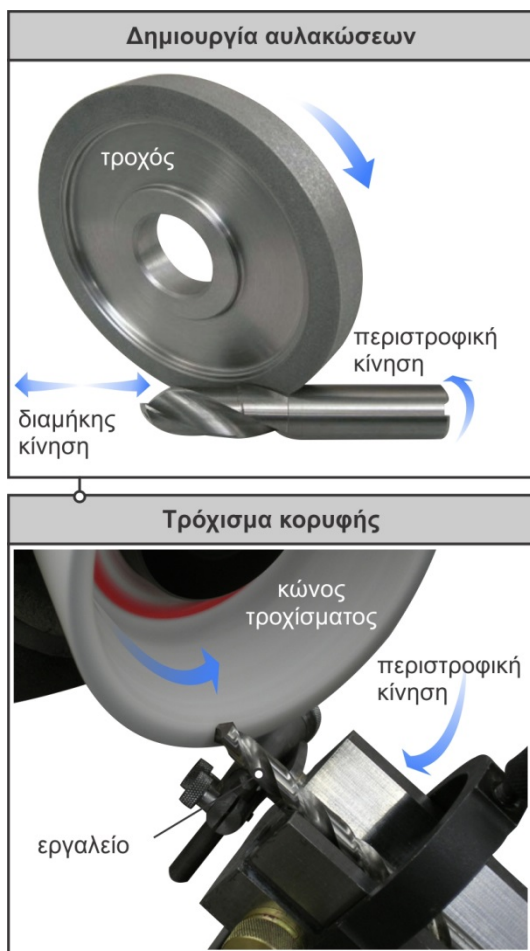
Σχήμα 3.3 Βασικά στάδια προσομοίωσης της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία

3.4 Τρισδιάστατη μοντελοποίηση του εργαλείου

Στο στάδιο αυτό αναπτύχθηκε μια αυτόνομη εφαρμογή η οποία κάνει χρήση της διεπαφής της εφαρμογής Inventor (API) για να κατασκευαστούν τρισδιάστατα εργαλεία διάτρησης με κωνική, υπερβολοειδή και ελλειψοειδή κορυφή. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα απλής και λεπτομερέστερης μοντελοποίησης. Στην απλή μοντελοποίηση κατασκευάζεται μόνο το κυρίως σώμα του εργαλείου και η κορυφή του με ή χωρίς ακτίνα καμπύλωσης των κοπτικών ακμών. Στη λεπτομερή μοντελοποίηση περιλαμβάνεται επιπλέον η κατασκευή του στελέχους και της οδηγητικής λωρίδας.

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

3.4.1 Διαδικασία μοντελοποίησης



Σχήμα 3.4 Διαδικασία παραγωγής εργαλείων διάτρησης

προφίλ. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες και οι αυλακώσεις του τρυπανιού.

Ανάλογα με τον τύπο και τη γεωμετρία του τρυπανιού ακολουθούνται και άλλου τύπου διαδικασίες τροχίσματος, συνήθως μικρότερης έκτασης και για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα το τρόχισμα της κορυφής ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μήκος της εγκάρσιας κόψης.

Οι παραπάνω διαδικασίες προσομοιώθηκαν στο σύστημα CAD που επιλέχθηκε. Τα δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του μοντέλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες όπως αυτές φαίνονται στο [Σχήμα 3.5](#).

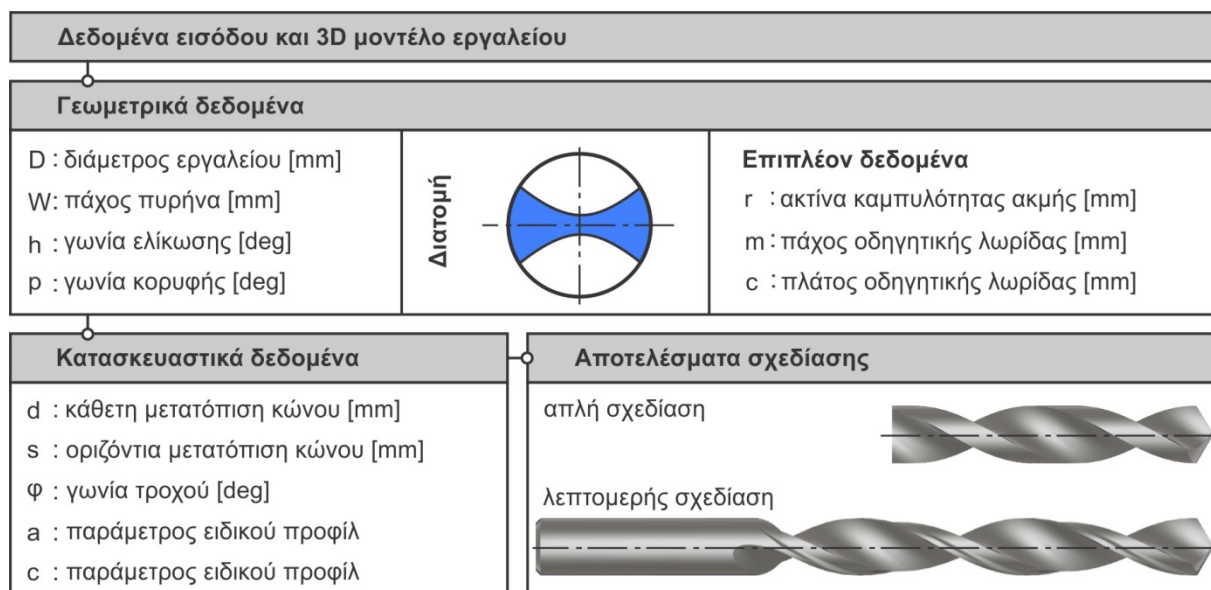
Η πρώτη κατηγορία των δεδομένων σχετίζεται με τη γεωμετρική περιγραφή του εργαλείου και αποτελείται από τη διάμετρο, το πάχος του πυρήνα, την ημιγωνία της κορυφής και τη γωνία ελίκωσης. Επίσης δίνονται στο χρήστη τρεις επιπλέον επιλογές που αφορούν την εισαγωγή καμπύλωσης των κοπτικών ακμών, τη κατασκευή οδηγητικής λωρίδας και την κατασκευή στελέχους του εργαλείου. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει εργαλείο με καμπύλωση κοπτικών ακμών πρέπει να εισάγει την ακτίνα καμπυλότητας, ενώ σε περίπτωση επιλογής εργαλείου με οδηγητική λωρίδα πρέπει να εισάγει το πλάτος και το πάχος της λωρίδας.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το τρισδιάστατο τρόχισμα της κορυφής του εργαλείου βασίζεται στην προσομοίωση του τρόπου κατασκευής των εργαλείων διάτρησης. Η διαδικασία κατασκευής ενός εργαλείου διάτρησης περιλαμβάνει δύο στάδια όπως φαίνονται στο [Σχήμα 3.4](#).

Στο πρώτο στάδιο γίνεται η επεξεργασία των αυλακώσεων. Κατά τη διαδικασία αυτή ο τροχός είναι ακίνητος ενώ το τρυπάνι μετακινείται παράλληλα στον άξονά του και περιστρέφεται ταυτόχρονα. Κατά την κατεργασία της δημιουργίας των αυλακώσεων ιδιαίτερο ρόλο παίζουν, τόσο οι συνθήκες κοπής, όσο και το βάθος κοπής και το προφίλ του τροχού. Οι συνθήκες κίνησης του εργαλείου καθορίζουν την τελική γωνία ελίκωσης ενώ το βάθος κοπής και το προφίλ του τροχού καθορίζουν τη μορφή της διατομής του εργαλείου.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει το τρόχισμα της κορυφής. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, το εργαλείο έρχεται σε επαφή με τον κώνο τροχίσματος και στη συνέχεια περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κώνου ώστε να δημιουργηθεί όλη η επιφάνεια ελευθερίας. Ιδιαίτερο ρόλο και σε αυτό το στάδιο παίζει το προφίλ του κώνου τροχίσματος. Έτσι, για τρόχισμα κωνικής κορυφής, ο κώνος πρέπει να έχει ευθύγραμμο προφίλ, ενώ για ειδικού τύπου κορυφές ο τροχός πρέπει να έχει το αντίστοιχο

Η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με τις κατασκευαστικές παραμέτρους όπως αυτές φαίνονται στο [Σχήμα 3.6](#) και πιο συγκεκριμένα την μετατόπιση του κώνου τροχίσματος παράλληλα με τον άξονά του, την οριζόντια μετατόπισή του και τις παραμέτρους της έλλειψης ή της υπερβολής, σε περίπτωση μοντελοποίησης ελλειψοειδών ή υπερβολοειδών εργαλείων αντίστοιχα.



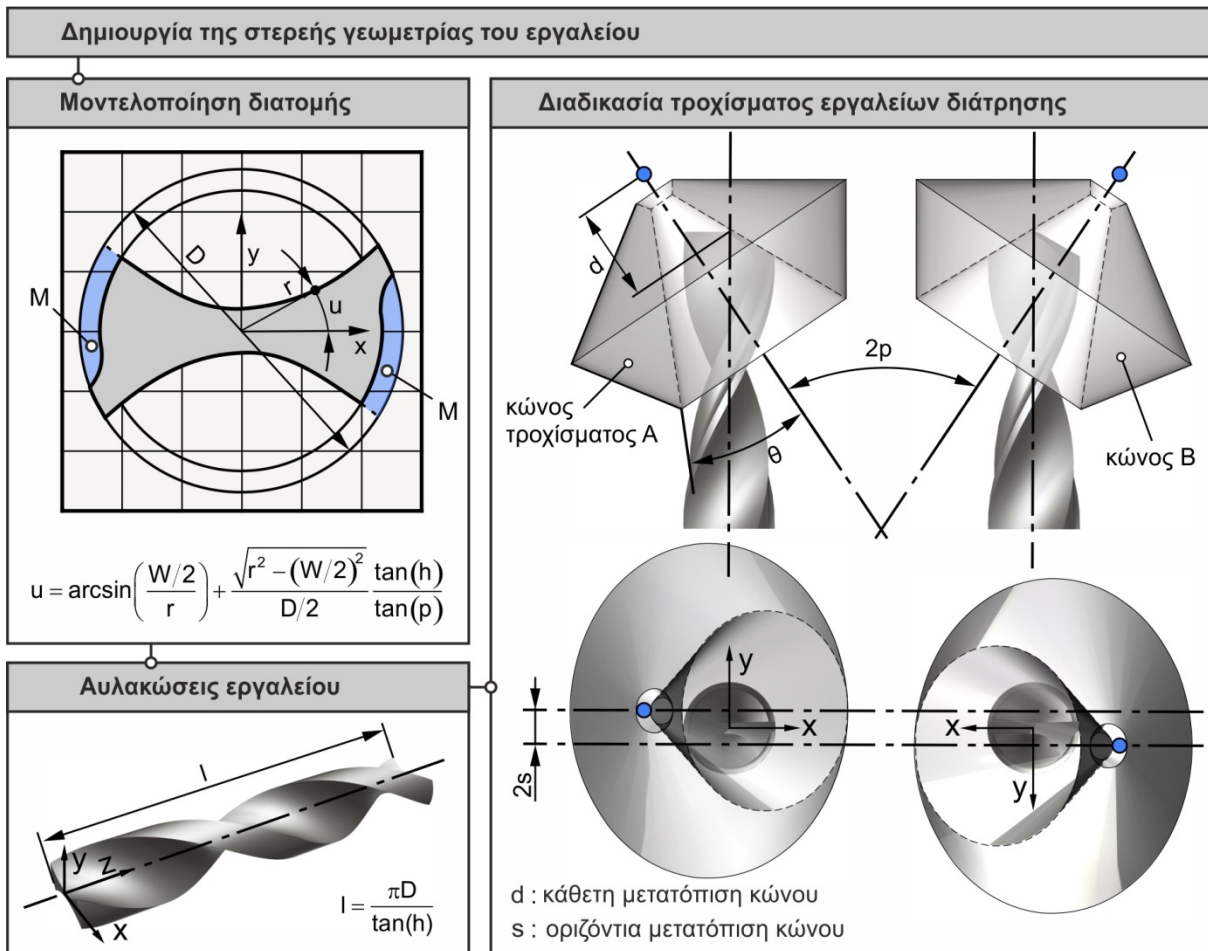
Σχήμα 3.5 Δεδομένα εισόδου για την μοντελοποίηση των εργαλείων διάτρησης

Η διαδικασία κατασκευής του εργαλείου ξεκινά με τη σχεδίαση της διατομής του. Για το στάδιο αυτό χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Galoway που φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η εξίσωση αυτή επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητάς της να μοντελοποιεί εργαλεία με ευθείες κόψεις και να συνδέει την τελική διατομή με τις βασικές παραμέτρους του εργαλείου. Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση της διατομής μετατοπίζεται και ταυτόχρονα περιστρέφεται κατά τον άξονα Z ώστε να μοντελοποιηθεί το κυρίως σώμα του εργαλείου. Η παράμετρος του μήκους της μετατόπισης l φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ενώ η διατομή περιστρέφεται κατά 360° γύρω από τον άξονα Z.

Η επόμενη φάση περιλαμβάνει το τρόχισμα της κορυφής του εργαλείου ανάλογα με την επιθυμητή μορφή. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε παράγει τρεις διαφορετικούς τύπους εργαλείων διάτρησης οι οποίοι θα αναλυθούν λεπτομερέστερα στα επόμενα κεφάλαια. Αν ο χρήστης έχει επιλέξει την καμπύλωση των κοπτικών ακμών, τότε το επόμενο στάδιο επιλέγει αυτόματα και καμπυλώνει, τόσο τις κύριες, όσο και την εγκάρσια κόψη του τρυπανιού. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην ανάλυση τάσεων του κοπτικού, αφενός διότι η τοποθέτηση δυνάμεων πάνω στην ακμή έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη συγκέντρωση τάσεων και αφετέρου γιατί έτσι προσεγγίζεται πιο καλά το πραγματικό πρόβλημα, εφόσον καμία κοπτική ακμή δεν είναι απόλυτα αιχμηρή.

Στη συνέχεια γίνεται η μοντελοποίηση της οδηγητικής λωρίδας. Από το αρχικό προφίλ που σχεδιάστηκε, αφαιρείται το σκιασμένο τμήμα M που φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η αφαίρεση του τμήματος γίνεται με τον αντίθετο ακριβώς τρόπο της δημιουργίας αυλακώσεων, δηλαδή οι δύο διατομές αφαιρούνται από το κυρίως σώμα του στερεού, κινούμενες και περιστρεφόμενες ταυτόχρονα γύρω από τον άξονα Z και σε αντίθετη κατεύθυνση.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τη δημιουργία του κυλινδρικού στελέχους το οποίο δημιουργείται επαπτομενικά στο τέλος του κυρίως σώματος του εργαλείου. Σε αυτό το στάδιο, στο σημείο ένωσης του στελέχους με το κύριο σώμα, έχουν δημιουργηθεί αρκετές γωνίες οι οποίες είναι ανεπιθύμητες στην ανάλυση τάσεων.



Σχήμα 3.6 Βασικά στάδια κατασκευής των στερεών μοντέλων των εργαλείων

Επίσης για μεγαλύτερη πιστότητα σε σχέση με το πραγματικό εργαλείο, τόσο οι αυλακώσεις, όσο και το κομμάτι της οδηγικής λωρίδας, θα πρέπει να αποσβένεται ομαλά στο κύριο στέλεχος του εργαλείου. Έτσι, αφού επιλεγούν οι διατομές των αυλακώσεων και της οδηγικής λωρίδας, γίνεται αφαίρεση υλικού από το στέλεχος. Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται προκύπτει από τη μετακίνηση και περιστροφή των διατομών, με φορά προς τον άξονα Z και με μικρή γωνία απόσβεσης. Το τελικό αρχείο που παράγεται, αποθηκεύεται σε μορφή τρισδιάστατου στερεού μοντέλου για περαιτέρω επεξεργασία.

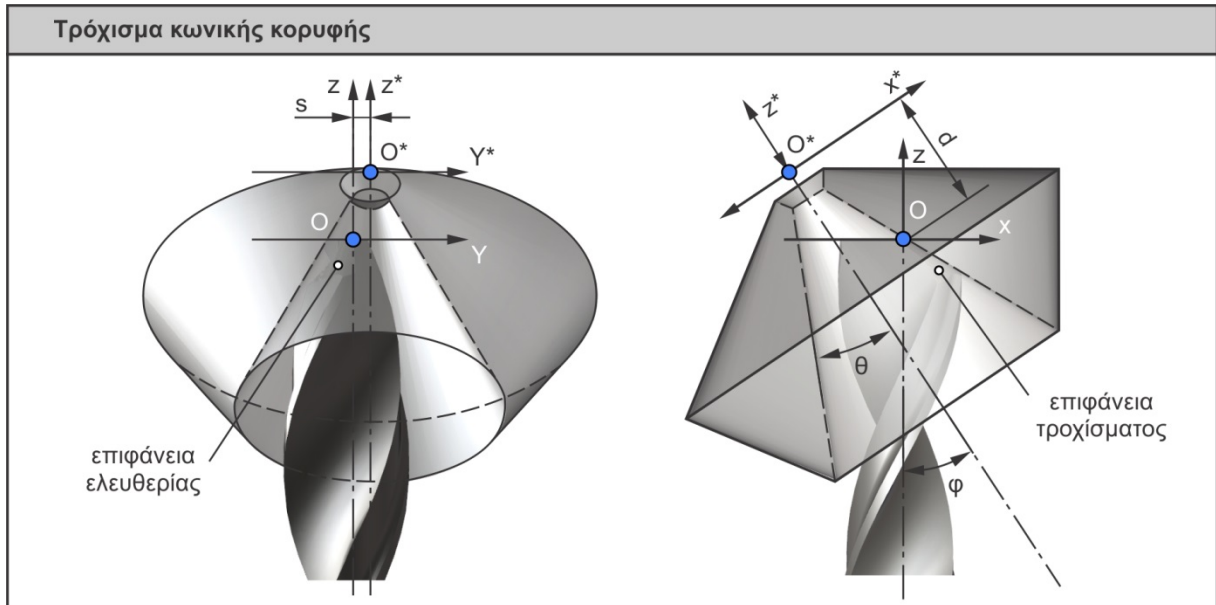
Ιδιαίτερο ρόλο στη διαδικασία τροχίσματος διαδραματίζουν οι κατασκευαστικές παράμετροι. Λόγω του ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κατασκευαστικών παραμέτρων και της τελικής επιφάνειας ελευθερίας που προκύπτει, συνήθως γίνονται επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις για να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων αυτών σε ανεξάρτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η γωνία κλίσης της εγκάρσιας κόψης και οι γωνίες αποβλήτου του εργαλείου. Στις μελέτες των Tsai και Wu [6], η παραμετρική ανάλυση έδειξε πως αυξάνοντας την παράμετρο d η γωνία της εγκάρσιας κόψης μειώνεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την παράμετρο s. Αντίστοιχα, ίδια τάση παρατηρήθηκε και για την περιφερειακή γωνία ελευθερίας.

3.4.2 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων κωνικών εργαλείων διάτρησης

Η διαδικασία τροχίσματος της κορυφής αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο της κατασκευής τρυπανιών. Στο στάδιο αυτό βασίζονται οι εταιρίες κατασκευής εργαλείων για να διαφοροποιήσουν τα προϊόντα τους, καθώς η κορυφή του εργαλείου είναι αυτή που αναλαμβάνει άμεσο ρόλο στην κοπή και συνεπώς παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Τα διαθέσιμα πρότυπα δε δίνουν ακριβείς διαδικασίες τροχίσματος και διαστάσεις της κορυφής, αλλά περιορίζονται μόνο σε βασικές διαστάσεις ολόκληρου του εργαλείου.

Το Σχήμα 3.7 παρουσιάζει τη διαδικασία τροχίσματος της κορυφής ώστε να προκύψει κωνική διαμόρφωση και ευθείες κύριες κόψεις. Αρχικά ο κώνος τροχίσματος περιστρέφεται κατά γωνία φ . Η γωνία αυτή δίνεται από την εξίσωση (3.1) και προσδιορίζει την τελική γωνία κορυφής του εργαλείου που θα προκύψει.



Σχήμα 3.7 Διαδικασία τροχίσματος κωνικής κορυφής

$$2\rho = 2(\theta + \varphi) \quad (3.1)$$

όπου:

ρ : ημιγωνία της κορυφής του εργαλείου [deg]

θ : ημιγωνία του κώνου τροχίσματος [deg]

φ : γωνία τοποθέτησης του κώνου τροχίσματος σε σχέση με το εργαλείο [deg]

Στη συνέχεια, το κέντρο του κώνου τροχίσματος μετατοπίζεται παράλληλα στον άξονα z^* κατά απόσταση d και παράλληλα στον άξονα y^* κατά απόσταση s . Το νέο σημείο που προκύπτει μετά τις μετατοπίσεις δίνεται από τις συντεταγμένες των εξισώσεων (3.2), (3.3), (3.4).

$$x_o^* = \sqrt{d^2 \tan^2 \theta - s^2 \cos \varphi} + d \sin \varphi \quad (3.2)$$

$$y_o^* = -s \quad (3.3)$$

$$z_o^* = d \cos \varphi - \sqrt{d^2 \tan^2 \theta - s^2 \sin \varphi} \quad (3.4)$$

όπου:

x_o^* : συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα x [mm]

y_o^* : συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα y [mm]

z_o^* : συντεταγμένη της αρχής του κώνου τροχίσματος στο άξονα z [mm]

θ : ημιγωνία του κώνου τροχίσματος [deg]

φ : γωνία τοποθέτησης του κώνου τροχίσματος σε σχέση με το εργαλείο [deg]

d : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Z^* [mm]

s : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Y^* [mm]

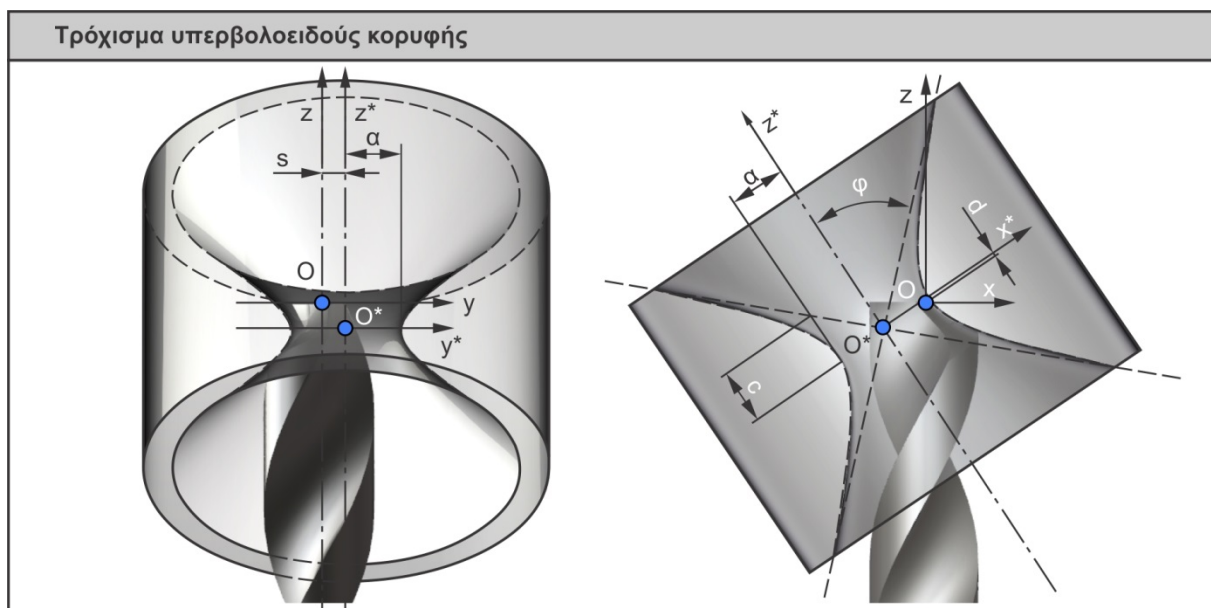
Αφού βρεθεί το μετατοπισμένο κέντρο του κώνου, δημιουργείται ο άξονάς του και στη συνέχεια το μισό της διατομής του. Η διατομή αυτή περιστρεφόμενη γύρω από τον άξονα z δίνει τον κώνο τροχίσματος. Εν συνεχεία, γίνεται αφαίρεση του υλικού του εργαλείου με χρήση των λογικών λειτουργιών (Boolean operations) του συστήματος CAD και προκύπτει η τελική επιφάνεια ελευθερίας του εργαλείου.

Για να διασφαλιστεί ότι το εργαλείο που μοντελοποιήθηκε προσεγγίζει το αντίστοιχο πραγματικό, εκτός από τα βασικά γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, εξετάστηκαν και μια σειρά άλλα όπως: η γωνία εγκάρσιας κόψης, η γωνία αποβλήτου στη διάμετρο του εργαλείου, το πάχος της οδηγητικής λωρίδας, το μήκος των αυλακώσεων και του στελέχους. Η μελέτη του πραγματικού εργαλείου έγινε με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου Leica M125 και οι κατασκευαστικές παράμετροι επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.

3.4.3 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων υπερβολοειδών εργαλείων διάτρησης

Τα εργαλεία διάτρησης με υπερβολοειδή κορυφή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές διάτρησης. Τα εργαλεία αυτά έχουν την ιδιότητα να ασκούν μεγάλη πίεση σταδιακά, διευκολύνοντας έτσι τη διεύθυνση του κοπτικού στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Η διαδικασία τροχίσματος εργαλείων διάτρησης με υπερβολοειδή κορυφή είναι παρόμοια με αυτήν των κωνικών και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8. Σε αυτήν την περίπτωση, το κέντρο του τροχού βρίσκεται από τις συντεταγμένες των εξισώσεων (3.5), (3.6), (3.7) και συμπίπτει με την τομή των ασύμπτωτων ευθειών της υπερβολής. Στις εξισώσεις αυτές τα a και c αναπαριστούν τις παραμέτρους της επιφάνειας τροχίσματος της οποίας η εξίσωση είναι η (3.8). Σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους κατασκευάζεται το προφίλ της υπερβολής, το οποίο περιστρεφόμενο κατασκευάζει τον τροχό. Αφαιρώντας τη λογική τομή του τροχού και του εργαλείου, προκύπτει η τροχισμένη επιφάνεια ελευθερίας του υπερβολοειδούς εργαλείου. Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τη δεύτερη αυλάκωση του εργαλείου.



Σχήμα 3.8 Διαδικασία τροχίσματος υπερβολοειδούς κορυφής

$$x_o^* = \sqrt{\alpha^2 + \frac{\alpha^2}{c^2} d^2 - s^2} \quad (3.5)$$

$$y_o^* = -s \quad (3.6)$$

$$z_o^* = d \quad (3.7)$$

$$\frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\alpha^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3.8)$$

όπου:

- x_o^* : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (τομή των ασύμπτωτων της υπερβολής) στο άξονα x [mm]
- y_o^* : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (τομή των ασύμπτωτων της υπερβολής) στο άξονα y [mm]
- z_o^* : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (τομή των ασύμπτωτων της υπερβολής) στο άξονα z [mm]
- α, c : παράμετροι της υπερβολής
- d : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Z* [mm]
- s : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Y* [mm]

Οι παράμετροι της υπερβολής είναι δυνατόν να επιλεγούν από το χρήστη ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όσο οι παράμετροι α και c μειώνονται κρατώντας το λόγο τους σταθερό, τόσο η γεωμετρία που θα προκύπτει θα προσεγγίζει τον οριακό κώνο που σχηματίζεται από τις ασύμπτωτες της υπερβολής. Ένας άλλος περιορισμός των παραμέτρων που θα επιλεγούν είναι ότι η παράμετρος α πρέπει να επιλεγεί μικρότερη από την ακτίνα του εργαλείου ώστε να μπορέσει να τροχιστεί ολόκληρη η κορυφή μέχρι το κέντρο. Τέλος λόγω της γεωμετρίας του τροχού παρατηρείται πως το κέντρο του είναι σχεδόν συγγραμμικό με το κέντρο της κορυφής του εργαλείου και ως εκ τούτου η παράμετρος d μπορεί να αγνοηθεί χάριν απλοποίησης του μοντέλου.

3.4.4 Ανάπτυξη στερεών μοντέλων ελλειψοειδών εργαλείων διάτρησης

Το τρύχισμα της κορυφής ελλειψοειδών εργαλείων διάτρησης είναι αντίστοιχο με αυτό των υπερβολοειδών και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Οι συντεταγμένες που δίνουν το κέντρο του τροχού το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της έλλειψης, δίνονται από τις εξισώσεις (3.9), (3.10) και (3.11). Εφόσον βρεθεί το κέντρο του τροχού στη συνέχεια σχεδιάζεται η έλλειψη η οποία περιστρεφόμενη δίνει την επιφάνεια τροχίσματος που περιγράφεται από την εξίσωση (3.12).

Για να τροχιστεί η κάθε κόψη σε όλο το μήκος της θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $d \leq c$. Η γεωμετρία τροχίσματος της ελλειψοειδούς κορυφής είναι παρόμοια με την αντίστοιχη του κωνικού τροχίσματος αν ληφθεί υπόψη μια συγκεκριμένη θέση τροχίσματος.

$$x_o^* = \sqrt{\alpha^2 - \frac{\alpha^2}{c^2} d^2 - s^2} \quad (3.9)$$

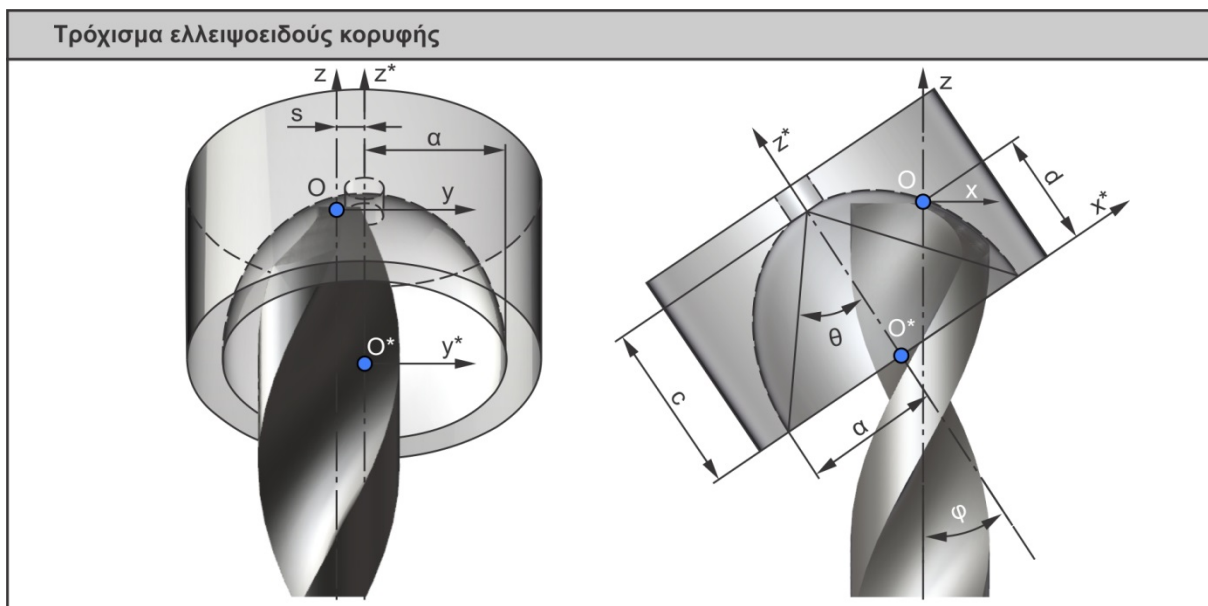
$$y_o^* = -s \quad (3.10)$$

$$z_o^* = d \quad (3.11)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3.12)$$

όπου:

- x_{o^*} : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (κέντρο της έλλειψης) στο άξονα x [mm]
- y_{o^*} : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (κέντρο της έλλειψης) στο άξονα y [mm]
- z_{o^*} : συντεταγμένη του κέντρου του εργαλείου τροχίσματος (κέντρο της έλλειψης) στο άξονα z [mm]
- a, c : παράμετροι της έλλειψης
- d : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Z* [mm]
- s : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Y* [mm]



Σχήμα 3.9 Διαδικασία τροχίσματος ελλειψοειδούς κορυφής

Αν η θέση επιλεγεί έτσι ώστε η εφαπτομένη της έλλειψης στο σημείο O να είναι παράλληλη με την ευθεία AB το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί. Η απλοποίηση αφορά τη συσχέτιση της κατασκευαστικής παραμέτρου d με τις παραμέτρους της έλλειψης a και c δίνοντας την εξίσωση (3.13).

$$d = \frac{c}{\sqrt{2}} = \frac{a}{\sqrt{2} \tan \theta} \quad (3.13)$$

όπου:

- a, c : παράμετροι της έλλειψης
- θ : ημιγωνία του κώνου τροχίσματος [deg]

3.5 Προσεγγίσεις προσομοίωσης της διάτρησης

Για την προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία έχουν ακολουθηθεί δύο κατευθύνσεις από τους ερευνητές. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά τη μακροσκοπική μελέτη της κατεργασίας, η οποία περιλαμβάνει ολόκληρο το εργαλείο. Αυτή η κατεύθυνση έχει υιοθετηθεί από όλα τα σύγχρονα πακέτα προσομοίωσης κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία τα οποία προσφέρουν γρήγορη και εύκολη προεπεξεργασία μέσα

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

από βοηθητικούς οδηγούς (wizards). Ένα μειονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι χρειάζονται πολύ μεγάλα και πυκνά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για να προσομοιωθεί ολόκληρο το εργαλείο και το τεμάχιο. Για να δώσει μια τέτοια προσομοίωση καλά αποτελέσματα απαιτούνται τουλάχιστον δύο σειρές πεπερασμένων στοιχείων στο πάχος του απαραμόρφωτου αποβλήτου [99], συσχετίζοντας έτσι άμεσα το μέγεθος του μοντέλου με την πρόωση της κοπής. Έτσι, όσο μικρότερη είναι η πρόωση της κοπής, τόσο μικρότερο θα είναι το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλήτου και συνεπώς θα απαιτούνται ολόένα και μικρότερα σε μέγεθος πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον σε αυτά τα μοντέλα ο διαχωρισμός του υλικού γίνεται μέσω αλγορίθμων προσαρμοστικής αναδιακριτοποίησης οι οποίοι δίνουν καλά αποτελέσματα αναφορικά με τη μορφή του αποβλήτου αλλά κοστίζουν επιπλέον σε χρόνο επίλυσης.

Η δεύτερη προσέγγιση αφορά τη διάσπαση του μακροσκοπικού μοντέλου σε πολλά μικρότερα. Η προσέγγιση αυτή εστιάζεται αποκλειστικά στην περιοχή της κοπής, δίνοντας έτσι το πλεονέκτημα της δημιουργίας πολλών μικρών και ευέλικτων μοντέλων τα οποία επιλύονται σε πολύ μικρότερο χρόνο από τα αντίστοιχα μακροσκοπικά. Η μέθοδος αυτή όμως χρειάζεται περισσότερο χρόνο στη φάση της προεπεξεργασίας, χρόνος ο οποίος όμως ελαχιστοποιείται με τη χρήση του προγράμματος που προτείνεται με την παρούσα εργασία.

Λόγω της κινηματικής της κατεργασίας στην περιοχή της κοπής, για να προσομοιωθεί το μακροσκοπικό μοντέλο απαιτείται μια σειρά μοντέλων λοξής κοπής και μια σειρά μοντέλων ορθογωνικής. Τα μοντέλα της λοξής κοπής αφορούν την προσομοίωση της κοπής που λαμβάνει χώρα στις κύριες κόψεις του εργαλείου, ενώ τα ορθογωνικά μοντέλα αφορούν την εγκάρσια κόψη. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η ανάλυση που παρουσιάζεται στη συνέχεια υποθέτει πλήρως συμμετρικό μοντέλο και αφορά μισό εργαλείο, δηλαδή μια από τις δύο κύριες κόψεις και τη μισή εγκάρσια. Ο μετασχηματισμός του μακροσκοπικού μοντέλου περιγράφεται λεπτομερώς στη συνέχεια.

3.5.1 Προσέγγιση της κοπής στις κύριες κόψεις με διαδοχικές λοξές κοπές

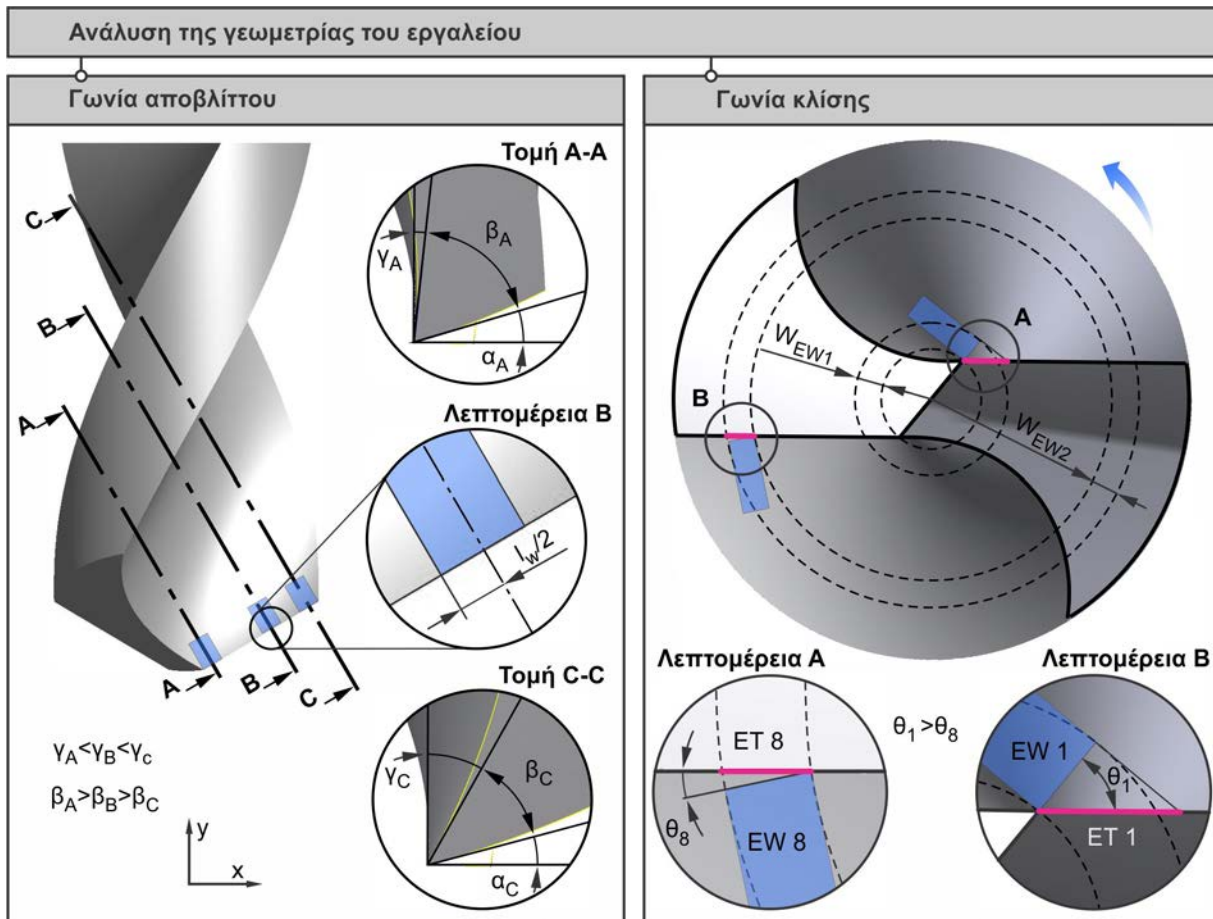
Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού στις κύριες κόψεις του εργαλείου περιγράφεται από το μοντέλο της λοξής κοπής, λόγω του ότι σε κάθε στοιχειώδες κοπτικό εργαλείο η ροή του υλικού γίνεται υπό γωνία. Μάλιστα η γωνία αυτή μεταβάλλεται από το κέντρο του εργαλείου προς την περιφέρεια. Για την ανάπτυξη των στοιχειωδών μοντέλων απαιτείται μια σειρά από δεδομένα τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση της γεωμετρίας του εργαλείου.

Η πρώτη ομάδα δεδομένων αφορά τη μοντελοποίηση του τεμαχίου. Για να κατασκευαστεί το τεμάχιο απαιτούνται οι τρεις βασικές του διαστάσεις: μήκος, πλάτος και ύψος. Το μήκος του τεμαχίου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να εισχωρήσει στο τεμάχιο ολόκληρη η κοπτική σφήνα, εξαλείφοντας έτσι τη μεταβατική περιοχή και επικεντρώνοντας στην περιοχή πλήρους κοπής. Το ύψος του τεμαχίου επιλέγεται ώστε να είναι τουλάχιστον τρεις φορές το βάθος κοπής ώστε να αποφεύγονται λανθασμένες συγκεντρώσεις τάσεων. Το πλάτος του τεμαχίου έχει επίσης ιδιαίτερη σημασία. Στο συγκεκριμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε το πλάτος του τεμαχίου μετρούμενο κάθετα στον άξονα του εργαλείου επιλέχθηκε να είναι ίσο με 0,5mm. Η επιλογή αυτή στηρίχθηκε στην πειραματική διαδικασία, όπου στα διαδοχικά πειράματα που εκτελέστηκαν, η ακτίνα των εργαλείων αυξάνονταν ανά 0,5mm. Το τελικό πλάτος του τεμαχίου της λοξής κοπής προκύπτει ως $w_{wo}=0,5/\cos(90-\rho)$.

Η δεύτερη ομάδα των δεδομένων αφορά τη μοντελοποίηση της κοπτικής σφήνας. Οι βασικές διαστάσεις της σφήνας είναι το μήκος, το πλάτος, το ύψος, η γωνία αποβλήτου και η γωνία ελευθερίας. Το ύψος της σφήνας πρέπει να επιλέγεται μεγαλύτερο από το μήκος της επαφής αποβλήτου-σφήνας, ενώ το μήκος πρέπει να είναι μικρό ώστε να αποφεύγονται περιττά πεπερασμένα στοιχεία που αυξάνουν το μέγεθος του μοντέλου. Το πλάτος του εργαλείου αλλάζει ανάλογα με τη γωνία κλίσης και πρέπει να είναι αρκετό για να κόψει όλο το σταθερό στοιχειώδες τεμάχιο. Έτσι, το πλάτος του εργαλείου προκύπτει ως $w_{to}=w_{wo}/\cos\lambda_i$, ενώ ισχύει

ότι το άθροισμα του πλάτους όλους των στοιχειωδών εργαλείων ισούται με το μήκος της κύριας κόψης.

Η διαδικασία προσδιορισμού της γωνίας αποβλίπτου και της γωνίας ελευθερίας παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος του Σχήματος 3.10. Αρχικά η κύρια κόψη χωρίζεται ισομερώς σε 10 τμήματα και γίνονται 10 τομές στο μέσο αυτών των τμημάτων. Στη συνέχεια γίνεται η μέτρηση των γωνιών αποβλίπτου και ελευθερίας κάθετα στο επίπεδο των τομών. Η διαδικασία αυτή διεξάγεται γρήγορα μέσω της παραμετροποίησης των επιπέδων τομών του μοντέλου.



Σχήμα 3.10 Υπολογισμών των δεδομένων μετασχηματισμού του μακροσκοπικού μοντέλου

Για τον υπολογισμό της γωνίας κλίσης του εργαλείου η επεξεργασία γίνεται στο επίπεδο x-y όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του παραπάνω σχήματος. Αρχικά υπολογίζεται η γωνία θ_i για κάθε στοιχειώδες εργαλείο. Η γωνία αυτή σχηματίζεται μεταξύ της παράλληλης στην κύρια κόψη με αρχή το κέντρο του τρυπανιού και της ευθείας με αρχή το κέντρο του τρυπανιού και τέλος την αριστερή άκρη του κάθε στοιχειώδους εργαλείου. Η γωνία αυτή αποτελεί ουσιαστικά την προβολή της γωνίας κλίσης λ_i στο επίπεδο x-y. Η γωνία κλίσης υπολογίζεται με την αναγωγή των γωνιών θ_i στην κόψη, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία κορυφής και σύμφωνα με την εξίσωση (3.14) [100].

$$\sin \lambda_i = \sin \theta_i \sin p \tag{3.14}$$

όπου:

λ_i : γωνία κλίσης του στοιχειώδους εργαλείου i σε σχέση με το τεμάχιο [deg]

- θ_i : προβολή της γωνίας κλίσης του στοιχειώδους εργαλείου i στο επίπεδο $x-y$ [deg]
 ρ : ημιγωνία κορυφής [deg]

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί πως η γωνία κορυφής ρ είναι σταθερή μόνο για τα στοιχειώδη εργαλεία των τρυπανιών με κωνική κορυφή. Στις γεωμετρίες τρυπανιών όπου οι κόψεις δεν είναι ευθείες, πρέπει να γίνει μια επιπλέον γεωμετρική ανάλυση όπου θα μελετάται η σχετική θέση του κάθε στοιχειώδους εργαλείου στις κόψεις του τρυπανιού. Οι γωνίες ρ_i σχηματίζονται μεταξύ της εφαπτόμενης στο κέντρο του κάθε στοιχειώδους εργαλείου και του άξονα του τρυπανιού.

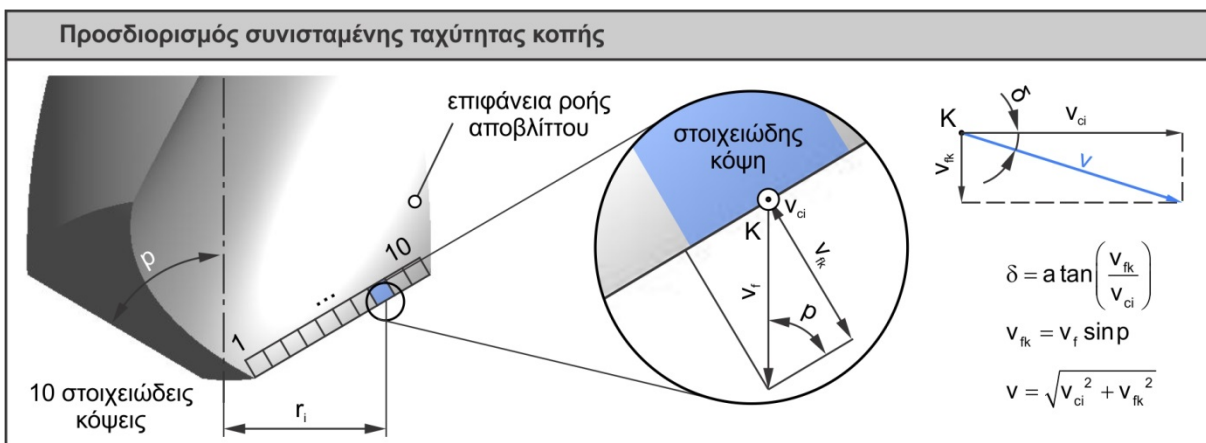
Ο υπολογισμός του μέτρου και της διεύθυνσης της ταχύτητας κοπής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11. Ο προσδιορισμός της ταχύτητας κοπής για κάθε στοιχειώδες εργαλείο γίνεται με τη βοήθεια δύο συνιστωσών, της v_{ci} και της v_{fk} . Η συνιστώσα v_{fk} προκύπτει άμεσα από την ταχύτητα της πρόωσης και είναι σταθερή για όλα τα στοιχειώδη εργαλεία, ενώ η συνιστώσα v_{ci} μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση του στοιχειώδους εργαλείου από τον άξονα περιστροφής και προκύπτει από την εξίσωση (3.15).

$$v_{ci} = 2 \frac{v_c r_i}{D} \quad (3.15)$$

όπου

- v_{ci} : ταχύτητα κοπής του στοιχειώδους εργαλείου i [m/sec]
 v_c : ταχύτητα κοπής της διάτρησης [m/sec]
 r_i : κάθετη απόσταση του στοιχειώδους εργαλείου i από τον άξονα του εργαλείου [m]
 D : διάμετρος του εργαλείου [m]

Το τελικό μέτρο της ταχύτητας κοπής προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των δύο συνιστωσών της. Πρέπει να επισημανθεί ότι η συνιστώσα v_{fk} είναι κατά πολύ μικρότερη της v_{ci} και ως εκ τούτου έχει μικρή επίδραση, τόσο στο συνολικό μέτρο της ταχύτητας, όσο και στη διεύθυνσή της.



Σχήμα 3.11 Υπολογισμός του μέτρου και της διεύθυνσης της ταχύτητας κοπής

Ο υπολογισμός της διεύθυνσης της ταχύτητας κοπής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διόρθωση της τοποθέτησης της κοπτικής σφήνας. Ο υπολογισμός των γωνιών αποβλίπτου και ελευθερίας έγινε κάθετα στο επίπεδο τομής. Όμως το τρυπάνι δεν αφαιρεί υλικό μόνο λόγω της περιστροφικής του κίνησης αλλά και λόγω της μεταφορικής. Έτσι, η πραγματική γωνία αποβλίπτου της σφήνας μεγαλώνει, και ταυτόχρονα μικραίνει ισόποσα η γωνία

ελευθερίας χωρίς να αλλάζει η γεωμετρία του εργαλείου, αλλά μόνο η σχετική του τοποθέτηση ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για να μοντελοποιηθεί αυτή η συμπεριφορά στο πρόβλημα της λοξής κοπής, η σφήνα περιστρέφεται κατά γωνία δ (εξίσωση (3.16)) γύρω από τον εγκάρσιο άξονά της.

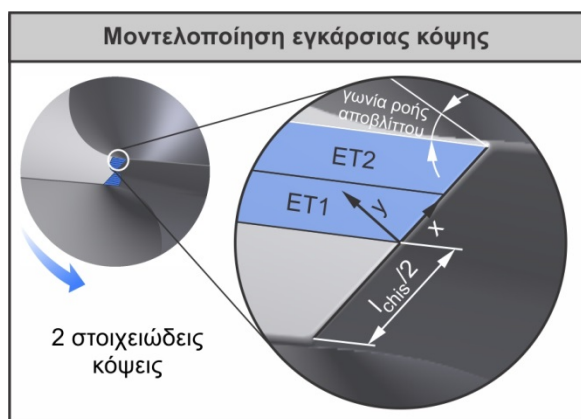
$$\delta = a \tan\left(\frac{v_f \sin \rho}{v_{ci}}\right) \quad (3.16)$$

όπου:

- δ : γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής [deg]
- v_{ci} : ταχύτητα κοπής του στοιχειώδους εργαλείου i [m/sec]
- v_f : ταχύτητα της πρόωσης [m/sec]
- ρ : ημιγωνία κορυφής [deg]

Η γωνία διόρθωσης της σχετικής τοποθέτησης της σφήνας έχει ελάχιστη συμβολή στα στοιχειώδη εργαλεία που βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια του εργαλείου ενώ η συμβολή της αυξάνεται στα στοιχειώδη εργαλεία που βρίσκονται κοντά στον άξονα του εργαλείου λόγω του ότι στις θέσεις αυτές η συνιστώσα v_{ci} είναι συγκρίσιμη με την v_{fk} .

3.5.2 Προσέγγιση της κοπής στην εγκάρσια κόψη με διαδοχικές ορθογωνικές κοπές



Για την προσέγγιση της κοπής στην εγκάρσια κόψη ισχύουν αντίστοιχες διαδικασίες με αυτές που ακολουθήθηκαν για τη μοντελοποίηση της κύριας κόπης. Η βασική διαφορά είναι πως τα στοιχειώδη εργαλεία της εγκάρσιας κόπης βρίσκονται πάνω στη ευθεία με αρχή το κέντρο του εργαλείου και τέλος το αριστερό μέρος του κάθε στοιχειώδους εργαλείου. Ως εκ τούτου η γωνία κλίσης είναι μηδενική και έτσι η κοπή στην περιοχή της εγκάρσιας κόπης προσεγγίζεται με δισδιάστατη ορθογωνική κοπή.

Σχήμα 3.12 Προσέγγιση της κοπής στην εγκάρσια κόψη με ορθογωνικές κοπές

Για την προσομοίωση της αφαίρεσης υλικού η μισή εγκάρσια κόψη χωρίστηκε σε δύο στοιχειώδη εργαλεία, όπως φαίνεται στο

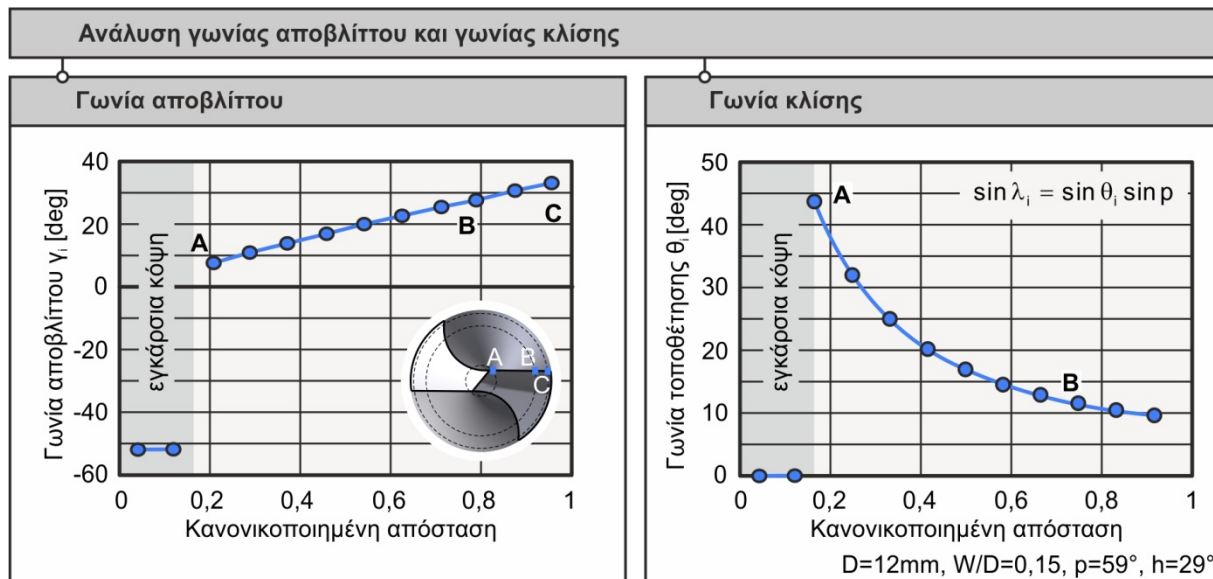
Σχήμα 3.12. Η γωνία αποβλίπτου της εγκάρσιας κόπης είναι έντονα αρνητική, ενώ η ταχύτητα κοπής v_{ci} κοντά στο κέντρο του εργαλείου πλησιάζει στο μηδέν. Υπό αυτές τις συνθήκες ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού είναι αρκετά περίπλοκος. Τα στοιχειώδη εργαλεία που βρίσκονται κοντά στο κέντρο διεισδύουν στο υλικό και το εξωθούν παραμορφώνοντάς το στις κύριες κόψεις όπου και αφαιρείται [101].

3.5.3 Ανάλυση της γεωμετρίας του εργαλείου

Για να προσδιοριστούν τα μεγέθη που απαιτούνται για το μετασχηματισμό του μοντέλου απαιτείται μια λεπτομερής γεωμετρική ανάλυση. Η ανάλυση που παρουσιάζεται στη συνέχεια αφορά κωνικό εργαλείο διάτρησης BOSCH κατά DIN338. Οι μετρήσεις έγιναν παραμετρικά με τη βοήθεια του λογισμικού Autodesk Inventor και παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.13](#).

Επειδή το εργαλείο έχει κωνική κορυφή, όλα τα στοιχειώδη εργαλεία που βρίσκονται στις ευθείες κόψεις βρίσκονται στην ίδια γωνία κορυφής η οποία ισούται με 59° . Ως εκ τούτου η γεωμετρική ανάλυση περιορίζεται στον προσδιορισμό της γωνίας αποβλίπτου, της γωνίας

ελευθερίας και της γωνίας κλίσης για κάθε στοιχειώδες εργαλείο. Η γωνία ελευθερίας μετρήθηκε με ακρίβεια αλλά δεν παρουσιάζεται σε διάγραμμα λόγω του ότι βρέθηκε περίπου σταθερή. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές της μεταβάλλονται ελάχιστα από $16,7^\circ$ για το πρώτο στοιχειώδες εργαλείο (σημείο A) μέχρι $14,7^\circ$ για το τελευταίο (σημείο C). Συνολικά παρατηρείται μια μικρή μείωση της γωνίας ελευθερίας κινούμενοι από το κέντρο του τρυπανιού προς την περιφέρειά του.



Σχήμα 3.13 Αποτελέσματα ανάλυσης της γεωμετρίας του εργαλείου

Ο υπολογισμός της γωνίας αποβλίττου για τα δέκα στοιχειώδη εργαλεία της κύριας κόψης και τα δύο της εγκάρσιας παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.13. Ο άξονας x αναπαριστά την κανονικοποιημένη απόσταση η οποία προκύπτει από τη διαίρεση της απόστασης κάθε στοιχειώδους εργαλείου από τον άξονα του τρυπανιού, προς την ακτίνα του. Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται μια αύξηση της γωνίας αποβλίττου από $7,5^\circ$ σε απόσταση 0,256 από το κέντρο του εργαλείου σε $32,6^\circ$ σε απόσταση 0,972 κοντά στην περιφέρειά του. Στην εγκάρσια κόψη η γωνία ελευθερίας είναι $35,6^\circ$ ενώ η γωνία αποβλίττου είναι έντονα αρνητική και ισούται με $-52,1^\circ$.

Αναφορικά με τον υπολογισμό της γωνίας κλίσης παρατηρείται μια μη γραμμική συμπεριφορά όπως παρουσιάζεται στο δεξί διάγραμμα του σχήματος 3.13. Το διάγραμμα παρουσιάζει τη μέτρηση της προβολής της γωνίας κλίσης στο επίπεδο x-y, ενώ ο τελικός υπολογισμός της βασίζεται στην εξίσωση (3.14). Η γωνία κλίσης της εγκάρσιας κόψης είναι μηδενική ενώ ξαφνικά λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της για το πρώτο στοιχειώδες εργαλείο. Για την κύρια κόψη η τιμή αυτή μετρήθηκε $48,6^\circ$ σε απόσταση 0,175 από το κέντρο του εργαλείου ενώ η ελάχιστη μετρήθηκε $9,96^\circ$ σε απόσταση 0,925.

3.6 Διαδικασία προσομοίωσης της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία

Αφού ολοκληρωθεί ο μετασχηματισμός του μακροσκοπικού μοντέλου λαμβάνει χώρα η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία των προβλημάτων λοξής και ορθογωνικής κοπής. Για την αυτόματη μοντελοποίηση όλων των προβλημάτων, τα δεδομένα εισάγονται σε μια ειδική φόρμα υπολογισμού από την οποία στη συνέχεια εξάγονται αυτόματα τα αρχεία επίλυσης για όλα τα στοιχειώδη μοντέλα.

Το Σχήμα 3.14 παρουσιάζει τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Τα δεδομένα αυτά χωρίζονται σε γεωμετρικά δεδομένα, δεδομένα διακριτοποίησης, δεδομένα κατεργασίας και δεδομένα υλικών. Τα γεωμετρικά δεδομένα και

τα δεδομένα της κατεργασίας προκύπτουν από την ανάλυση της στερεής γεωμετρίας του εργαλείου που περιγράφηκε προηγουμένως. Τα δεδομένα διακριτοποίησης του τεμαχίου και του εργαλείου εξαρτώνται από τη μέθοδο διακριτοποίησης που θα επιλεγεί από τον χρήστη και περιγράφονται με λεπτομέρεια στη συνέχεια. Τέλος για τα δεδομένα των υλικών έχει αναπτυχθεί ένα σύστημα διαχείρισής τους ώστε να μη χρειάζεται ο χρήστης να εισάγει δεδομένα σε κάθε προσομοίωση παρά μόνο να επιλέγει το μοντέλο υλικού και το αντίστοιχο υλικό που επιθυμεί.

Δεδομένα εισόδου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	
Γεωμετρικά δεδομένα l_w : μήκος τεμαχίου [mm] w_w : πλάτος τεμαχίου [mm] h_w : ύψος τεμαχίου [mm] l_t : μήκος εργαλείου [mm] w_t : πλάτος εργαλείου [mm] h_t : ύψος εργαλείου [mm] α : γωνία ελευθερίας [deg] γ : γωνία αποβλήτου [deg] r : ακτίνα καμπυλότητας [mm]	Δεδομένα διακριτοποίησης m_x : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα x m_y : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα y m_z : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα z m_{tw} : διακριτοποίηση πλάτους εργαλείου m_{rd} : αριθμός επαναλήψεων πύκνωσης του πλέγματος m_{cpe} : αριθμός στοιχείων πάνω από το επίπεδο κοπής m_{hr} : ύψος πύκνωσης της διακριτοποίησης m_{tmm} : επιλογή μεθόδου διακριτοποίησης του εργαλείου m_{wmm} : επιλογή μεθόδου διακριτοποίησης του τεμαχίου
Δεδομένα κατεργασίας a_p : βάθος κοπής [mm] λ : γωνία κλίσης [deg] v_c : ταχύτητα κοπής [m/min] v_f : ταχύτητα πρόωσης [m/min]	Δεδομένα υλικών mat_{mt} : επιλογή μοντέλου υλικού του εργαλείου mat_{mw} : επιλογή μοντέλου υλικού του τεμαχίου mat_{id} : αριθμός υλικού εργαλείου στη βάση δεδομένων mat_{wid} : αριθμός υλικού τεμαχίου στη βάση δεδομένων

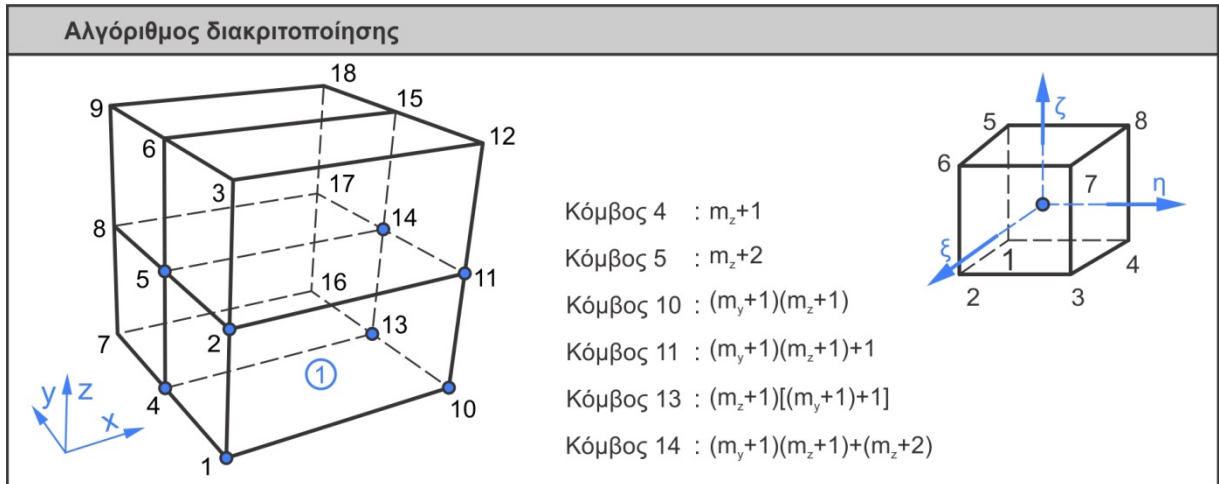
Σχήμα 3.14 Βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

3.6.1 Διακριτοποίηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου

Για τη μοντελοποίηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος διακριτοποίησης με ορθογώνια εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία με οκτώ κόμβους και ένα σημείο ολοκλήρωσης. Τα συγκεκριμένα στοιχεία επιλέχθηκαν για τη διακριτοποίηση του τεμαχίου λόγω της καλής ακρίβειας υπολογισμού σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, με την επιλογή ενός σημείου ολοκλήρωσης, το μητρώο των παραμορφώσεων υπολογίζεται 25 φορές πιο γρήγορα σε σχέση με την ολοκλήρωση 8 σημείων. Επίσης ο χρόνος υπολογισμού των δυνάμεων και ο χρόνος υπολογισμού των τάσεων μειώνεται κατά 16 και 8 φορές αντίστοιχα [102].

Η διαδικασία διακριτοποίησης περιγράφεται στο [Σχήμα 3.15](#). Η διακριτοποίηση του τεμαχίου που παρουσιάζεται αποτελείται από μια σειρά στοιχείων στη διεύθυνση x, δύο σειρές στη διεύθυνση y και δύο σειρές στη διεύθυνση z. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται επίσης ο αριθμός του κάθε κόμβου του πεπερασμένου στοιχείου νούμερο ένα, συναρτήσει των παραμέτρων διακριτοποίησης ενώ επίσης φαίνεται και η σειρά αρίθμησης του πλέγματος η οποία γίνεται πρώτα στον άξονα z, μετά στον άξονα y και τέλος στον άξονα x.

Ο αλγόριθμος διακριτοποίησης που αναπτύχθηκε βασίζεται στον προσδιορισμό κάθε φορά του αρχικού κόμβου αναφοράς για κάθε πεπερασμένο στοιχείο, ενώ οι αριθμοί των υπολοίπων κόμβων υπολογίζονται βάσει αυτού με τη βοήθεια των τύπων του σχήματος 3.15.



Σχήμα 3.15 Διακριτοποίηση τεμαχίου με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Η εξίσωση προσδιορισμού του κόμβου αναφοράς είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \text{init} &= (i-1)(m_z + m_{\text{cpe}} + 1)(n_y + 1) + (j-1)(m_z + m_{\text{cpe}} + 1) + k \\ &\text{για } i=1:m_x, j=1:m_y \text{ και } k=1:m_z + m_{\text{cpe}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

όπου

- m_x : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα x
- m_y : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα y
- m_z : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα z
- m_{cpe} : διακριτοποίηση τεμαχίου πάνω από το επίπεδο κοπής κατά τον άξονα z

Για τον τελικό προσδιορισμό του μητρώου πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σειρά αρίθμησης του επιλύτη. Για την περίπτωση του επιλύτη LS-DYNA το μητρώο αυτό προκύπτει ως εξής:

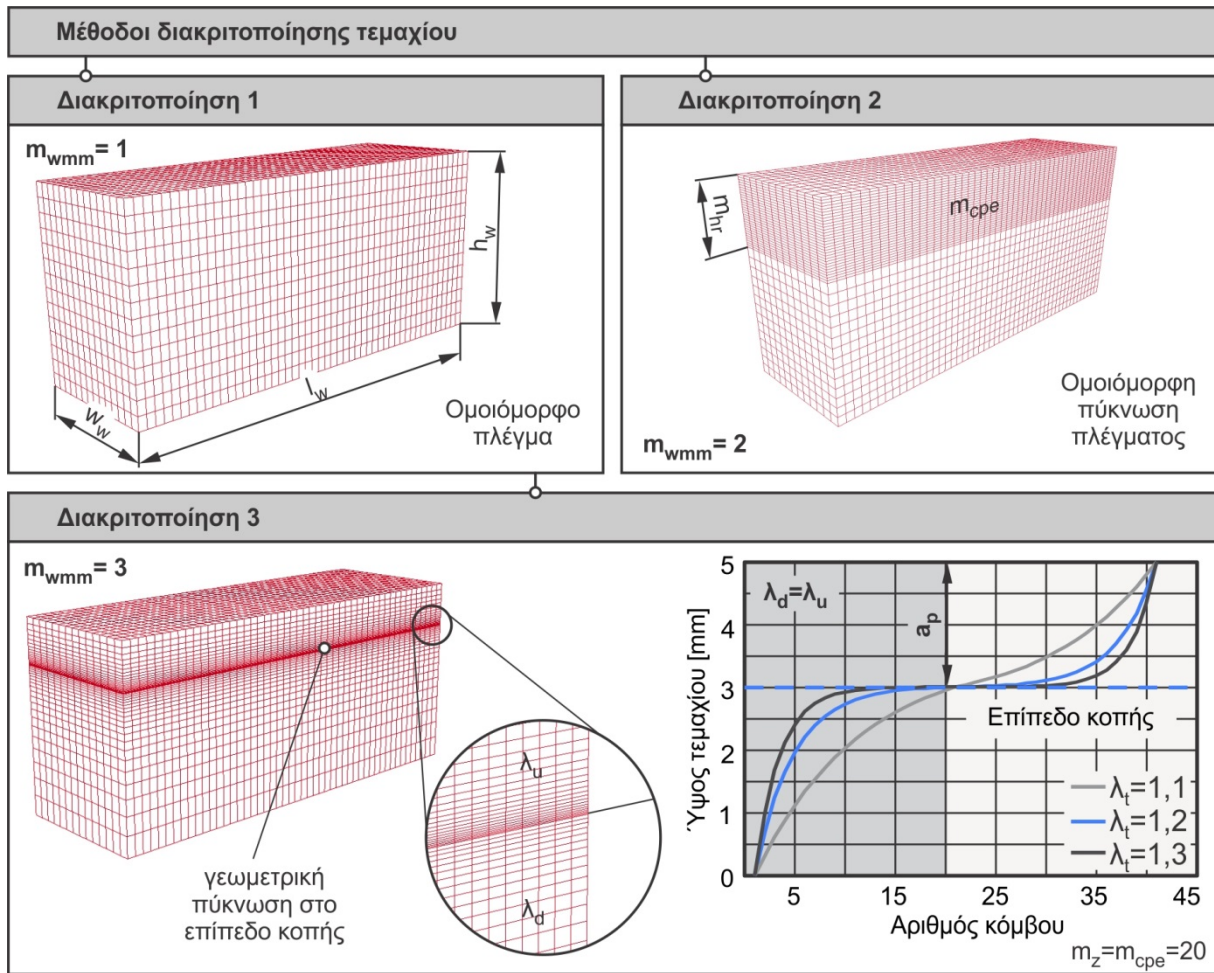
$$\begin{bmatrix} l_{1n} \\ l_{2n} \\ l_{3n} \\ l_{4n} \\ l_{5n} \\ l_{6n} \\ l_{7n} \\ l_{8n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{init} \\ \text{init} + (m_y + 1)(m_z + m_{\text{cpe}} + 1) \\ \text{init} + (m_z + m_{\text{cpe}} + 1)[(m_y + 1) + 1] \\ \text{init} + (m_z + m_{\text{cpe}} + 1) \\ \text{init} + 1 \\ \text{init} + (m_y + 1)(m_z + m_{\text{cpe}} + 1) + 1 \\ \text{init} + (m_y + 1)(m_z + m_{\text{cpe}} + 1) + (m_z + m_{\text{cpe}} + 2) \\ \text{init} + (m_z + m_{\text{cpe}} + 2) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

για $n=1:m_x m_y(m_{\text{cpe}}+m_z)$

όπου $l_{1n}, l_{2n}, l_{3n}, l_{4n}, l_{5n}, l_{6n}, l_{7n}, l_{8n}$ είναι οι συνδέσεις των κόμβων για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και n ο συνολικός αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων του τεμαχίου.

Το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε υποστηρίζει τρεις διαφορετικές μεθόδους διακριτοποίησης της γεωμετρίας του τεμαχίου. Το μητρώο της εξίσωσης (3.18) αναφέρεται στη δεύτερη μέθοδο διακριτοποίησης η οποία είναι και αυτή που επιλέχθηκε για τη

μοντελοποίηση των προβλημάτων λοξής κοπής. Οι τρεις διαθέσιμες μέθοδοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16 Μέθοδοι διακριτοποίησης τεμαχίου με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος 1 είναι η απλούστερη μέθοδος διακριτοποίησης με ομοιόμορφο πλέγμα και ενδείκνυται μόνο σε περιπτώσεις πολύ περιορισμένης επεξεργαστικής ισχύος. Οι μέθοδοι 2 και 3 που περιγράφονται στο σχήμα 3.16 δημιουργούν πύκνωση του πλέγματος στη διεύθυνση z ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τόσο της κοπής, όσο και της μορφοποίησης αποβλίττου.

Η δεύτερη διακριτοποίηση δημιουργείται από ομοιόμορφη πύκνωση του πλέγματος πάνω από ένα επίπεδο το οποίο ορίζει ο χρήστης και το οποίο βρίσκεται κάτω από το επίπεδο κοπής. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει την πυκνότητα του πλέγματος, τόσο στο επίπεδο κοπής, όσο και πάνω από αυτό, ώστε η μορφοποίηση του αποβλίττου να είναι πιο ακριβής.

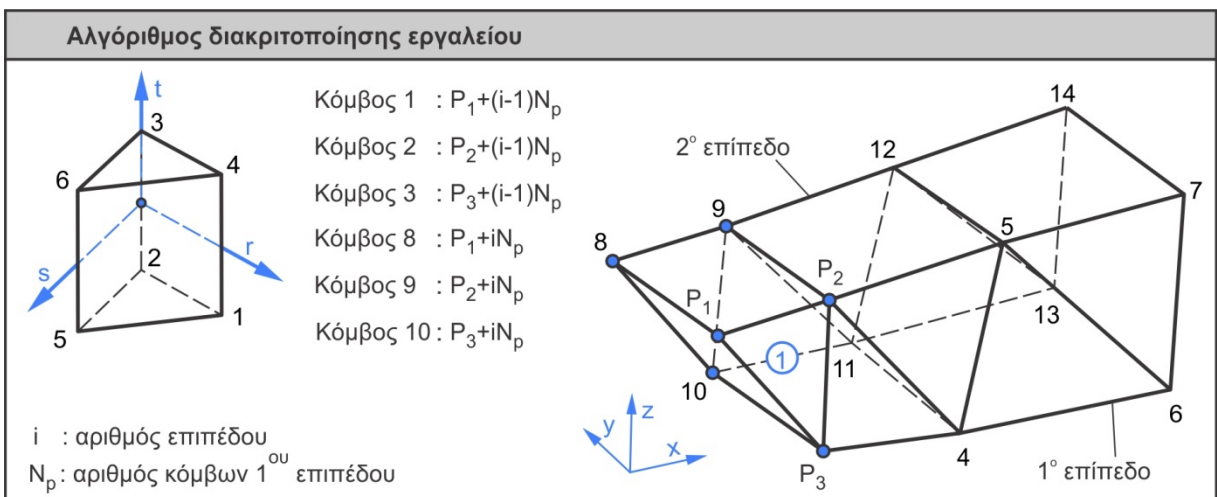
Η τρίτη μέθοδος διακριτοποίησης αφορά πύκνωση του πλέγματος στο επίπεδο κοπής. Η πύκνωση ακολουθεί γεωμετρική πρόοδο με διαφορετικούς συντελεστές λ_u και λ_d για τη διακριτοποίηση πάνω και κάτω από το επίπεδο κοπής αντίστοιχα, οι οποίοι καθορίζονται από το χρήστη. Το διάγραμμα στο σχήμα 3.16 αφορά πλέγμα ύψους 5mm στο οποίο το επίπεδο κοπής είναι στα 3mm και φαίνεται η επίδραση των διαφορετικών συντελεστών λ στην τελική διακριτοποίηση. Παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής λ , τόσο η πύκνωση μεταφέρεται κοντά στο επίπεδο κοπής, ενώ για μικρότερους συντελεστές η πύκνωση ομαλοποιείται. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου διακριτοποίησης είναι πως

μπορεί με πολύ λίγα στοιχεία να επικεντρωθεί κατευθείαν στην περιοχή κοπής, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια και μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού.

Για τη μοντελοποίηση του τεμαχίου σε δύο διαστάσεις για ορθογωνική κοπή ακολουθούνται αντίστοιχα βήματα με τα παραπάνω αφαιρώντας τις σχετικές με τη διάσταση y παραμέτρους.

3.6.2 Διακριτοποίηση του στοιχειώδους κοπτικού εργαλείου - ΣΚΕ

Για τη μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου αναπτύχθηκαν δύο αλγόριθμοι διακριτοποίησης της γεωμετρίας με τετραεδρικά και πενταεδρικά πεπερασμένα στοιχεία, βασισμένοι στην τριγωνοποίηση Delaunay. Για διακριτοποίηση με πεντάεδρα ο αλγόριθμος διακριτοποιεί το δισδιάστατο προφίλ του εργαλείου και στη συνέχεια αυτό προεκτείνεται κατά τον άξονα y για αριθμό επιπέδων ίσο με i , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Στο σχήμα επίσης φαίνεται ο προσανατολισμός του πεντάεδρου και η σχέση των κόμβων του πρώτου πεπερασμένου στοιχείου με τις παραμέτρους διακριτοποίησης.



Σχήμα 3.17 Διακριτοποίηση κοπτικού εργαλείου με πενταεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη για κάθε στοιχείο της δισδιάστατης διακριτοποίησης, τις θέσεις των αντίστοιχων κόμβων στο επόμενο επίπεδο για να κατασκευάσει το μητρώο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τον τελικό προσδιορισμό του μητρώου, λαμβάνεται υπόψη η σχετική φορά αρίθμησης του επιλύτη και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3.20). Για την περίπτωση διακριτοποίησης με τετράεδρα, το μητρώο του επιλύτη ορίζεται σύμφωνα με τη εξίσωση (3.19), όπου $t(n,1)$, $t(n,2)$, $t(n,3)$ και $t(n,4)$ τα μητρώα που περιέχουν τους αριθμούς των κόμβων κάθε πεπερασμένου στοιχείου και τα οποία προκύπτουν από διακριτοποίηση Delaunay.

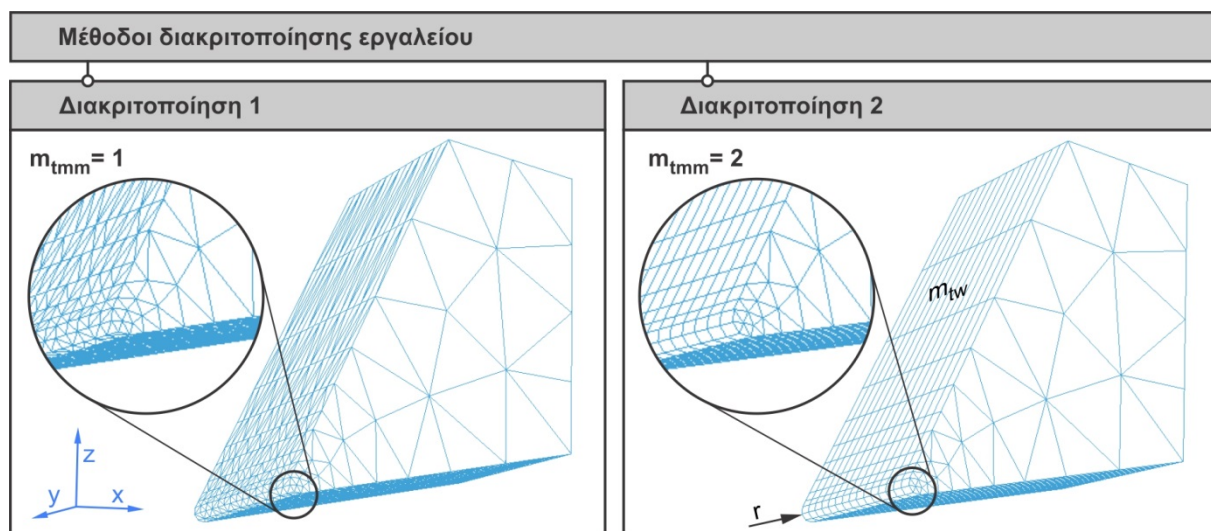
$$\begin{bmatrix} l_{1n} \\ l_{2n} \\ l_{3n} \\ l_{4n} \\ l_{5n} \\ l_{6n} \\ l_{7n} \\ l_{8n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t(n,1) \\ t(n,2) \\ t(n,3) \\ t(n,4) \\ t(n,4) \\ t(n,4) \\ t(n,4) \\ t(n,4) \end{bmatrix} \quad \text{για } n=1:N_{tot} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} l_{1n} \\ l_{2n} \\ l_{3n} \\ l_{4n} \\ l_{5n} \\ l_{6n} \\ l_{7n} \\ l_{8n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t(j,1) + (i-1)N_p \\ t(j,3) + (i-1)N_p \\ t(j,3) + iN_p \\ t(j,1) + iN_p \\ t(j,2) + (i-1)N_p \\ l_{5n} \\ t(j,2) + iN_p \\ l_{7n} \end{bmatrix} \quad \text{για } i=1:m_{tw}, j=1:N_p \quad (3.20)$$

όπου $l_{1n}, l_{2n}, l_{3n}, l_{4n}, l_{5n}, l_{6n}, l_{7n}, l_{8n}$ είναι οι συνδέσεις των κόμβων για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και:

- m_{tw} : διακριτοποίηση του πλάτους του εργαλείου κατά τον άξονα y
- N_p : συνολικός αριθμός κόμβων σε κάθε επίπεδο διακριτοποίησης
- N_{tot} : συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων
- $t(n,k)$: μητρώα αριθμών κόμβων

Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις διακριτοποίησης του κοπτικού, με τετράεδρα και πεντάεδρα. Ο αλγόριθμος υπολογισμού διαθέτει επίσης τη δυνατότητα πύκνωσης του πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η δυνατότητα αυτή αυξάνει την ακρίβεια των υπολογισμών. Η διακριτοποίηση με τετράεδρα προτιμάται έναντι της διακριτοποίησης με πεντάεδρα λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας υπολογισμών.



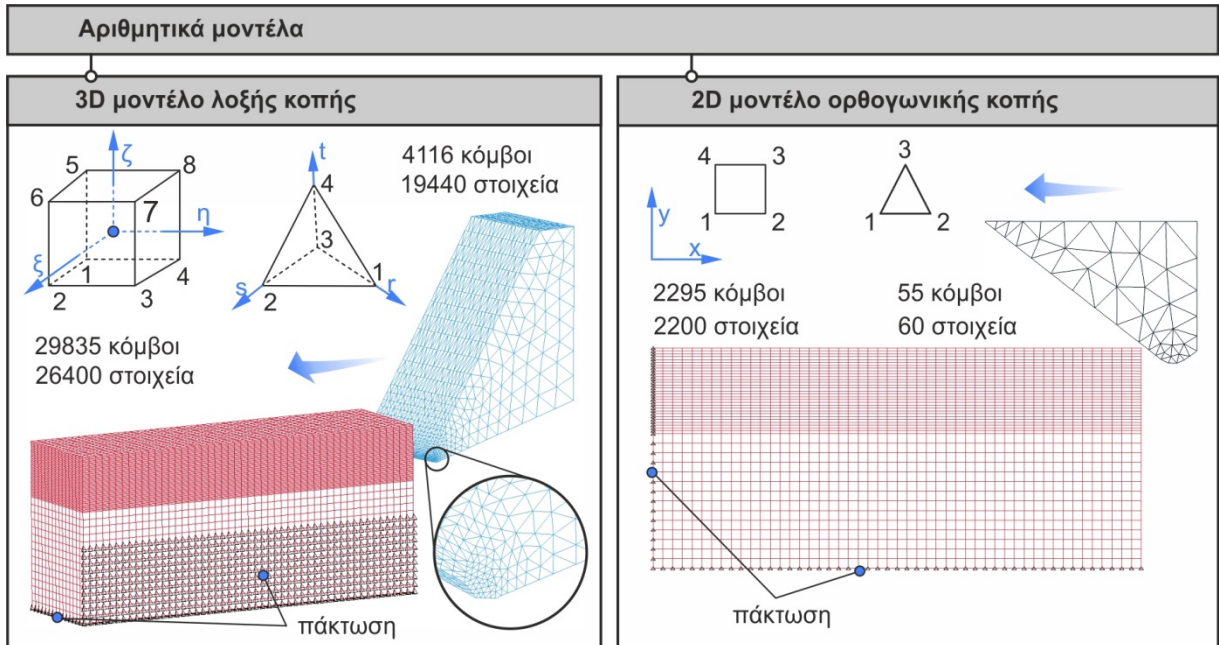
Σχήμα 3.18 Μέθοδοι διακριτοποίησης εργαλείου με τετράεδρα και πεντάεδρα

Το τετραεδρικό στοιχείο με τέσσερις κόμβους και ένα σημείο ολοκλήρωσης είναι απλό και υπολογιστικά γρήγορο ενώ δε χρειάζεται έλεγχο των ιδιομορφών μηδενικής ενέργειας εξοικονομώντας επιπλέον υπολογιστικό χρόνο. Το πενταεδρικό στοιχείο με έξι κόμβους διαθέτει δύο σημεία ολοκλήρωσης, είναι αξιόπιστο και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις μοντελοποίησης αξονοσυμμετρικών γεωμετριών.

3.6.3 Συνολικό αριθμητικό μοντέλο

Αφού ολοκληρωθεί η προηγούμενη προεπεξεργασία, τα μοντέλα του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου συναρμολογούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Για τη συναρμολόγηση του μοντέλου το τεμάχιο παραμένει σταθερό, με την αρχή των αξόνων να τοποθετείται στην κάτω αριστερή γωνία του.

Η τοποθέτηση του κοπτικού περιλαμβάνει πρώτα την περιστροφή του γύρω από τον άξονα y κατά γωνία ίση με τη γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής, ύστερα την περιστροφή του γύρω από τον άξονα z κατά γωνία ίση με τη γωνία κλίσης, τη μετατόπισή του στον άξονα x κατά l_w , στον άξονα y κατά w_w και στον άξονα z κατά $h_w - a_p$.



Σχήμα 3.19 Αριθμητικά μοντέλα λοξής και ορθογωνικής κοπής

Οι παραπάνω μετασχηματισμοί περιγράφονται από την εξίσωση (3.21), όπου T_t^T ο αναστροφος πίνακας των συντεταγμένων των κόμβων του εργαλείου.

$$T_{asm} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_t^T + \begin{bmatrix} l_w \\ w_w \\ h_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

όπου:

- T_{asm} : πίνακας μετασχηματισμού για την σχετική τοποθέτηση του εργαλείου
- δ : γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής [deg]
- λ : γωνία κλίσης του εργαλείου [deg]
- T_t : πίνακας των συντεταγμένων των κόμβων του εργαλείου
- l_w : μήκος τεμαχίου [mm]
- w_w : πλάτος τεμαχίου [mm]
- h_w : ύψος τεμαχίου [mm]

Για την περίπτωση της ορθογωνικής κοπής σε δύο διαστάσεις και με αρνητική γωνία αποβλίπτου, το κοπτικό πρώτα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα y κατά γωνία δ , στη συνέχεια μετατοπίζεται στον άξονα z κατά $h_w - a_p$ και τέλος μετατοπίζεται στον άξονα x κατά $l_w - d_x$. Η μεταβλητή d_x ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση από το αριστερό άκρο του εργαλείου μέχρι το σημείο επαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο, η οποία δίνεται από την εξίσωση (3.22).

$$d_x = (\max(P_{tz}) - a_p) \tan(\gamma - \delta) \quad (3.22)$$

όπου

- d_x : απόσταση εργαλείου από το τεμάχιο [mm]
- P_{tz} : μητρώο συντεταγμένων z των κόμβων εργαλείου

- a_p : βάθος κοπής [mm]
 γ : γωνία αποβλίπτου [deg]
 δ : γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής [deg]

Για την εξαγωγή των τελικών μοντέλων απαιτούνται κάποιες επιπλέον πληροφορίες, όπως παράμετροι ελέγχου του επιλύτη, των επαφών και της βάσης των αποτελεσμάτων, οι οποίες εισάγονται αυτόματα και περιγράφονται στη συνέχεια. Μια πολύ σημαντική παράμετρος στα προβλήματα προσομοίωσης της κοπής αποτελεί η μοντελοποίηση των επαφών. Στο σύστημα που αναπτύχθηκε έχουν εισαχθεί δύο τύποι επαφών: Η πρώτη επαφή είναι μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου και η άλλη είναι μεταξύ του αποβλίπτου που δημιουργείται και του τεμαχίου. Για να επιταχυνθεί ακόμα περισσότερο η επίλυση, η δεύτερη επαφή μπορεί να παραληφθεί καθώς δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Για την επαφή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου ορίζεται επαφή διάβρωσης. Σε αυτού του τύπου την επαφή τα πεπερασμένα στοιχεία που, είτε φτάνουν στο όριο αστοχίας τους, είτε παραμορφώνονται ισχυρά ώστε να σχηματίζονται αρνητικοί όγκοι, διαγράφονται. Αυτή η μέθοδος συμβάλει στη σύγκλιση του προβλήματος, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις χάνει σε ακρίβεια λόγω του ότι αφαιρείται μάζα και ενέργεια από το σύστημα. Λόγω αυτής της αφαίρεσης τα αποτελέσματα υποεκτιμώνται. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια, το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα διατήρησης της μάζας των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων που διαγράφονται, οι οποίοι εξακολουθούν να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς επαφής και στην επίλυση του προβλήματος.

Για τη μοντελοποίηση των επαφών χρησιμοποιείται η μέθοδος της ποινής. Στη μέθοδο αυτή γίνεται χρήση ελατηρίων τα οποία τοποθετούνται μεταξύ των κόμβων που εισχωρούν στην επιφάνεια και την ίδια την επιφάνεια επαφής. Σε κάθε αναζήτηση επαφής ελέγχονται όλοι οι κόμβοι του κοπτικού και όλοι οι κόμβοι του τεμαχίου για διείσδυση. Αν δεν υπάρχει διείσδυση κάποιου κόμβου ο αλγόριθμος συνεχίζει μέχρι την επόμενη αναζήτηση. Αν υπάρξει διείσδυση κάποιου κόμβου του κοπτικού εργαλείου τότε ασκείται σε αυτόν μια δύναμη επαφής με κατεύθυνση προς το σημείο επαφής. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της απόστασης διείσδυσης του κοπτικού και δίνεται από την εξίσωση (3.23). Όσο συχνότερη είναι η αναζήτηση επαφής και όσο στιβαρότερα είναι τα ελατήρια που χρησιμοποιούνται, τόσο η αλληλοεπικάλυψη των επιφανειών είναι μικρότερη και τα αποτελέσματα ακριβέστερα.

$$f_s = -k_i \eta_i \text{ για } l < 0, \text{ όπου } k_i = \frac{f_{si} K_i A_i^2}{V_i} \quad (3.23)$$

όπου:

- l : απόσταση διείσδυσης του δευτερεύοντα κόμβου στο πρωτεύον τμήμα [m]
 k_i : παράγοντας δυσκαμψίας πρωτεύοντος τμήματος
 η_i : κάθετο διάνυσμα στο σημείο επαφής στο πρωτεύον τμήμα
 f_{si} : παράγοντας δυσκαμψίας της διεπαφής
 K_i : μέτρο συμπίεσης [Pa]
 V_i : όγκος [m³]
 A_i : το εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχείου στο οποίο διεισδύει ο δευτερεύον κόμβος [m²]

Επίσης για να αποφευχθούν πιθανές ταλαντώσεις κάθετα στις επιφάνειες επαφής ορίζεται ένας λόγος απόσβεσης. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται ως ποσοστό του κρίσιμου λόγου απόσβεσης και δίνεται από την εξίσωση (3.24). Επιπλέον έχει βρεθεί ότι η χρήση απόσβεσης μειώνει το θόρυβο των υπολογιζόμενων δυνάμεων αντίδρασης.

$$\zeta_c = 2m_c\omega_n \quad \text{όπου} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k(m_{\text{slave}} + m_{\text{master}})}{m_{\text{slave}}m_{\text{master}}}}, \quad m_c = \min(m_{\text{slave}}, m_{\text{master}}) \quad (3.24)$$

όπου:

- ζ_c : κρίσιμος λόγος απόσβεσης
- m_c : η μάζα των κόμβων του τμήματος της επαφής [Kg]
- m_{master} : μάζα πρωτεύοντος τμήματος [Kg]
- m_{slave} : μάζα δευτερεύοντος τμήματος [Kg]
- ω_n : ιδιοσυχνότητα συστήματος [Hz]
- k : δυσκαμψία της διεπαφής [N/m]

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας στη μοντελοποίηση των επαφών είναι η τριβή. Για την μοντελοποίηση της τριβής στο LS-DYNA χρησιμοποιείται η διατύπωση Coulomb. Σύμφωνα με αυτήν η τριβή υπολογίζεται από την εξίσωση (3.25).

$$F_f = \mu F_n, \quad \text{για} \quad \mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v|}, \quad v = \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad (3.25)$$

όπου:

- F_f : δύναμη τριβής [N]
- F_n : δύναμη κάθετη στο επίπεδο επαφής [N]
- μ_d : συντελεστής τριβής ολίσθησης
- μ_s : συντελεστής στατικής τριβής
- v : σχετική ταχύτητα μεταξύ του δευτερεύοντα κόμβου και του κύριου τμήματος επαφής [m/sec]
- e : απόσταση που διανύει ο δευτερεύων κόμβος [m]
- Δt : χρονικό βήμα [sec]

Οι παράμετροι ελέγχου του μοντέλου περιλαμβάνουν τον έλεγχο των επαφών, της ενέργειας του συστήματος, των ιδιομορφών μηδενικής ενέργειας, του τερματισμού των υπολογισμών και του βήματος ολοκλήρωσης. Στον έλεγχο των επαφών ορίζονται μια σειρά από παράμετροι μεταξύ των οποίων και ο ορισμός γενικών τιμών στατικής και δυναμικής τριβής του συστήματος. Ο έλεγχος της ενέργειας του συστήματος είναι σημαντικός για την παρακολούθηση της επίλυσης. Οι ιδιομορφές μηδενικής ενέργειας παρουσιάζονται στα εξαεδρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους και ένα σημείο ολοκλήρωσης. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν οι διαγωνίως αντίθετοι κόμβοι έχουν ίδιες ταχύτητες. Αν γίνει αντικατάσταση αυτών των ταχυτήτων στην εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού παραμόρφωσης (3.26) τότε ο ρυθμός είναι μηδενικός και παρ' όλη την παραμόρφωση του στοιχείου οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι μηδενικές.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^8 \frac{\theta\phi_k}{\theta x_i} \dot{x}_j^k + \frac{\theta\phi_k}{\theta x_j} \dot{x}_i^k \right) = 0 \quad \text{για} \quad \dot{x}_i^1 = \dot{x}_i^7, \dot{x}_i^2 = \dot{x}_i^8, \dot{x}_i^3 = \dot{x}_i^5, \dot{x}_i^4 = \dot{x}_i^6 \quad (3.26)$$

όπου:

- $\dot{\epsilon}_{ij}$: ρυθμός παραμόρφωσης [sec^{-1}]
- ϕ_k : συναρτήσεις παρεμβολής
- k : αριθμός των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου
- \dot{x}_i^j : ταχύτητα του κόμβου j στη διεύθυνση i [m/sec]

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου των ιδιομορφών μηδενικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος σταθεροποίησης των Belytschko και Bindeman [103] με παράλληλη πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή της κοπής. Ο έλεγχος τερματισμού περιλαμβάνει την εισαγωγή του χρόνου επίλυσης, αλλά και μια σειρά άλλων παραμέτρων τερματισμού όπως το ελάχιστο χρονικό βήμα.

Ο υπολογισμός του βήματος ολοκλήρωσης είναι πολύ σημαντικός στις μεθόδους ενδογενούς καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης (explicit methods) λόγω της άμεσης επιρροής του στη σύγκλιση του αλγορίθμου. Για τον υπολογισμό του χρονικού βήματος λαμβάνεται υπόψη το μικρότερο χρονικό βήμα όλων των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την εξίσωση (3.27).

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \min(\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N) \quad (3.27)$$

όπου:

- Δt^{n+1} : χρονικό βήμα ολοκλήρωσης [sec]
- Δt_i : χρονικό βήμα ολοκλήρωσης πεπερασμένου στοιχείου i [sec]
- N : συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων
- α : παράγοντας ασφαλείας

Ο παράγοντας ασφαλείας επιλέγεται από το χρήστη ως παράγοντας ελέγχου του χρονικού βήματος και συνήθως ισούται με το 90% του ελάχιστου χρονικού βήματος. Για κάθε πεπερασμένο στοιχείο το χρονικό βήμα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3.28).

$$\Delta t_i = \frac{L_e}{c}, \text{ για } c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

όπου (3.28)

για εξαεδρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους $L_e = \frac{V}{A_{\max}}$

για τετραεδρικά με τέσσερις κόμβους $L_e = h_{\min}$

όπου:

- Δt_i : χρονικό βήμα ολοκλήρωσης πεπερασμένου στοιχείου i [sec]
- L_e : χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου το οποίο εξαρτάται από τον τύπο και το πλήθος των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου
- c : η αδιαβατική ταχύτητα του ήχου σε στερεά [m/sec]
- E : μέτρο ελαστικότητας [Pa]
- ν : λόγος Poisson
- ρ : πυκνότητα υλικού [Kg/m³]
- K : μέτρο συμπίεσης [Pa]
- G : μέτρο διάτμησης [Pa]
- V : όγκος [m³]
- A_{\max} : εμβαδόν της μεγαλύτερης πλευράς του πεπερασμένου στοιχείου [m²]
- h_{\min} : ελάχιστο ύψος του τετράεδρου πεπερασμένου στοιχείου [m]

Μια παράμετρος που απαιτείται επίσης να ρυθμιστεί πριν την επίλυση του μοντέλου σχετίζεται με τη διαχείριση των πληροφοριών της βάσης των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα μιας επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων χωρίζονται σε δεκάδες κατηγορίες,

από τις οποίες η προκαθορισμένη επίλυση εξάγει μόνο τα βασικά που αφορούν τις τάσεις και τις μετατοπίσεις. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αναλαμβάνει αυτόματα τη δήλωση και διαχείριση όλων των απαιτούμενων αποτελεσμάτων της κοπής και ειδικότερα τις δυνάμεις αντίδρασης στις στηρίξεις, τις δυνάμεις κοπής και την ενέργεια.

3.6.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις κινηματικές οριακές συνθήκες και στους χωρικούς περιορισμούς. Οι κινηματικές οριακές συνθήκες περιλαμβάνουν τη γραμμική κίνηση του κοπτικού εργαλείου με σταθερή ταχύτητα και οι χωρικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν την πάκτωση του τεμαχίου.

Η ταχύτητα του εργαλείου προσδιορίζεται από την ανάλυση της παραγράφου 3.5.1 και πρέπει να οριστεί στο αρχείο του επιλύτη για όλους τους γραμμικούς και περιστροφικούς άξονες. Ο ορισμός περιλαμβάνει, εκτός από την επιλογή του τεμαχίου, τη δημιουργία των γραφημάτων της ταχύτητας σε συνάρτηση με το χρόνο τα οποία γίνονται αυτόματα από το πρόγραμμα. Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια κοπής.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη του μοντέλου σχετίζεται με την πάκτωση του τεμαχίου. Η πάκτωση επιβάλλεται στην κάτω επιφάνεια του τεμαχίου καθώς και στη μισή πλάγια πλευρά, αντίθετα από τη γωνία κλίσης του εργαλείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Η πλαινή πάκτωση είναι αναγκαία, ειδικότερα στις περιπτώσεις μεγάλης γωνίας κλίσης όπου ασκούνται μεγάλες πλευρικές δυνάμεις.

Για την περίπτωση του δισδιάστατου ορθογωνικού μοντέλου οι οριακές συνθήκες είναι αντίστοιχες. Η πάκτωση του τεμαχίου σε αυτήν την περίπτωση ορίζεται η κάτω και η αριστερή ακμή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο ορισμός των παραπάνω στο αρχείο του επιλύτη, εκτός από την επιλογή των οριακών συνθηκών, απαιτεί και τον ξεχωριστό καθορισμό των υποσυνόλων των κόμβων στους οποίους θα εφαρμοστούν.

3.6.5 Περιγραφή των μοντέλων υλικών

Ο επιλύτης LS-DYNA υποστηρίζει πάνω από 200 διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν τις ιδιότητες των υλικών στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Από το σύνολο αυτό στις μηχανουργικές κατεργασίες χρησιμοποιούνται επί το πλείστον μοντέλα που αφορούν μεταλλικά υλικά, με δυνατότητα περιγραφής των μη-γραμμικών ιδιοτήτων των υλικών τα οποία υποστηρίζουν και ανάλυση αστοχίας.

Ένα μοντέλο ευρέως διαδεδομένο στην προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών είναι αυτό των Johnson-Cook [104]. Σύμφωνα με την εξίσωση του μοντέλου, η ισοδύναμη Von Mises τάση διαρροής ενός μεταλλικού υλικού είναι συνάρτηση της ισοδύναμης παραμόρφωσης, του αδιάστατου ρυθμού παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας και δίνεται από την εξίσωση (3.29).

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}), \text{ για } \dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, T^* = \frac{T_{\text{test}} - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \quad (3.29)$$

όπου:

- σ_y : τάση διαρροής υλικού [MPa]
- ε_p : ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
- $\dot{\varepsilon}^*$: αδιάστατος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης για $\dot{\varepsilon}_0 = 1/\text{sec}$
- A : τάση διαρροής που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0,2% [MPa]
- B, n : σταθερές που σχετίζονται με τα φαινόμενα σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης
- C : σταθερά που σχετίζεται με το ρυθμό παραμόρφωσης

- T^* : θερμοκρασία [K]
 m : σταθερά που σχετίζεται με την αποσκλήρυνση του υλικού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας

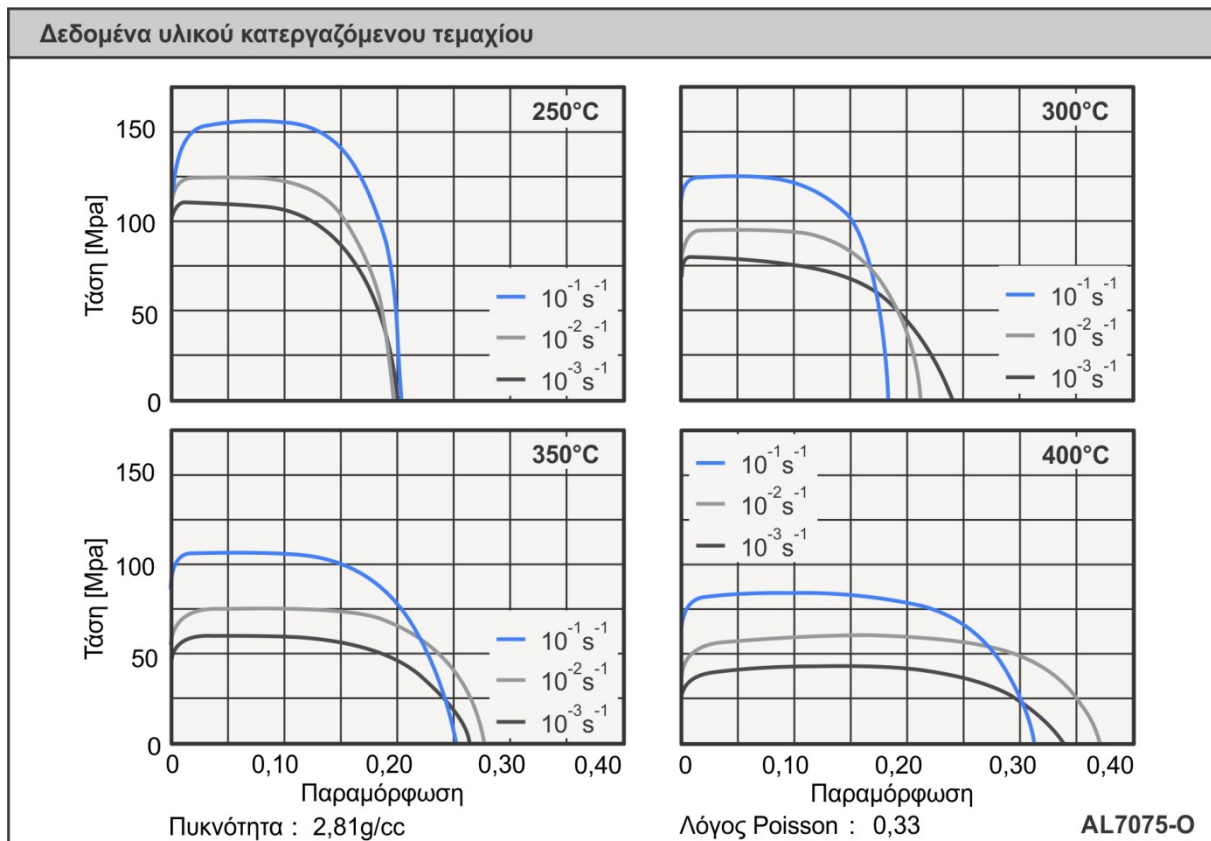
Στο μοντέλο αυτό η θραύση του υλικού και συνεπώς η διαγραφή των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνει χώρα όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη (3.30).

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\bar{\epsilon}^f} = 1, \text{ για } \bar{\epsilon}^f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + D_5 T^*), \quad \sigma^* = \frac{p}{\sigma_{\text{eff}}} \quad (3.30)$$

όπου D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 συντελεστές οι οποίοι προσδιορίζονται από πειραματικές μετρήσεις με τη μέθοδο Levenberg- Marquardt [105] και:

- p_f : πίεση που ασκείται στο στοιχείο [Pa]
 σ_{eff} : ενεργός τάση [Pa]
 $\bar{\epsilon}_p$: ενεργός πλαστική παραμόρφωση

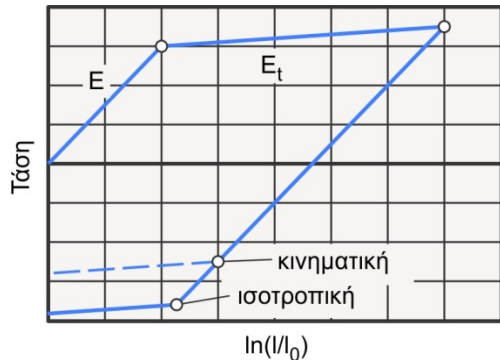
Σε περιπτώσεις μεγάλων ρυθμών παραμόρφωσης, όπως στις κατεργασίες κοπής, η πίεση που ασκείται στο στοιχείο δίνεται από αντίστοιχες εξισώσεις κατάστασης του υλικού. Για στερεά υλικά οι δύο πιο διαδεδομένες εξισώσεις κατάστασης είναι η πολυωνυμική και η εξίσωση Gruneisen [106]. Το Σχήμα 3.20 παρουσιάζει την πειραματική μέτρηση της τάσης προς την παραμόρφωση για διαφορετικές θερμοκρασίες και ρυθμούς παραμόρφωσης για το υλικό AL7075-O [107].



Σχήμα 3.20 Δεδομένα υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου AL7075-O

Ανάλογα με τις συνθήκες κοπής στις μηχανουργικές κατεργασίες δημιουργείται ακραία ανάπτυξη τάσεων και θερμοκρασιών. Οι συνθήκες αυτές αναπαράγονται μερικώς σε εργαστηριακό περιβάλλον με τη μέθοδο Split Hopkinson Pressure Bar [108]. Με τη μέθοδο

αυτή μπορεί να μετρηθεί η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και ρυθμούς παραμόρφωσης. Η παραπάνω μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του AL7075 με ή χωρίς θερμική επεξεργασία [107, 109-114].



Σχήμα 3.21 Περιγραφή διγραμμικού μοντέλου υλικού

Το δεύτερο μοντέλο υλικού που ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει είναι το απλοποιημένο μοντέλο Johnson-Cook. Η διαφορά αυτού του μοντέλου είναι πως δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου στην εξίσωση (3.29) ο τελευταίος παράγοντας που σχετίζεται με την επίδραση της θερμοκρασίας παραλείπεται. Έτσι, το απλοποιημένο μοντέλο είναι κατά 50% πιο γρήγορο από το πλήρες. Για να αντισταθμιστεί η αύξηση των τάσεων λόγω της έλλειψης υπολογισμού της αποσκλήρυνσης του υλικού από αύξηση της θερμοκρασίας η μέγιστη τάση μπορεί να περιοριστεί από το χρήστη.

Το τρίτο μοντέλο υλικού που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης για τη μοντελοποίηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι το διγραμμικό-ελαστοπλαστικό μοντέλο το οποίο υποστηρίζει φαινόμενα ισοτροπικής και κινηματικής σκλήρυνσης και λαμβάνει υπόψη του και το ρυθμό παραμόρφωσης (Σχήμα 3.21). Το μοντέλο αυτό είναι το πιο γρήγορο υπολογιστικά, λόγω της προσέγγισης της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης με δύο μόνο ευθείες (bilinear). Το πρώτο τμήμα της καμπύλης περιγράφεται από το μέτρο ελαστικότητας και το δεύτερο τμήμα από το εφαπτομενικό μέτρο. Το εφαπτομενικό μέτρο ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που περιγράφει την πλαστική περιοχή του υλικού και υπολογίζεται προσεγγιστικά από την εξίσωση (3.31).

$$E_t = \frac{\sigma_{ult} - \sigma_y}{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_y} \quad (3.31)$$

όπου:

- E_t : εφαπτομενικό μέτρο [Pa]
- σ_{ult} : τάση αστοχίας [Pa]
- σ_y : τάση διαρροής [Pa]
- ε_{ult} : παραμόρφωση στη θέση αστοχίας
- ε_y : παραμόρφωση στη θέση διαρροής

Επίσης το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί προαιρετικά να λάβει υπόψη του την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στο όριο διαρροής. Η λειτουργία αυτή βασίζεται στο μοντέλο των Cowper-Symonds όπου το όριο διαρροής πολλαπλασιάζεται με τον τελεστή της εξίσωσης (3.32).

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p_f} \quad (3.32)$$

όπου:

- σ_y : στατικό όριο διαρροής [Pa]
- σ_d : δυναμικό όριο διαρροής [Pa]
- C : σταθερά του μοντέλου σχετικά με το ρυθμό παραμόρφωσης
- $\dot{\varepsilon}$: ρυθμός παραμόρφωσης

p_f : πίεση που ασκείται στο στοιχείο [Pa]

Σχετικά με τη μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου, εκτός από τα παραπάνω μοντέλα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε μοντελοποίηση ελαστικού ή άκαμπτου υλικού. Και στις δύο περιπτώσεις ο χρήστης εισάγει τις γραμμικές ιδιότητες του υλικού.

3.6.6 Επίλυση μοντέλου και σύγκλιση

Ο επιλύτης LS-DYNA βασίζεται στη μέθοδο ενδογενούς καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης. Σε αυτήν τη μέθοδο η μετατόπιση ενός κόμβου στο χρονικό επίπεδο $t+\Delta t$ ισούται με τις γνωστές τιμές του ίδιου και των περιφερειακών του κόμβων στο χρονικό επίπεδο t . Το πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι πως το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων της κίνησης μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά απευθείας χωρίς οποιοδήποτε μετασχηματισμό. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη χρονική ολοκλήρωση είναι η μέθοδος της κεντρικής διαφοράς.

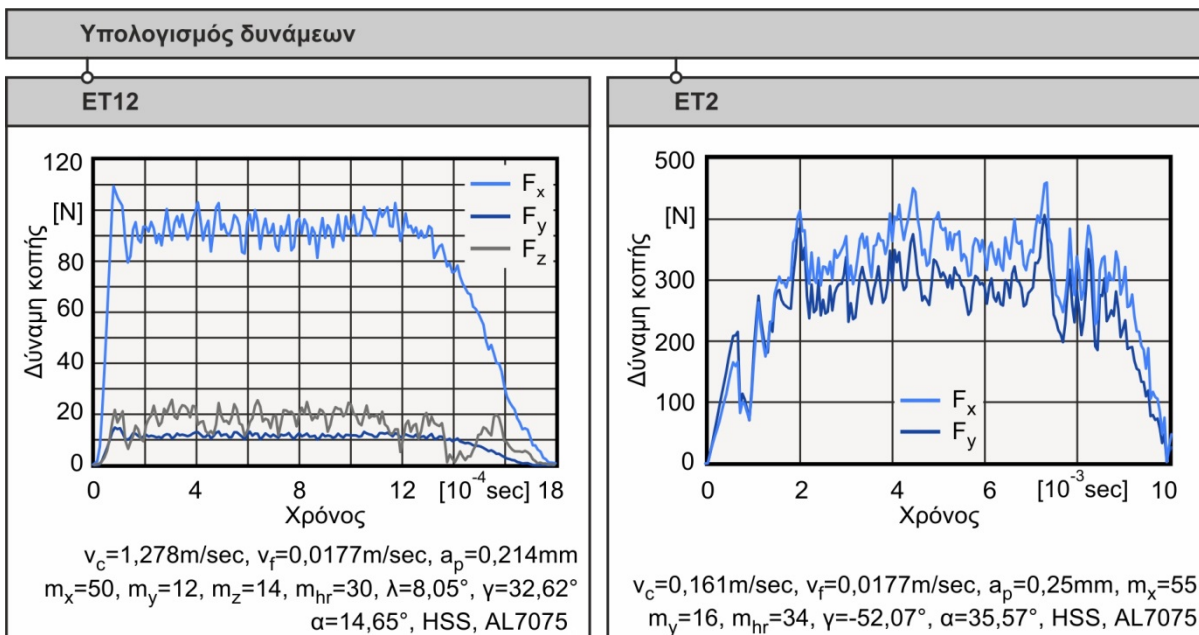
Ο βρόγχος χρονικής ολοκλήρωσης στο LS-DYNA αποτελείται από τα εξής 10 βήματα:

- Εφαρμογή δυνάμεων και οριακών συνθηκών.
- Επεξεργασία των πεπερασμένων στοιχείων με σειρά: στερεά, ράβδοι, κελύφη.
- Επεξεργασία διακριτών πεπερασμένων στοιχείων.
- Επεξεργασία των επαφών με τη μέθοδο ποινής.
- Ενημέρωση του μητρώου των επιταχύνσεων και εφαρμογή των κινηματικών οριακών συνθηκών.
- Επεξεργασία των επαφών με τη μέθοδο του περιορισμού της κινηματικής.
- Εγγραφή αποτελεσμάτων στη βάση δεδομένων.
- Ενημέρωση ταχυτήτων.
- Ενημέρωση μετατοπίσεων και νέα γεωμετρία.
- Ενημέρωση τρέχοντα χρόνου και έλεγχος τερματισμού.

Ο συνολικός χρόνος επίλυσης των μοντέλων λοξής κοπής εξαρτάται από τη θέση του καθενός στην κύρια κόψη. Στα μοντέλα που βρίσκονται πιο κοντά στον άξονα περιστροφής του εργαλείου, η γωνία κλίσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στην περιφέρεια. Έτσι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το εργαλείο να εισχωρήσει πλήρως στο τεμάχιο είναι μεγαλύτερος. Παρ' όλα αυτά, ο συνολικός χρόνος παραμένει σημαντικά μικρότερος σε σχέση με την αντίστοιχη επίλυση του μακροσκοπικού μοντέλου σε κάποιο εμπορικό λογισμικό.

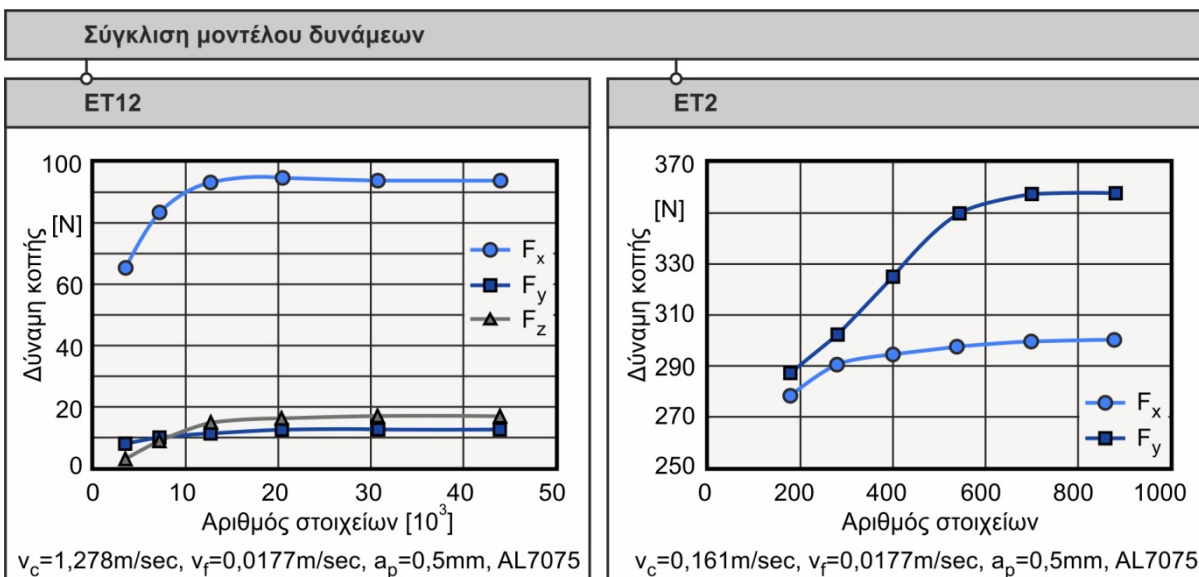
Ένα παράδειγμα αποτελέσματος αναφορικά με τις δυνάμεις κοπής που υπολογίζονται από το μοντέλο, παρουσιάζεται στο [Σχήμα 3.22](#). Στο αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού για το 12° στοιχειώδες μοντέλο λοξής κοπής (ET12), το οποίο αντιστοιχεί στο τελευταίο κομμάτι της κύριας κόψης. Η δύναμη στη διεύθυνση x ισούται με 93N, η δύναμη στη διεύθυνση y ισούται με 12N και η δύναμη στη διεύθυνση z ισούται με 19N. Στο δεξί μέρος του σχήματος παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού των δυνάμεων για το δεύτερο στοιχειώδες μοντέλο ορθογωνικής κοπής (ET2), το οποίο αντιστοιχεί στο τελευταίο κομμάτι της εγκάρσιας κόψης. Η δύναμη στη διεύθυνση x ισούται με 357N και η δύναμη στη διεύθυνση y ισούται με 302N. Στο κάτω μέρος του σχήματος παρουσιάζονται οι παράμετροι των μοντέλων όπως έχουν υπολογιστεί με βάση την προηγούμενη ανάλυση.

Επιπλέον, για να διασφαλιστεί ότι το μοντέλο συγκλίνει στις σωστές τιμές δυνάμεων κοπής, διεξήχθη μελέτη σύγκλισης. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκαν δύο στοιχειώδη μοντέλα. Το πρώτο αφορά την κύρια κόψη, όπου επιλέχθηκε το τελευταίο στοιχειώδες μοντέλο της κόψης (ET12), και το δεύτερο αφορά της επιλογή του τελευταίου μοντέλου της εγκάρσιας κόψης (ET2).



Σχήμα 3.22 Αποτελέσματα δυνάμεων του DIATRISIS για λοξή και ορθογωνική κοπή

Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις έγιναν έξι πειράματα με διαφορετική διακριτοποίηση. Για το μοντέλο ET12 τα πλέγματα του τεμαχίου αποτελούνταν από 3600, 7280, 12800, 20520, 30800 και 44000 πεπερασμένα στοιχεία, ενώ για το μοντέλο ET2 τα πλέγματα αποτελούνταν από 180, 280, 400, 540, 700 και 880 πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.23](#).



Σχήμα 3.23 Μελέτη σύγκλισης μοντέλου δυνάμεων

Για το μοντέλο ET12 παρατηρείται γρήγορη σύγκλιση όλων των δυνάμεων κοπής, ενώ για μικρό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων η δύναμη F_y , υπερिशχύει της F_z . Αναφορικά με το μοντέλο ET2, παρατηρείται επίσης πολύ γρήγορη σύγκλιση της δύναμης F_x από το πλέγμα των τετρακοσίων πεπερασμένων στοιχείων και μια πιο αργή σύγκλιση της F_y από το πλέγμα των επτακοσίων πεπερασμένων στοιχείων. Και στις δύο περιπτώσεις η κάθετη δύναμη

απαιτεί περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία, πράγμα που οφείλεται στην καμπυλότητα της κοπτικής ακμής του εργαλείου [115].

3.7 Μετα-επεξεργασία αποτελεσμάτων

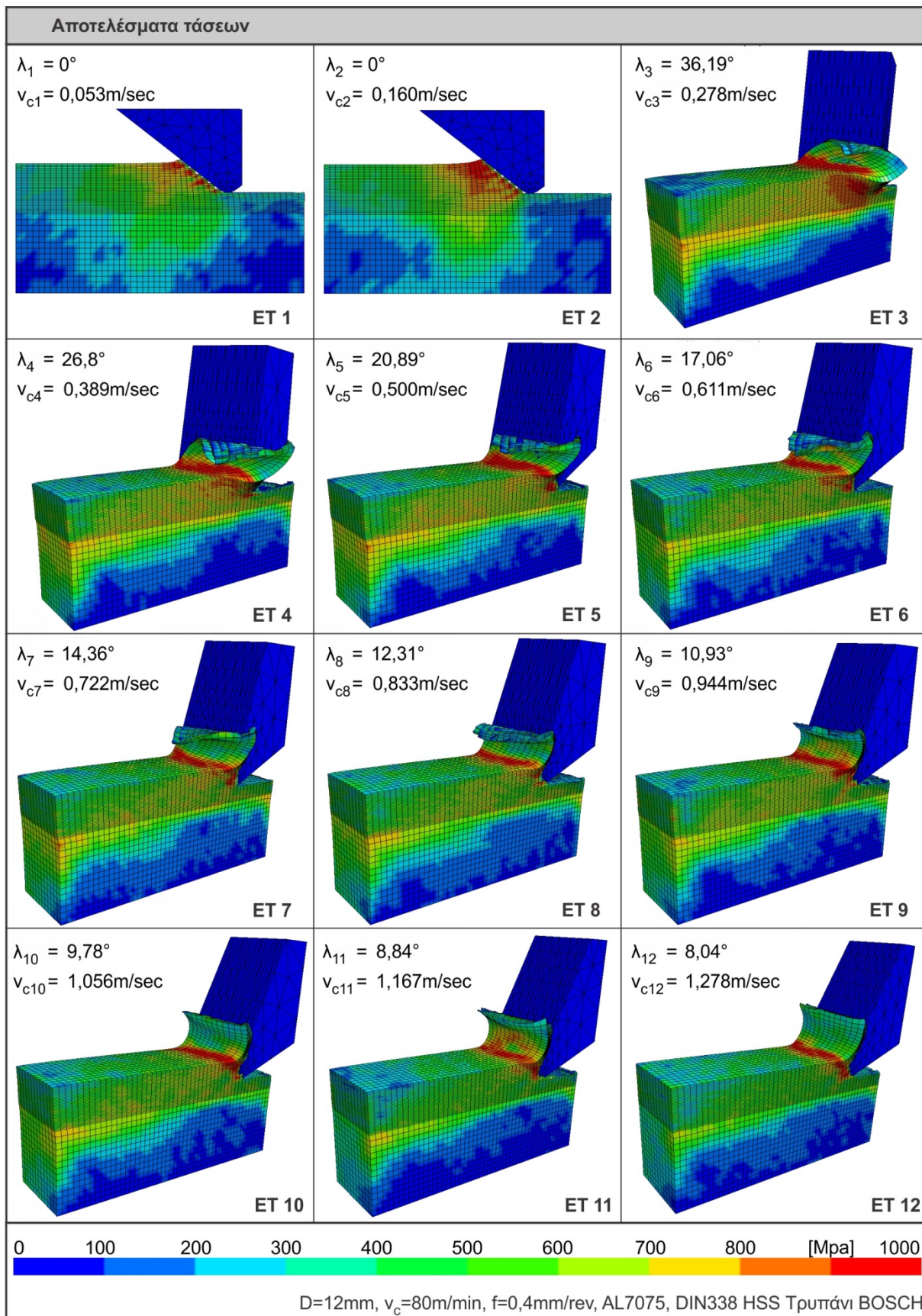
Τα αποτελέσματα που εξετάζονται από την παραπάνω επίλυση αφορούν τις δυνάμεις κοπής και τις τάσεις που αναπτύσσονται στο κατεργαζόμενο υλικό. Τα αποτελέσματα αναφορικά με τις τάσεις παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.24](#). Για την γραφική απεικόνιση των τάσεων που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS-pre/post 3.2 της LSTC.

Το σχήμα παρουσιάζει ένα πλήρες παράδειγμα προσομοίωσης της διάτρησης. Οι δύο πρώτες στοιχειώδεις ορθογωνικές κοπές (ET1 και ET2) αφορούν την περιοχή της εγκάρσιας κόψης, ενώ τα στοιχειώδη μοντέλα ET3 – ET12 αφορούν στοιχειώδεις λοξές κοπές τις κύριας κόψης. Επίσης παρουσιάζεται η μεταβολή τόσο της γωνίας κλίσης του κάθε στοιχειώδους μοντέλου, όσο και η μεταβολή της ταχύτητας κοπής από τον άξονα του εργαλείου προς την περιφέρεια. Το παράδειγμα αφορά την περίπτωση του εργαλείου διαμέτρου 12mm για ταχύτητα κοπής 80m/min, ενώ η πρόωση της διάτρησης είναι 0,4mm/rev. Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι AL7075.

Στην περίπτωση των ορθογωνικών κοπών η γωνία κλίσης του εργαλείου είναι μηδέν ενώ η ταχύτητα κοπής κυμαίνεται από 0,053 έως 0,160m/sec. Για την περίπτωση των λοξών κοπών η γωνία κλίσης μεταβάλλεται από 36,19° για το πρώτο στοιχειώδες μοντέλο της κύριας κόψης (ET3) που βρίσκεται κοντά στον άξονα του εργαλείου, έως 8,04° για το τελευταίο στοιχειώδες μοντέλο (ET12) που βρίσκεται στην περιφέρεια του εργαλείου.

Οι μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται όπως είναι αναμενόμενο στην πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, ενώ το μέγεθός τους κυμαίνεται στα 1000Mpa. Επίσης παρατηρείται διεύρυνση της ζώνης αυτής, στις στοιχειώδεις κοπές που βρίσκονται κοντά στην εγκάρσια κόψη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι σε αυτήν την περιοχή η κοπή γίνεται υπό μεγάλη γωνία κλίσης του εργαλείου και με μικρή θετική γωνία αποβλίπτου, προκαλώντας αύξηση των διαμηθικών τάσεων. Επιπλέον στις στοιχειώδεις κοπές που βρίσκονται κοντά στην άξονα του εργαλείου παρατηρείται πολύ μεγάλη παραμόρφωση του αποβλίπτου η οποία μειώνεται στις κοπές που βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια. Αυτή η διαδοχή των παραμορφώσεων των στοιχειωδών αποβλίπτων επεξηγεί την ελικοειδή μορφή του αποβλίπτου της διάτρησης.

Για να υπολογιστεί η δύναμη κοπής και η ροπή διάτρησης απαιτούνται κατάλληλοι μετασχηματισμοί των δυνάμεων που προκύπτουν από τα στοιχειώδη μοντέλα. Αυτοί οι μετασχηματισμοί, λαμβάνουν χώρα στο στάδιο της μεταεπεξεργασίας, υποστηρίζονται από το λογισμικό DIATRISIS και παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.



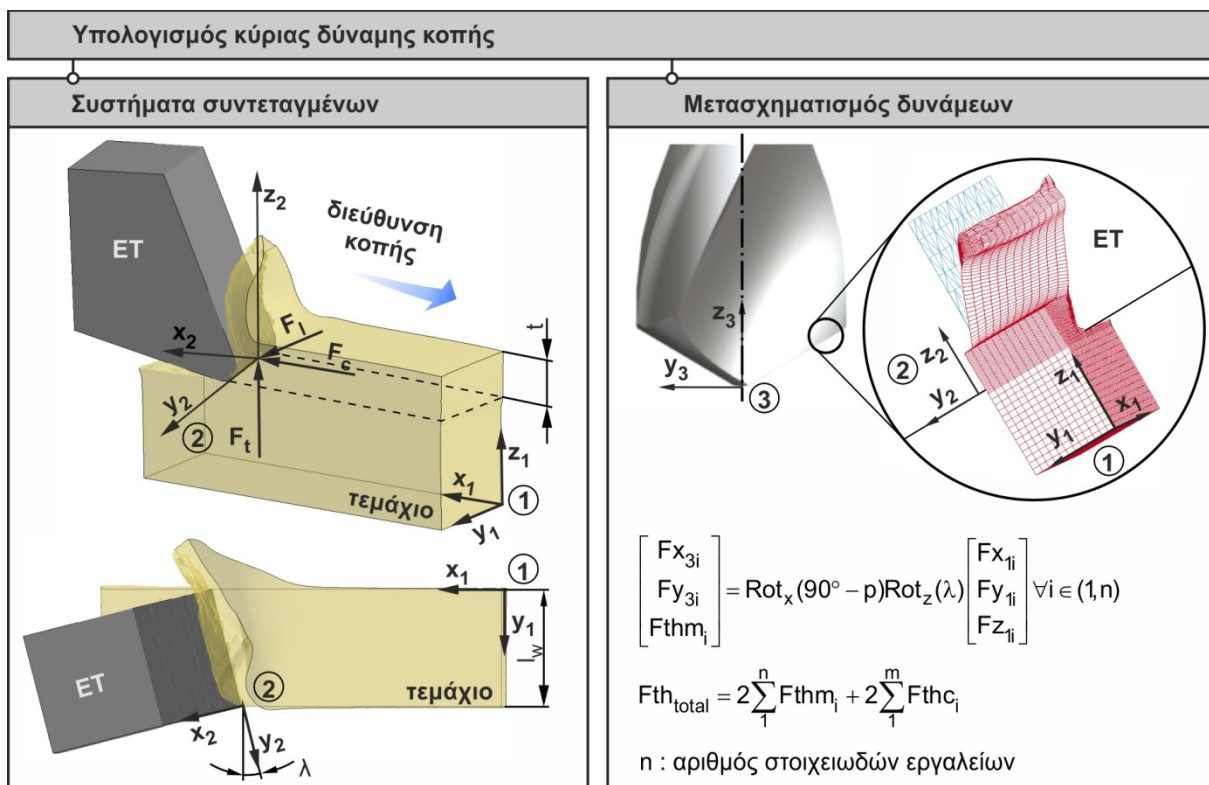
Σχήμα 3.24 Διαδοχικές στοιχειώδεις κοπές και κατανομή τάσεων στο τεμάχιο

3.7.1 Υπολογισμός δύναμης κοπής

Η διαδικασία υπολογισμού της δύναμης κοπής στη διάτρηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25. Οι δυνάμεις κοπής που προκύπτουν από την προσομοίωση της λοξής κοπής φαίνονται στο αριστερό μέρος του σχήματος και υπολογίζονται με βάση το σύστημα συντεταγμένων 1. Στο σύστημα συντεταγμένων 1 ο άξονας x είναι παράλληλος με το μήκος του τεμαχίου με φορά προς το εργαλείο, ο άξονας z παράλληλος με το ύψος του με φορά προς τα πάνω και ο y είναι κάθετος στους άλλους δύο. Οι τρεις δυνάμεις που ασκούνται στο κοπτικό είναι η F_c η F_t και η F_l . Η F_c είναι η δύναμη παράλληλα στη διεύθυνση κοπής, η F_l κάθετα στη διεύθυνση κοπής και η F_t κάθετα στις άλλες δύο με φορά προς το κοπτικό εργαλείο.

Ο πρώτος μετασχηματισμός γίνεται με βάση το σύστημα συντεταγμένων 2 το οποίο αναφέρεται στην κοπτική ακμή. Αυτό το σύστημα προκύπτει από τη δεξιόστροφη περιστροφή του πρώτου γύρω από τον άξονα z. Στο σύστημα αυτό ο άξονας y_2 είναι παράλληλος στην κύρια κόψη με φορά προς το κέντρο του εργαλείου, ο x_2 κάθετος σε αυτήν, και ο z_2 κάθετος στους άξονες x_2 και y_2 .

Ο δεύτερος μετασχηματισμός γίνεται με βάση το σύστημα συντεταγμένων 3 και αναφέρεται στο εργαλείο διάτρησης. Το ίδιο σύστημα 3 χρησιμοποιείται και από το δυναμόμετρο, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των δυνάμεων. Το σύστημα συντεταγμένων 3 προκύπτει από την δεξιόστροφη περιστροφή του συστήματος 2 γύρω από τον άξονα x κατά $90^\circ - \rho$ μοίρες, όπου ρ η ημιγωνία κορυφής του εργαλείου. Έτσι, ο άξονας z_3 είναι παράλληλος με τον άξονα του εργαλείου, ο y_3 κάθετος και ο x_3 κάθετος στους άλλους δύο.



Σχήμα 3.25 Διαδικασία υπολογισμού της δύναμης κοπής στη διάτρηση

Εκτελώντας τους παραπάνω μετασχηματισμούς οι οποίοι περιγράφονται από τους πίνακες της εξίσωσης (3.33) και για τα n στοιχειώδη εργαλεία, προκύπτει ο πίνακας των δυνάμεων στο σύστημα συντεταγμένων 3. Το άθροισμα της τρίτης γραμμής του πίνακα

πολλαπλασιαζόμενο με τον αριθμό των κόψεων του εργαλείου δίνει τη συνολική δύναμη κοπής στις κύριες κόψεις.

$$\text{Rot}_x(90^\circ - \rho)\text{Rot}_z(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ - \rho) & -\sin(90^\circ - \rho) \\ 0 & \sin(90^\circ - \rho) & \cos(90^\circ - \rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

όπου:

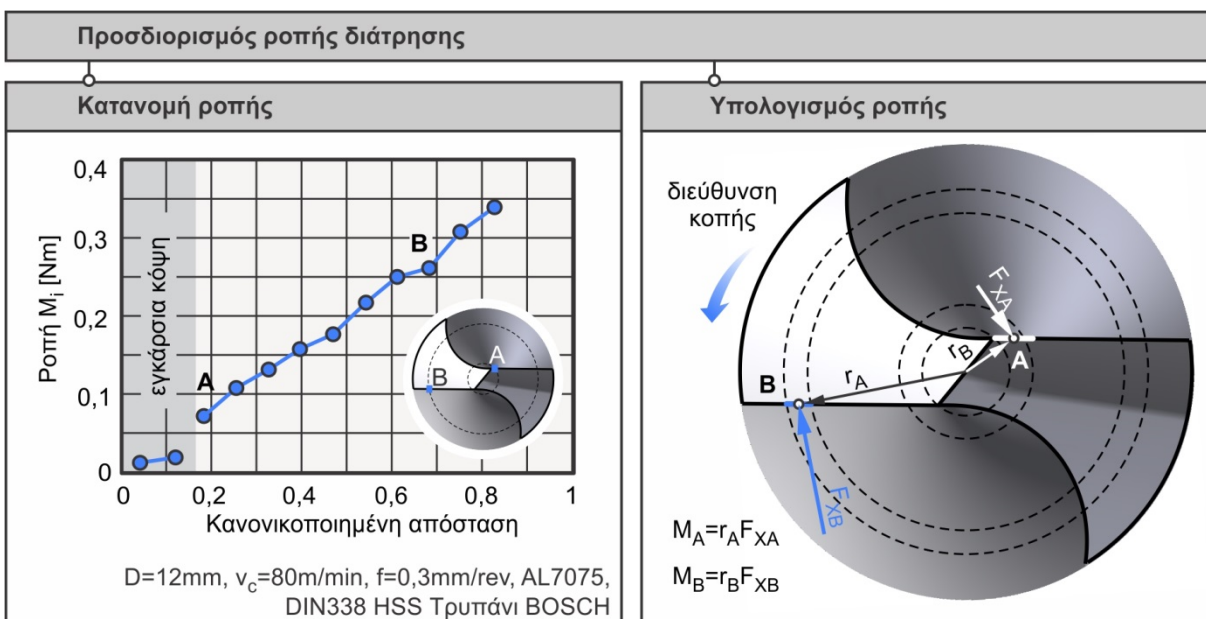
- λ : γωνία κλίσης [deg]
- ρ : γωνία κορυφής [deg]

Οι δυνάμεις που προκύπτουν από το ορθογωνικό μοντέλο κοπής δε χρειάζονται μετασχηματισμό διότι η δύναμη F_{zchis} που προκύπτει από το μοντέλο έχει την ίδια διεύθυνση με τη δύναμη κοπής στη διάτρηση. Έτσι, το άθροισμα όλων των δυνάμεων F_{zchis} κάθε στοιχειώδους μοντέλου στην μισή εγκάρσια κόψη πολλαπλασιαζόμενο επί δύο δίνει τη συνολική δύναμη κοπής στην εγκάρσια κόψη.

Τέλος το άθροισμα της συνολικής δύναμης στην εγκάρσια κόψη και της συνολικής δύναμης στις δύο κύριες κόψεις έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική δύναμη κοπής $F_{thtotal}$. Τα αποτελέσματα των δυνάμεων παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο όπου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

3.7.2 Υπολογισμός ροπής

Η μέθοδος υπολογισμού της ροπής στη διάτρηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.26. Για τον υπολογισμό της δεν απαιτείται μετασχηματισμός των δυνάμεων κοπής από το σύστημα συντεταγμένων 1 του στοιχειώδους τεμαχίου. Η ροπή για κάθε στοιχειώδες μοντέλο δίνεται ως το γινόμενο της απόστασης του κέντρου του στοιχειώδους εργαλείου από τον άξονα περιστροφής r_i επί την κάθετη δύναμη F_{xi} . Η συνολική ροπή προκύπτει ως το άθροισμα όλων των στοιχειωδών ροπών πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των κόψεων του εργαλείου.



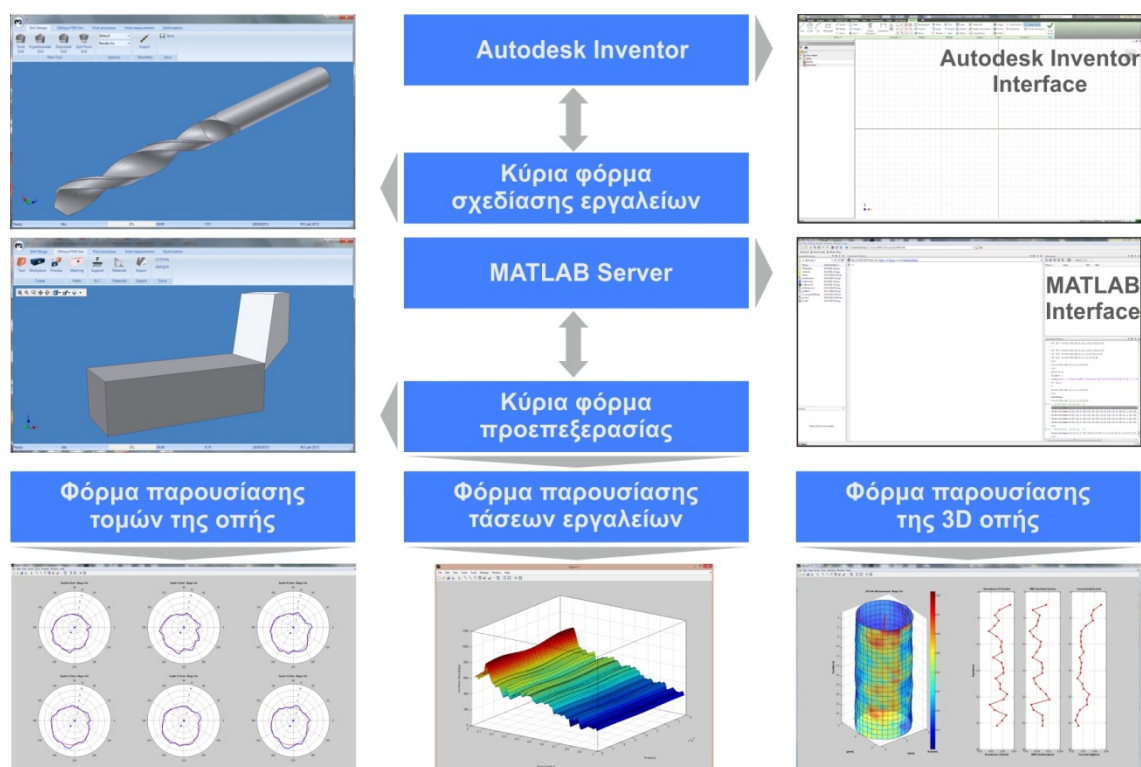
Σχήμα 3.26 Διαδικασία υπολογισμού της ροπής στη διάτρηση

Στο αριστερό μέρος του σχήματος 3.30 παρουσιάζεται η κατανομή της ροπής σε μια κύρια κόψη του εργαλείου. Σύμφωνα με την κατανομή αυτή, η ροπή που ασκείται είναι μεγαλύτερη στα στοιχειώδη εργαλεία που βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια και μειώνεται σταδιακά προς το κέντρο. Η κατανομή αυτή οφείλεται στο μέγεθος και των δύο παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται η ροπή. Η κύρια δύναμη κοπής είναι αυξημένη κοντά στην περιφέρεια του εργαλείου, λόγω αυξημένης ταχύτητας κοπής και μειώνεται προς το κέντρο του εργαλείου. Επιπλέον οι δυνάμεις που βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια του εργαλείου απέχουν περισσότερο από τον άξονα συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της ροπής.

3.8 Το λογισμικό DIATRISIS Pre\Post

Παρ' όλο που η επίλυση της σειράς των μοντέλων λοξής και ορθογωνικής κοπής είναι υπολογιστικά συμφέρουσα, το στάδιο της προεπεξεργασίας είναι πιο περίπλοκο από τα αντίστοιχα εμπορικά μοντέλα. Γι αυτόν το λόγο, το μοντέλο προσομοίωσης DIATRISIS συνοδεύεται από ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη, αυτοματοποιώντας έτσι τις διαδικασίες προεπεξεργασίας των μοντέλων. Η εφαρμογή είναι αυτόνομη, αλλά επικοινωνεί, τόσο με τον πυρήνα του Inventor, όσο και με τον εξυπηρετητή της MATLAB για τις διάφορες λειτουργίες που εκτελούνται μέσω του DIATRISIS.

Η εφαρμογή αποτελείται από δύο τμήματα προεπεξεργασίας που αφορούν τη σχεδίαση κοπτικών εργαλείων διάτρησης και τη δημιουργία μοντέλων δισδιάστατης ορθογωνικής και τρισδιάστατης λοξής κοπής. Η εφαρμογή ενσωματώνει τμήμα μεταεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων που αφορά την ανάλυση και επεξεργασία μετρήσεων κατεργασμένων οπών αλλά και την παρουσίαση των τάσεων που αναπτύσσονται στο εργαλείο. Συνοπτικά το γραφικό περιβάλλον διεπαφής του DIATRISIS παρουσιάζεται στο [Σχήμα 3.27](#).

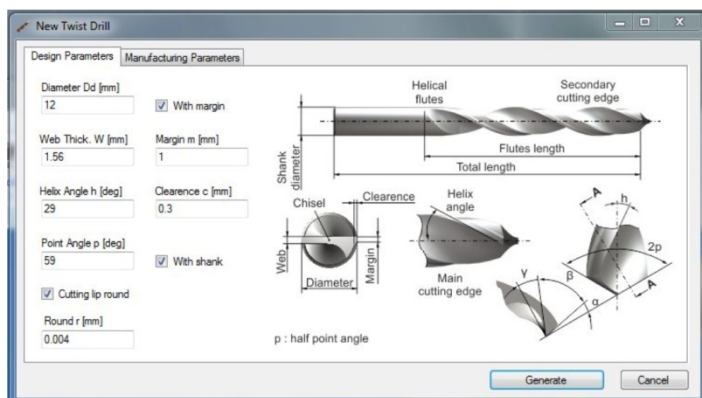


Σχήμα 3.27 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής του DIATRISIS

Το μενού της κύριας φόρμας χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία είναι υπεύθυνη για την σχεδίαση των εργαλείων διάτρησης, η δεύτερη για τη μοντελοποίηση

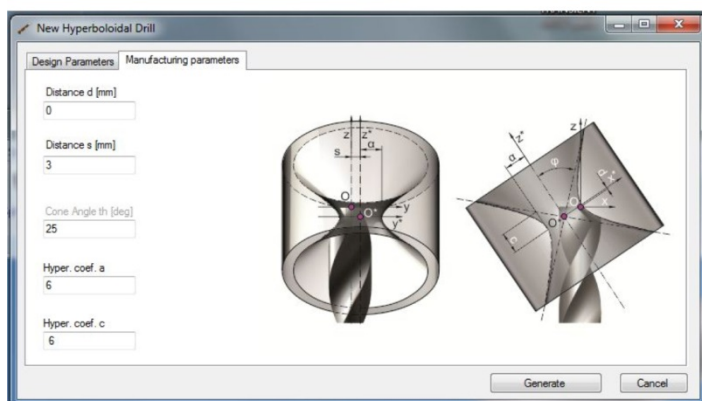
λοξών και ορθογωνικών προβλημάτων κοπής, η τρίτη για τη μεταπεξεργασία των αποτελεσμάτων και η τέταρτη για την επεξεργασία των μετρήσεων οπών.

3.8.1 Περιβάλλον δημιουργίας κοπτικών εργαλείων διάτρησης

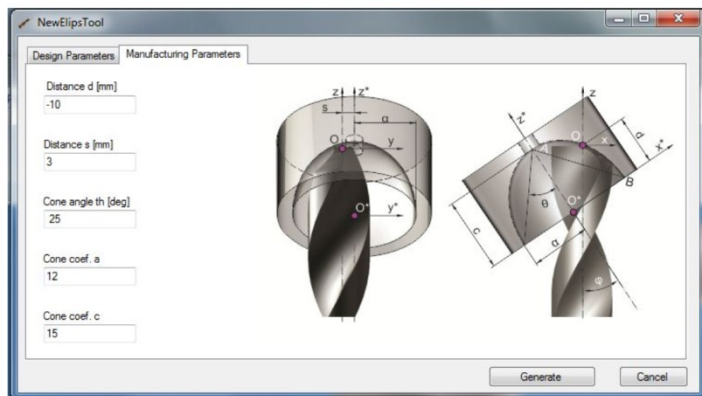
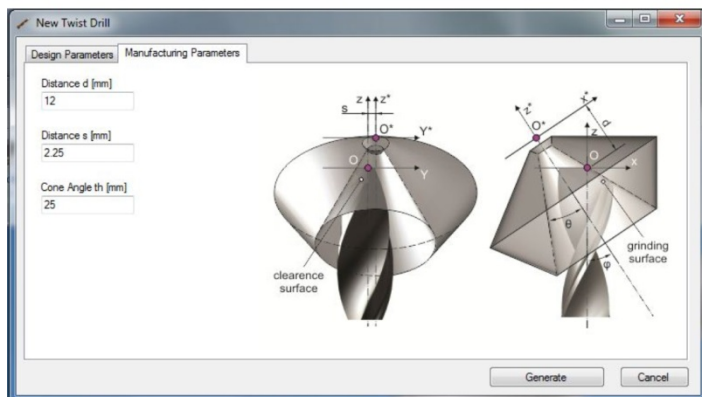


Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.27 το Inventor αναλαμβάνει μόνο της δημιουργία των εργαλείων, ενώ οι φόρμες παρουσίασης των τομών της οπής, των τάσεων των εργαλείων και της τρισδιάστατης οπής βασίζονται στη MATLAB.

Στις φόρμες δημιουργίας κοπτικών εργαλείων διάτρησης γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων για την κατασκευή των αντίστοιχων τρυπανιών. Οι φόρμες αφορούν την κατασκευή κωνικών, υπερβολοειδών και ελλειψοειδών εργαλείων διάτρησης και η καθεμία αποτελείται από δύο καρτέλες. Η πρώτη καρτέλα αφορά την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων και η δεύτερη αφορά την εισαγωγή των κατασκευαστικών παραμέτρων των εργαλείων.



Οι βασικές παράμετροι σχεδίασης όλων των κοπτικών εργαλείων διάτρησης που υποστηρίζονται από το πρόγραμμα DIATRISIS και καλείται να εισάγει ο χρήστης, αφορούν τη διάμετρο του εργαλείου, το πάχος του πυρήνα του, τη γωνία ελίκωσης και τη γωνία κορυφής. Επιπλέον ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την προσθήκη στελέχους στο κοπτικό εργαλείο, το στρογγύλεμα των κοπτικών ακμών ή την προσθήκη δευτερευουσών κόψεων. Στην περίπτωση επιλογής στρογγυλέματος των κοπτικών ακμών, ο χρήστης πρέπει να εισάγει επιπλέον την ακτίνα του κύκλου, ενώ σε περίπτωση επιλογής δημιουργίας δευτερευουσών κόψεων ο χρήστης πρέπει να εισάγει επιπλέον το πάχος των δευτερευουσών κόψεων καθώς και το πλάτος της επιφάνειας ελευθερίας.

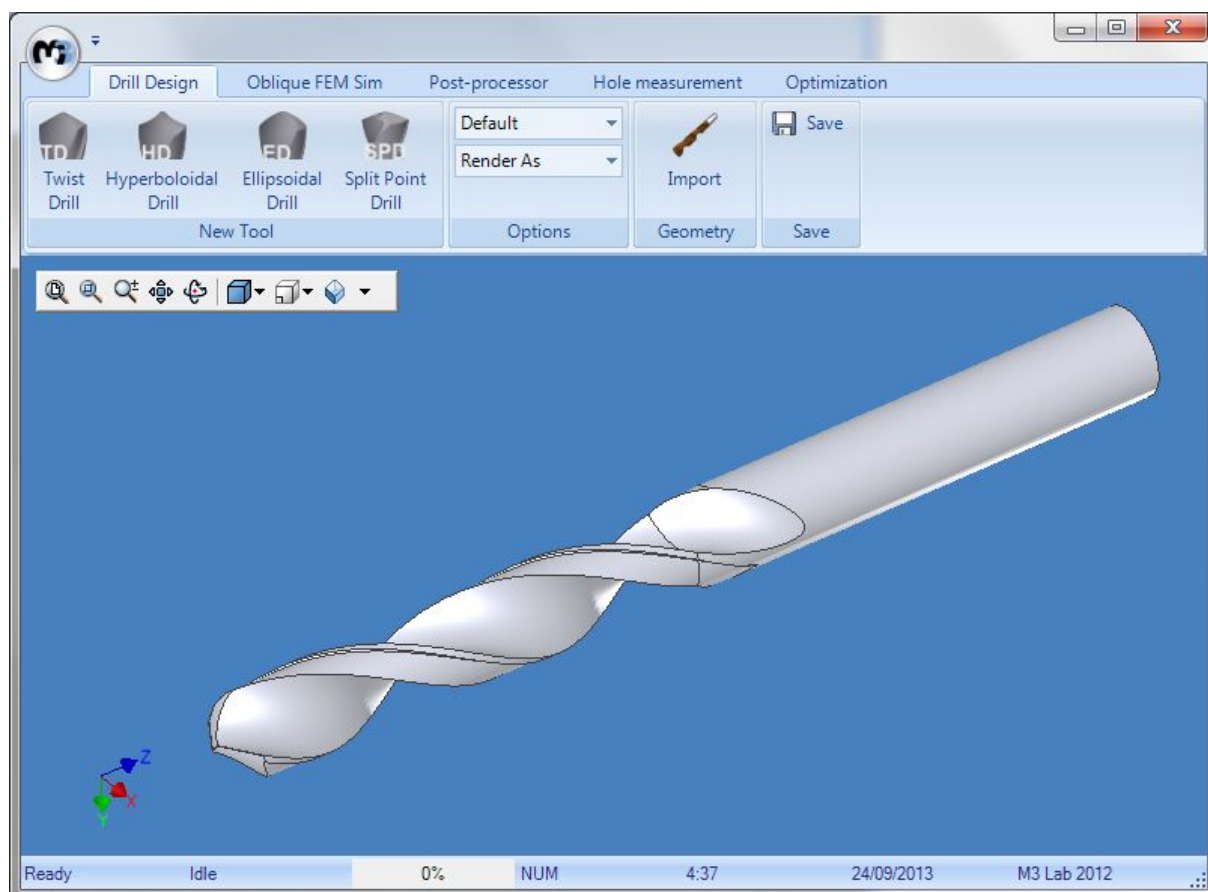


Σχήμα 3.28 Φόρμες σχεδίασης εργαλείων διάτρησης

Αναφορικά με την κατασκευή κωνικών εργαλείων απαιτούνται τέσσερις παράμετροι, ενώ για την

κατασκευή ελλειψοειδών και υπερβολοειδών εργαλείων απαιτούνται πέντε. Οι τρεις παράμετροι των κωνικών εργαλείων είναι κοινές σε όλες τις περιπτώσεις και αφορούν την οριζόντια και κάθετη απόσταση του κώνου τροχίσματος από την κορυφή του κοπτικού εργαλείου καθώς και τη γωνία τοποθέτησης του τροχού σε σχέση με τον άξονά του. Η τέταρτη παράμετρος αφορά τη γωνία του κώνου τροχίσματος. Στην περίπτωση κατασκευής ελλειψοειδών ή υπερβολοειδών εργαλείων, ο χρήστης πρέπει να ορίσει επιπλέον τις παραμέτρους της έλλειψης-υπερβολής της κατατομής του εργαλείου τροχίσματος. Οι φόρμες που αναπτύχθηκαν παρουσιάζονται στο [Σχήμα 3.28](#).

Τέλος στο [Σχήμα 3.29](#) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της κατασκευής ενός εργαλείου διάτρησης. Στις βασικές επιλογές διαχείρισης του μοντέλου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την προβολή του μοντέλου ακμών ή του στερεού μοντέλου, την προοπτική προβολή του καθώς και την απαιτούμενη όψη (πρόοψη, κάτοψη, άνοψη, αριστερή – δεξιά πλάγια και πίσω όψη).

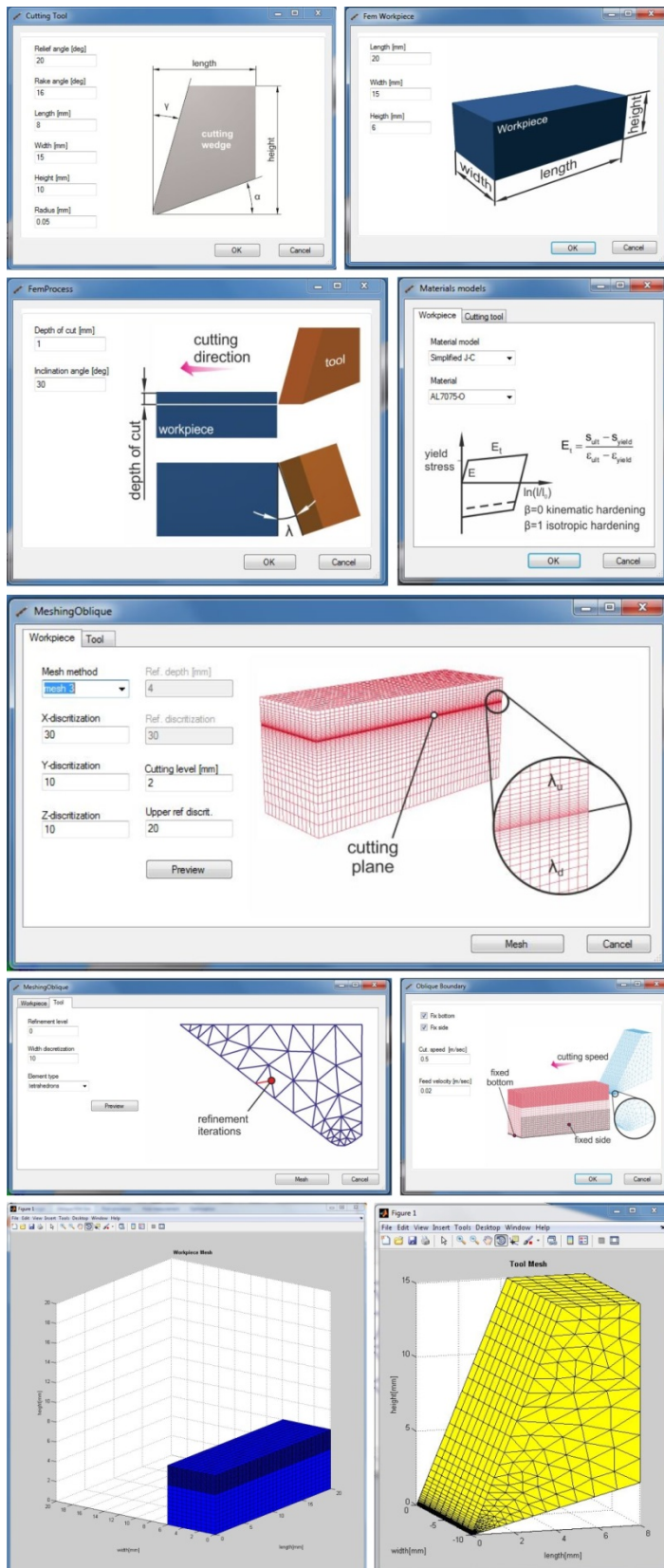


Σχήμα 3.29 Αποτέλεσμα σχεδίασης εργαλείων διάτρησης

3.8.2 Διεπαφή προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία

Η διαδικασία δημιουργίας των μοντέλων λοξής κοπής αποτελείται από επτά διεπαφές οι οποίες εικονίζονται στο [Σχήμα 3.30](#). Η πρώτη διεπαφή αφορά την εισαγωγή των δεδομένων της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου. Στη δεύτερη διεπαφή εισάγεται η γεωμετρία του ορθογωνικού τεμαχίου και στην τρίτη εισάγονται τα δεδομένα της συναρμολόγησης των δύο μοντέλων. Με τις τρεις αυτές διεπαφές ο χρήστης ολοκληρώνει τη σχεδίαση του συστήματος εργαλείου-τεμαχίου.

Η τέταρτη διεπαφή αφορά την εισαγωγή των παραμέτρων διακριτοποίησης και χωρίζεται σε δύο καρτέλες. Η πρώτη καρτέλα αφορά τη διακριτοποίηση του τεμαχίου και η δεύτερη του κοπτικού εργαλείου. Στην περίπτωση διακριτοποίησης του τεμαχίου, ο χρήστης έχει τη



Σχήμα 3.30 Φόρμες προεπεξεργασίας λοξής κοπής

απαραίτητα δεδομένα για όλη τη σειρά προβλημάτων και να λάβει όλη τη σειρά των αρχείων προς επίλυση.

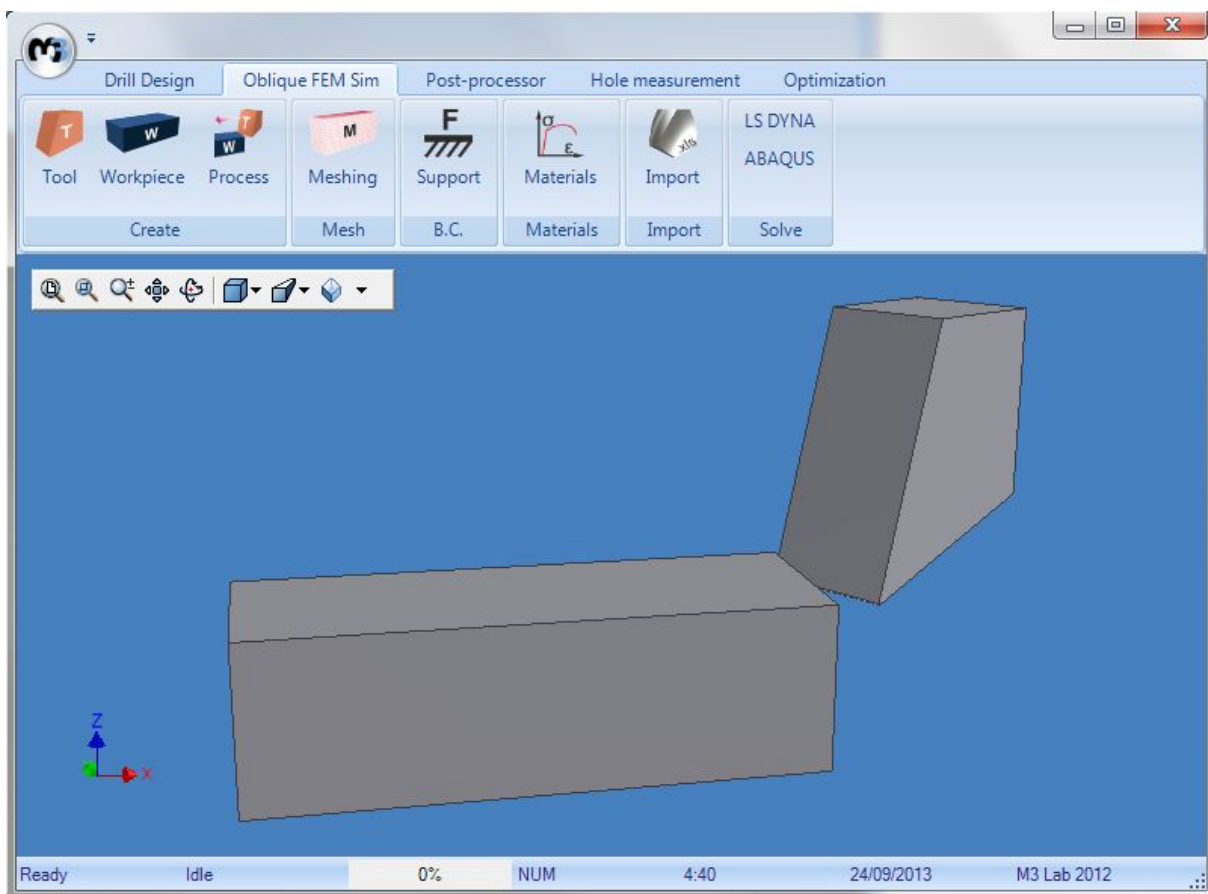
δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα από τρεις μεθόδους διακριτοποίησης με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία οι οποίες παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.6.1, ενώ το πρόγραμμα τον καθοδηγεί για την εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση διακριτοποίησης του κοπτικού εργαλείου, ο χρήστης έχει να επιλέξει ανάμεσα σε τετράεδρα ή πεντάεδρα, ενώ και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να κάνει προεπισκόπηση του πλέγματος.

Αφού ολοκληρωθεί και η διακριτοποίηση των μοντέλων, στην πέμπτη διεπαφή ο χρήστης εισάγει τις οριακές συνθήκες του μοντέλου, οι οποίες έχουν να κάνουν με την πάκτωση του τεμαχίου και την κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια, στην έκτη διεπαφή ο χρήστης επιλέγει υλικό καθώς και μοντέλο υλικού.

Αναφορικά με το μοντέλο υλικού του τεμαχίου ο χρήστης έχει τρεις επιλογές: Η πρώτη επιλογή αφορά πλαστικό μοντέλο με σκλήρυνση, η δεύτερη επιλογή αφορά το μοντέλο J-C και η τελευταία το απλοποιημένο μοντέλο J-C. Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγει υλικό από τη βάση δεδομένων υλικών που ενσωματώνεται στο σύστημα. Σχετικά με τη μοντελοποίηση του υλικού του κοπτικού εργαλείου, οι διαθέσιμες επιλογές αφορούν άκαμπτο, καθώς και ελαστικό υλικό.

Ολόκληρη η παραπάνω διαδικασία αφορά τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος λοξής κοπής. Για τη μοντελοποίηση μεγάλης σειράς τέτοιων προβλημάτων, όπως στην περίπτωση της διάτρησης, η παραπάνω διαδικασία εκτελείται αυτοματοποιημένα. Έτσι ο χρήστης μέσω της έβδομης διεπαφής μπορεί να εισάγει ένα αρχείο με τα

Στο [Σχήμα 3.31](#) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μοντελοποίησης ενός προβλήματος λοξής κοπής. Οι επιλογές του χρήστη στο μενού είναι κατηγοριοποιημένες έτσι ώστε να υπάρχει λογική συνέχεια στα βήματα της μοντελοποίησης, απλοποιώντας έτσι περαιτέρω τη διαδικασία.



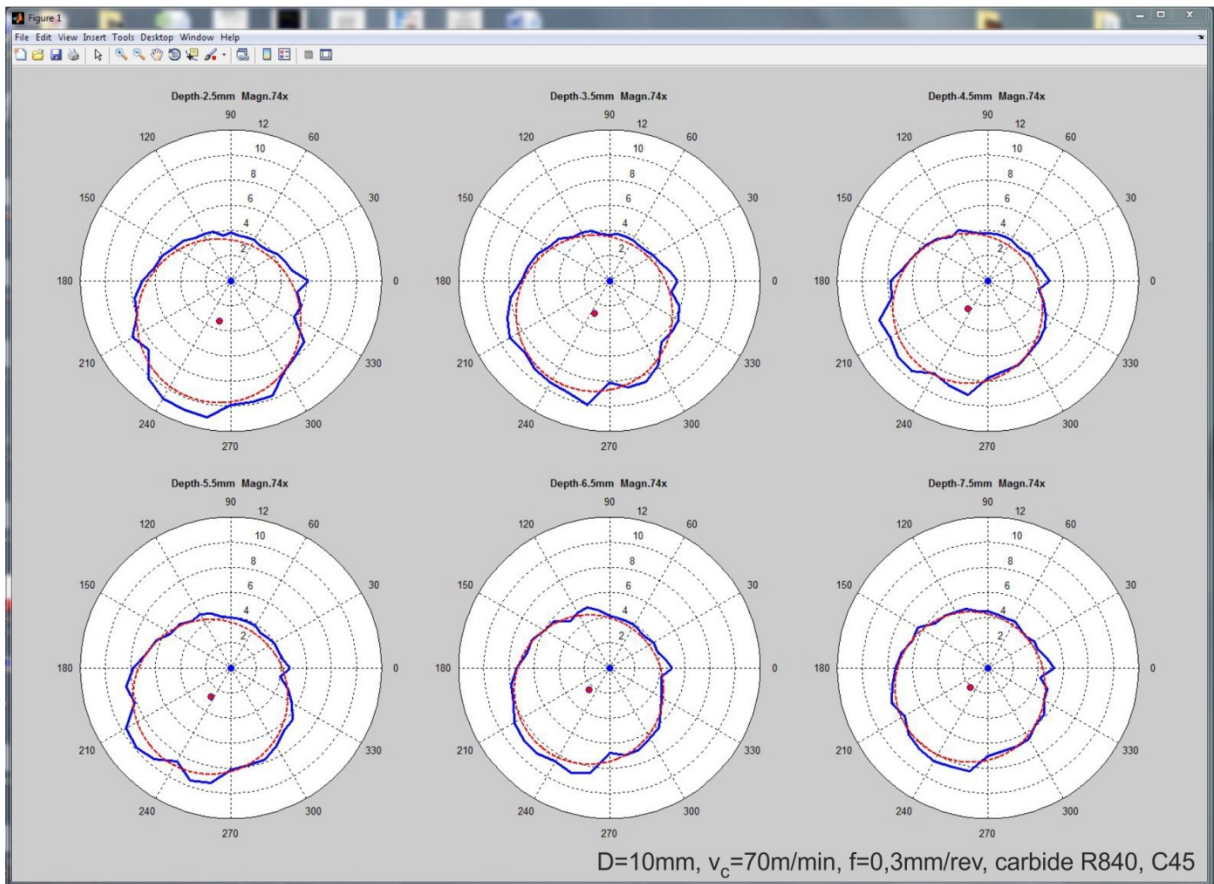
Σχήμα 3.31 Αποτέλεσμα σχεδίασης μοντέλου λοξής κοπής

3.8.3 Διεπαφή ανάλυσης κατεργασμένων οπών

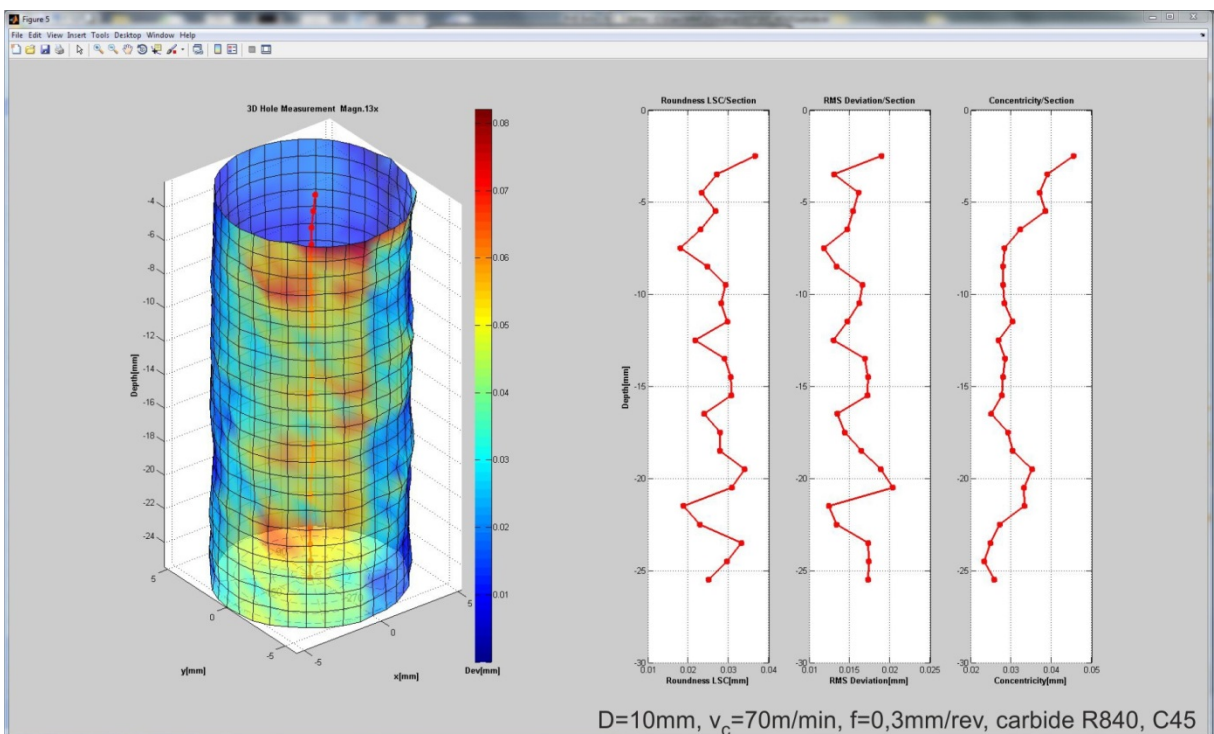
Για την ανάλυση των κατεργασμένων οπών έχει δημιουργηθεί μια διεπαφή για την επεξεργασία του αρχείου των μετρήσεων καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Η παρουσίαση των μετρήσεων σε κάθε επίπεδο μέτρησης παρουσιάζεται στο [Σχήμα 3.32](#). Το κάθε πολικό διάγραμμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό βάθος μέτρησης ενώ ο τρόπος παρουσίασής τους ακολουθεί το πρότυπο ISO 4291 [116].

Επιπλέον το πρόγραμμα κατασκευάζει την 3D οπή από τις παραπάνω δισδιάστατες μετρήσεις για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων ([Σχήμα 3.33](#)). Στο κάτω επίπεδο της 3D οπής σχεδιάζεται ένα πολικό διάγραμμα ώστε να μπορεί ο χρήστης να μελετήσει τις γωνίες στις οποίες παρουσιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις ενώ επίσης σχεδιάζονται τα τρισδιάστατα κέντρα σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Τα κέντρα αυτά υπολογίζονται σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Δεξιά της τρισδιάστατης οπής παρουσιάζονται τρία διαγράμματα: Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της κυκλικότητας σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει τη μέση τετραγωνική απόκλιση της κυκλικότητας, ενώ το τρίτο παρουσιάζει την μεταβολή της ομοκεντρικότητας σε κάθε επίπεδο μέτρησης. Τέλος, το πρόγραμμα επιστρέφει την τιμή της κυκλινδρικότητας και της ομοαξονικότητας της οπής.



Σχήμα 3.32 Αποτελέσματα μετρήσεων οπής σε διαφορετικά βάθη



Σχήμα 3.33 Τρισδιάστατη απεικόνιση κατεργασμένης οπής

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

Για την επιβεβαίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε διεξήχθησαν δύο σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη σειρά μετρήθηκε η κατανομή της δύναμης κοπής στις κύριες κόψεις και στην εγκάρσια κόψη του εργαλείου, ενώ στη δεύτερη σειρά μετρήθηκε η συνολική δύναμη κοπής. Για τη μέτρηση της κατανομής της δύναμης στις κύριες κόψεις ακολουθήθηκε ειδική πειραματική διαδικασία η οποία περιγράφεται λεπτομερέστερα στη συνέχεια.

4.1 Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των πειραμάτων επαλήθευσης του μοντέλου δυνάμεων κοπής, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που εικονίζεται στο Σχήμα 4.1 και περιλαμβάνει:

- κέντρο κατεργασιών
- διάταξη μηδενισμού και μέτρησης φθοράς εργαλείων
- δυναμόμετρο με τον αντίστοιχο ελεγκτή

Το κέντρο κατεργασιών DMU 50 διαθέτει άτρακτο 8000rpm με ισχύ 13KW και ροπή 83Nm, ενώ είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο για μέγιστη στιβαρότητα. Η εργαλειομηχανή καθοδηγείται από τον ελεγκτή Sinumerik 810D της SIEMENS. Για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών των τρυπανιών, τον έλεγχο της φθοράς και τον έλεγχο έκκεντρης πρόσδεσης των κοπτικών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115eco. Η συσκευή διαθέτει ανιχνευτή ακμών για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, γραμμικούς άξονες, πνευματική σύσφιξη των αξόνων για μέγιστη ακρίβεια, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω CMOS ψηφιακής κάμερας με τηλεσκοπικούς φακούς.



Σχήμα 4.1 Πειραματική διάταξη και εξοπλισμός

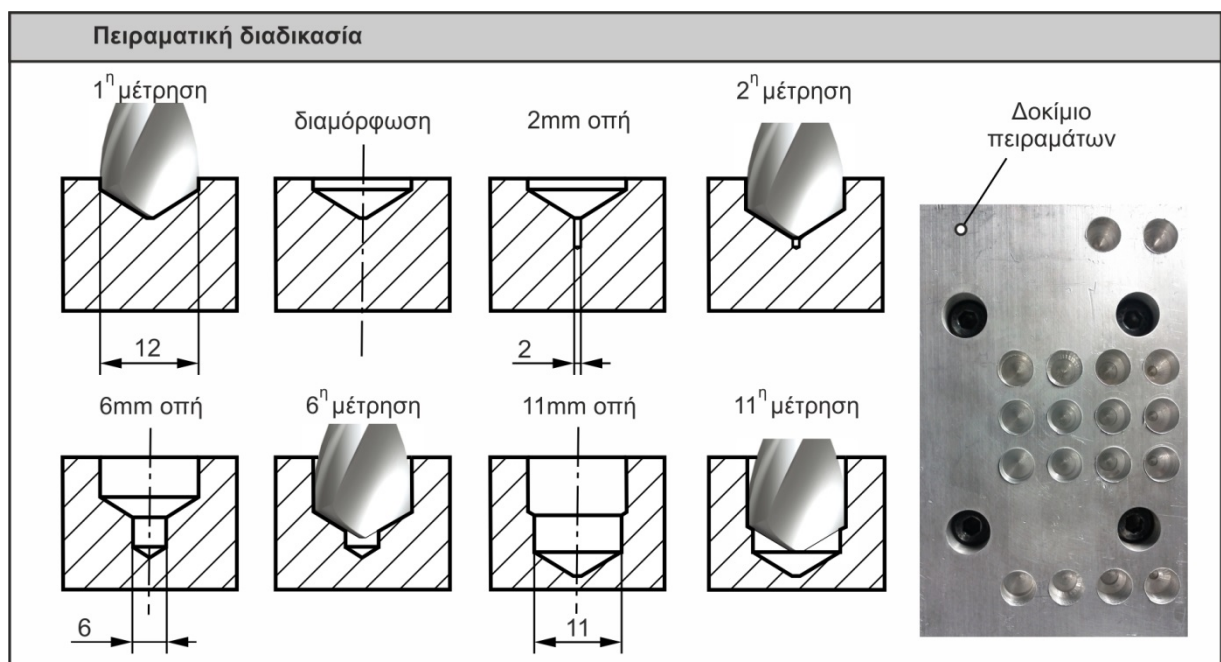
Οι δυνάμεις κοπής μετρήθηκαν με τη βοήθεια του δυναμόμετρου Kistler 9257BA. Η συσκευή αποτελείται από τέσσερις αισθητήρες τριών συνιστωσών σε προένταση που καλύπτονται από πλάκα μετάλλου με ειδικό στρώμα θερμικής μόνωσης που το καθιστούν ανεπηρέαστο από τη θερμοκρασία. Το σήμα του δυναμόμετρου επεξεργάζεται από τον ελεγκτή Kistler 5233A ανάλογα με τις κλίμακες μέτρησης που έχουν οριστεί από το χρήστη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται από Η/Υ και επεξεργάζονται από το λογισμικό

DynoWare. Τέλος τα τρυπάνια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας BOSCH κατά DIN338, κατασκευασμένα από ταχυάλυβα HSS.

Κατά τις μετρήσεις, το δυναμόμετρο εγκαταστάθηκε πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής και ευθυγραμμίστηκε ως προς τους άξονες x και y. Στη συνέχεια προσδέθηκε το δοκίμιο το οποίο προηγουμένως είχε υποστεί κατεργασία για την ασφαλή πρόσδεσή του στο πάνω μέρος του δυναμόμετρου. Τέλος ελέγχθηκε η επιπεδότητα του τεμαχίου ώστε να διασφαλιστεί ότι το εργαλείο εισέρχεται κάθετα στο τεμάχιο.

4.2 Επιβεβαίωση μοντέλου δυνάμεων

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίζει τη δύναμη κοπής και τη ροπή διάτρησης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για τη δύναμη κοπής αφού το διαθέσιμο δυναμόμετρο δεν έχει τη δυνατότητα μέτρησης ροπής. Το [Σχήμα 4.2](#) παρουσιάζει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής.

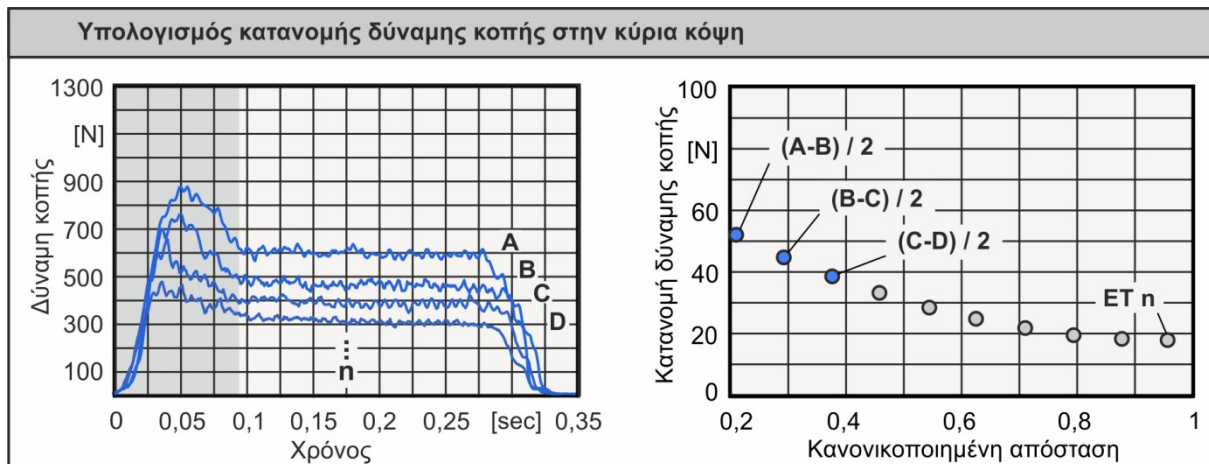


Σχήμα 4.2 Πειραματική διαδικασία επιβεβαίωσης του μοντέλου των δυνάμεων

Για το πρώτο πείραμα το τρυπάνι προωθείται στο υλικό μέχρι να εισχωρήσει ολόκληρη η κορυφή. Αυτό αποτελεί και την πρώτη δυναμομέτρηση, η οποία αναφέρεται στη συνολική δύναμη κοπής και περιλαμβάνει την επίδραση των δύο κύριων και της εγκάρσιας κόψης. Το αποτέλεσμα της πρώτης μέτρησης είναι η κωνική διαμόρφωση που φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται για την άμεση εμπλοκή των κύριων κόψεων στην κοπή, αφαιρώντας έτσι τη μεταβατική περιοχή εισχώρησης της κορυφής στο τεμάχιο. Στη συνέχεια γίνεται διάνοιξη οπής, διαμέτρου όσης το μήκος της εγκάρσιας κόψης η οποία ισούται με 2mm για την περίπτωση του εργαλείου των 12mm. Στόχος αυτής της διάνοιξης είναι να αφαιρεθεί η επίδραση της εγκάρσιας κόψης και να μετρηθεί η συνολική δύναμη μόνο των δύο κύριων κόψεων, η οποία αποτελεί τη δεύτερη μέτρηση. Η διαδικασία συνεχίζεται με διαδοχικές διανοίξεις της οπής και αντίστοιχες μετρήσεις. Οι διανοίξεις γίνονται με βήμα 1mm σε διάμετρο. Με αυτό τον τρόπο ολοένα και μικρότερο μήκος των κύριων κόψεων εμπλέκεται σε κοπή, ενώ συνολικά λαμβάνονται 11 μετρήσεις. Από τις 11 μετρήσεις, οι 10 αφορούν τις κύριες κόψεις του εργαλείου και αντιστοιχούν στις διανοίξεις οπής 3-12mm. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τους προβλεπόμενους συνδυασμούς συνθηκών κοπής.

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

Για τον προσδιορισμό της κατανομής της δύναμης κοπής στην κύρια κόψη ακολουθήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται στο Σχήμα 4.3. Στο αριστερό μέρος του σχήματος φαίνονται συγκεντρωμένες 4 από τις 10 δυναμομετρήσεις που αφορούν τις κύριες κόψεις. Η γκρι περιοχή του διαγράμματος αφορά τη μεταβατική περιοχή εισόδου του κοπτικού στο τεμάχιο. Οι τιμές των δυνάμεων προκύπτουν ως ο μέσος όρος της περιοχής πλήρους κοπής σε σταθερή κατάσταση. Το βάθος της διάτρησης παραμένει σταθερό και ως εκ τούτου ο χρόνος κατεργασίας παραμένει επίσης σταθερός για πειράματα με ίδιες συνθήκες κοπής. Η πρώτη δυναμομέτρηση αφορά την κοπή που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρες τις κύριες κόψεις, δηλαδή μετά από διάνοιξη οπής ίση με το μήκος της εγκάρσιας κόψης. Η δεύτερη αφορά την επίδραση του 90% του μήκους των κύριων κόψεων, η τρίτη του 80% και η τέταρτη του 70%. Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο η κάθε κύρια κόψη χωρίζεται σε 10 στοιχειώδη κομμάτια.



Σχήμα 4.3 Μέθοδος υπολογισμού κατανομής δύναμης κοπής

Η απόσταση του καθενός από τα 10 στοιχειώδη κομμάτια (10 διανοίξεις οπής) από το κέντρο του εργαλείου διαιρεμένη με το συνολικό μήκος του αναπτύγματος της κόψης δίνει την κανονικοποιημένη απόσταση. Το μέγεθος αυτό ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κοινό για όλα τα τρυπάνια διαφορετικής διαμέτρου και οι τιμές του κυμαίνονται από 0 το οποίο είναι το κέντρο του εργαλείου μέχρι 1 που είναι η ακτίνα. Για τον προσδιορισμό της δύναμης που δέχεται καθένα από αυτά τα 10 στοιχειώδη κομμάτια, αφαιρείται κάθε φορά η δυναμομέτρηση i από την προηγούμενή της ($i-1$) και διαιρείται με τον αριθμό των κόψεων. Έτσι υπολογίζεται η συνεισφορά της κάθε στοιχειώδους κόψης στην δύναμη κοπής και για μια μόνο κύρια κόψη. Στο σημείο αυτό γίνεται η υπόθεση πως οι δύο κύριες κόψεις είναι απολύτως συμμετρικές και ως εκ τούτου συνεισφέρουν με τον ίδιο τρόπο στην κοπή. Ένα παράδειγμα υπολογισμού φαίνεται στο δεξί τμήμα του σχήματος. Η συνεισφορά της πρώτης στοιχειώδους κόψης η οποία βρίσκεται κοντά στον κέντρο του εργαλείου, προκύπτει από το μέσο όρο της σταθερής περιοχής της δυναμομέτρησης A μείον τον μέσο όρο της σταθερής περιοχής της δυναμομέτρησης B δια τις δύο κύριες κόψεις. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθούν και οι 10 στοιχειώδεις υπολογισμοί.

4.2.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων

Η πειραματική διαδικασία επαλήθευσης των δυνάμεων κοπής περιλαμβάνει 42 πειράματα τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Τα πειράματα επαλήθευσης της κατανομής της δύναμης κοπής στην κύρια κόψη έγιναν με τρυπάνι διαμέτρου 12mm, για σταθερή ταχύτητα κοπής 80m/min και για τρεις διαφορετικές προώσεις 0,3 - 0,4 - 0,5mm/rev.

Για την επαλήθευση της συνολικής δύναμης κοπής χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά τρυπάνια διαμέτρου 12 και 14mm. Για το εργαλείο με διάμετρο 12mm εκτελέστηκαν 5 πειράματα για προώσεις 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6mm/rev και ταχύτητα κοπής 80m/min. Για να

μελετηθεί και η επίδραση της διαμέτρου έγιναν επιπλέον 3 πειράματα για προώσεις 0,3 - 0,4 - 0,5mm/rev και για την ίδια ταχύτητα κοπής.

Πείραμα	Διάμετρος εργαλείου [mm]	Διάμετρος οπής οδηγού [mm]	f [mm/rev]	Πείραμα	Διάμετρος εργαλείου [mm]	Διάμετρος οπής οδηγού [mm]	f [mm/rev]
1	12	-	0,3	22	12	11	0,4
2	12	2	0,3	23	12	-	0,5
3	12	3	0,3	24	12	2	0,5
4	12	4	0,3	25	12	3	0,5
5	12	5	0,3	26	12	4	0,5
6	12	6	0,3	27	12	5	0,5
7	12	7	0,3	28	12	6	0,5
8	12	8	0,3	29	12	7	0,5
9	12	9	0,3	30	12	8	0,5
10	12	10	0,3	31	12	9	0,5
11	12	11	0,3	32	12	10	0,5
12	12	-	0,4	33	12	11	0,5
13	12	2	0,4	34	12	-	0,2
14	12	3	0,4	35	12	-	0,6
15	12	4	0,4	36	14	-	0,3
16	12	5	0,4	37	14	-	0,4
17	12	6	0,4	38	14	-	0,5
18	12	7	0,4	39	12	2	0,2
19	12	8	0,4	40	12	2	0,6
20	12	9	0,4	41	14	2.5	0,3
21	12	10	0,4	42	14	2.5	0,4

Πίνακας 4.1 Συνθήκες κοπής των πειραμάτων

Η επιλογή των παραπάνω τιμών έγινε με γνώμονα την αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού καλύπτοντας μεγάλο εύρος προώσεων. Μεγαλύτερες τιμές πρόωσης ή ταχύτητας κοπής παρατηρήθηκε ότι οδηγούν σε γρήγορη φθορά του εργαλείου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγινε χρήση ειδικού ψυκτικού υγρού για κοπές σε αλουμίνιο (cimcool- cimstar 620), ώστε να αποφευχθεί η φθορά του κοπτικού εργαλείου και να ελαχιστοποιηθεί η παραγόμενη θερμότητα. Επίσης, μετά το τέλος κάθε πειράματος, το κοπτικό εργαλείο εξετάζονταν και σε περίπτωση φθοράς γινόταν αντικατάστασή του.

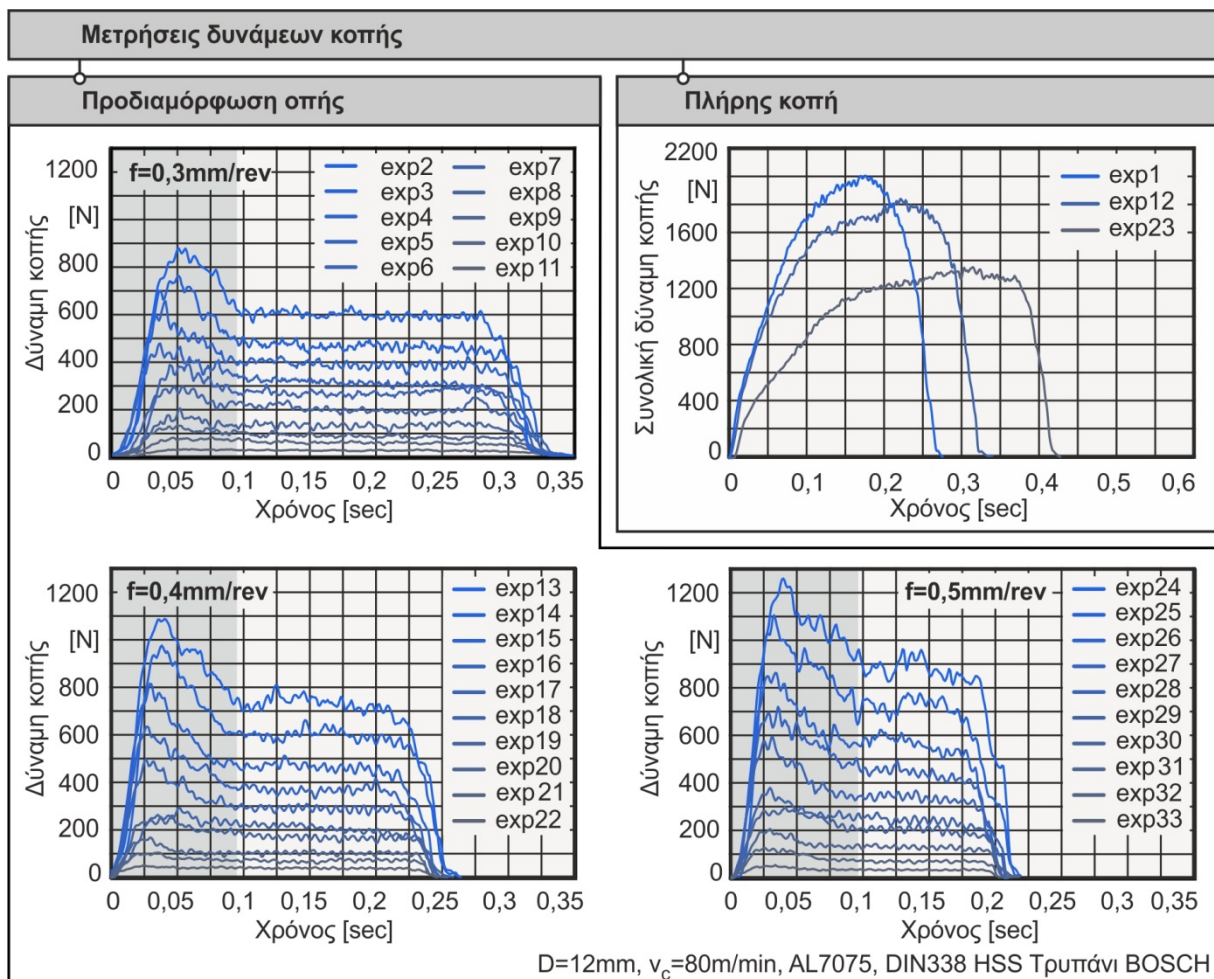
4.2.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των δυναμομετρήσεων που διεξήχθησαν για το εργαλείο διαμέτρου 12mm παρουσιάζονται στο [Σχήμα 4.4](#). Στο δεξί μέρος του σχήματος παρουσιάζονται οι δυναμομετρήσεις της συνολικής δύναμης κοπής ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα αφορούν την κατανομή στις κύριες κόψεις. Από τη σύγκριση μεταξύ των δύο τύπων γραφημάτων προκύπτει ότι η επίδραση της εγκάρσιας κόψης στη δύναμη κοπής είναι της τάξης του 60% της συνολικής δύναμης. Αυτό οφείλεται στην πολύ μεγάλη αρνητική γωνία αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης σε συνδυασμό με τις πολύ μικρές ταχύτητες κοπής. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της εγκάρσιας κόψης αυξάνεται αναλόγως και η συνεισφορά της.

Τα διαγράμματα μετρήσεων προδιαμορφωμένης οπής αποτελούνται από 10 δυναμομετρήσεις το καθένα. Η προδιαμόρφωση της οπής αναφέρεται στη συμμετρική διάνοιξή της, με τρυπάνι μικρότερης διαμέτρου από το εξεταζόμενο εργαλείο. Το κάθε διάγραμμα αποτελείται από το μεταβατικό τμήμα με γκρι χρώμα και το τμήμα της πλήρους

κοπτικής δράσης. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της διάνοιξης, τόσο μικρότερο μέρος της κόπης εμπλέκεται σε κοπή και συνεπώς οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις μειώνονται. Επίσης, με αύξηση της πρόωσης παρατηρείται αύξηση της δύναμης κοπής και μείωση του χρόνου. Το προκαθορισμένο βάθος κοπής παρέμεινε σταθερό και επιλέχθηκε έτσι ώστε να υπάρχει ο απαραίτητος χρόνος σταθεροποίησης της μετρούμενης δύναμης.

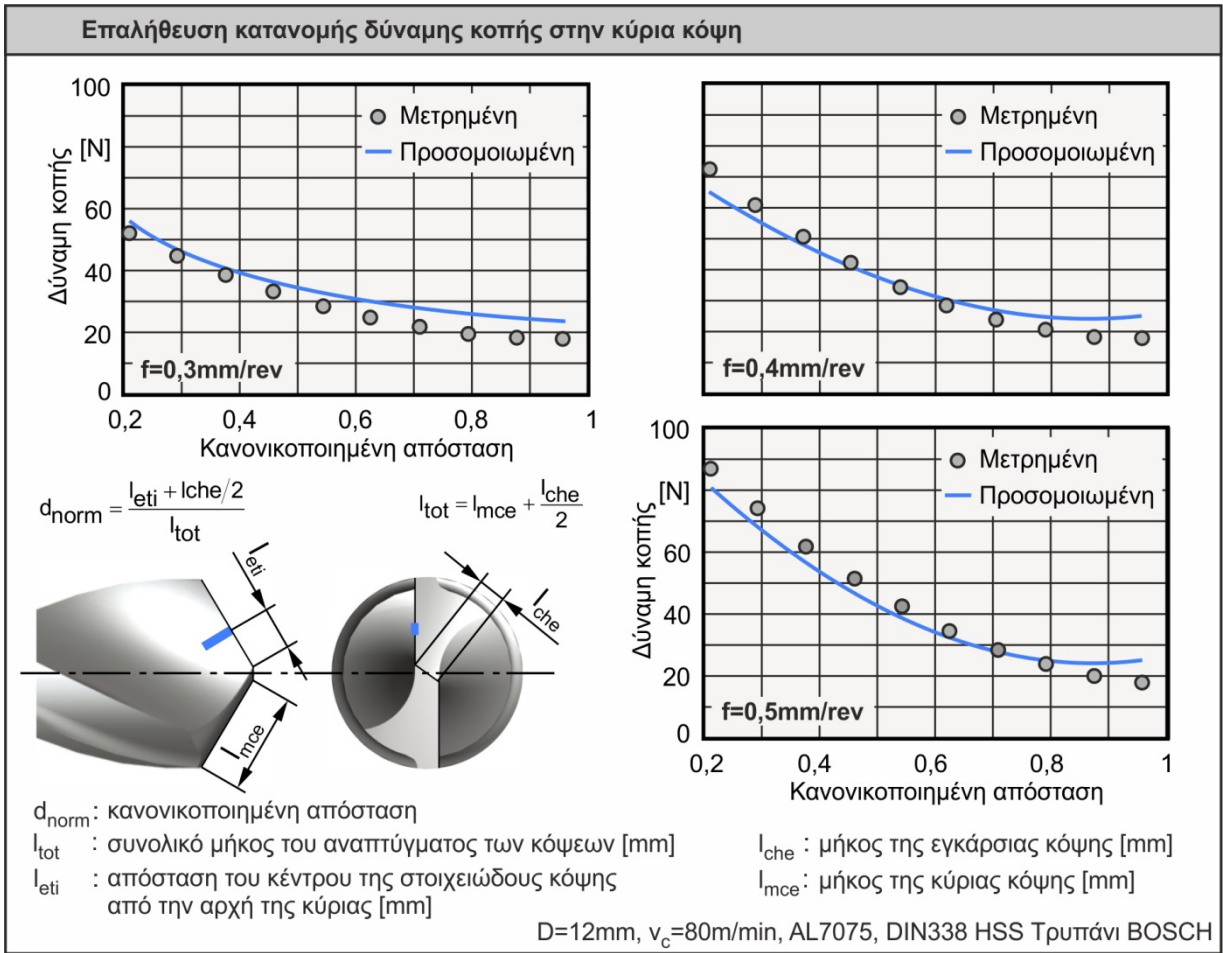
Οι δυνάμεις που ασκούνται στο επίπεδο xy που βρίσκεται κάθετα στον άξονα του εργαλείου είναι μηδενικές. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη, αφού λόγω της συμμετρίας του εργαλείου οι δυνάμεις αυτές αλληλοεξουδετερώνονται, επιβεβαιώνοντας έτσι και τη σωστή πρόσδεση του εργαλείου. Καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων τα απόβλιπτα συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν ως προς τη μορφή, το πάχος και το πλάτος τους και συγκρίθηκαν με τις εκάστοτε δυνάμεις κοπής. Το πάχος αποβλίπτου είναι υπεύθυνο για μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής, το πλάτος του για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης κοπής και η μορφή του για τυχόν παρουσία ταλαντώσεων.



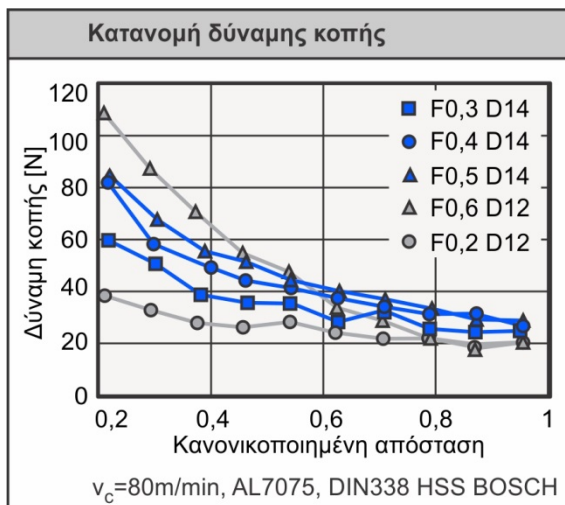
Σχήμα 4.4 Δυναμομετρήσεις σε πλήρη και προδιαμορφωμένη οπή

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης. Επισημαίνεται πως η γραμμή των προσομοιωμένων τιμών προέρχεται από δεύτερου βαθμού παρεμβολή των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Η κανονικοποιημένη απόσταση ορίζεται με βάση το ανάπτυγμα της κόπης και το μέσο κάθε στοιχειώδους εργαλείου. Η θέση κάθε στοιχειώδους κόπης ορίζεται ως η απόσταση από το μέσο της έως την αρχή της ανεπτυγμένης κόπης δια το συνολικό μήκος της ανεπτυγμένης κόπης. Το συνολικό μήκος

της ανεπτυγμένης κόψης ορίζεται ως το άθροισμα του μήκους της κύριας κόψης συν το μήκος της μισής εγκάρσιας.



Σχήμα 4.5 Επαλήθευση αποτελεσμάτων κατανομής της δύναμης κοπής



Σχήμα 4.6 Κατανομές δυνάμεων κοπής

της πρόωσης των 0,4mm/rev η δύναμη που προκύπτει από το μοντέλο προσομοίωσης κυμαίνεται από 65N μέχρι 25N στην περιφέρεια του εργαλείου, ενώ για την πρόωση των 0,5mm/rev η δύναμη κοπής κυμαίνεται από 80N έως 26N. Από τα παραπάνω αποτελέσματα

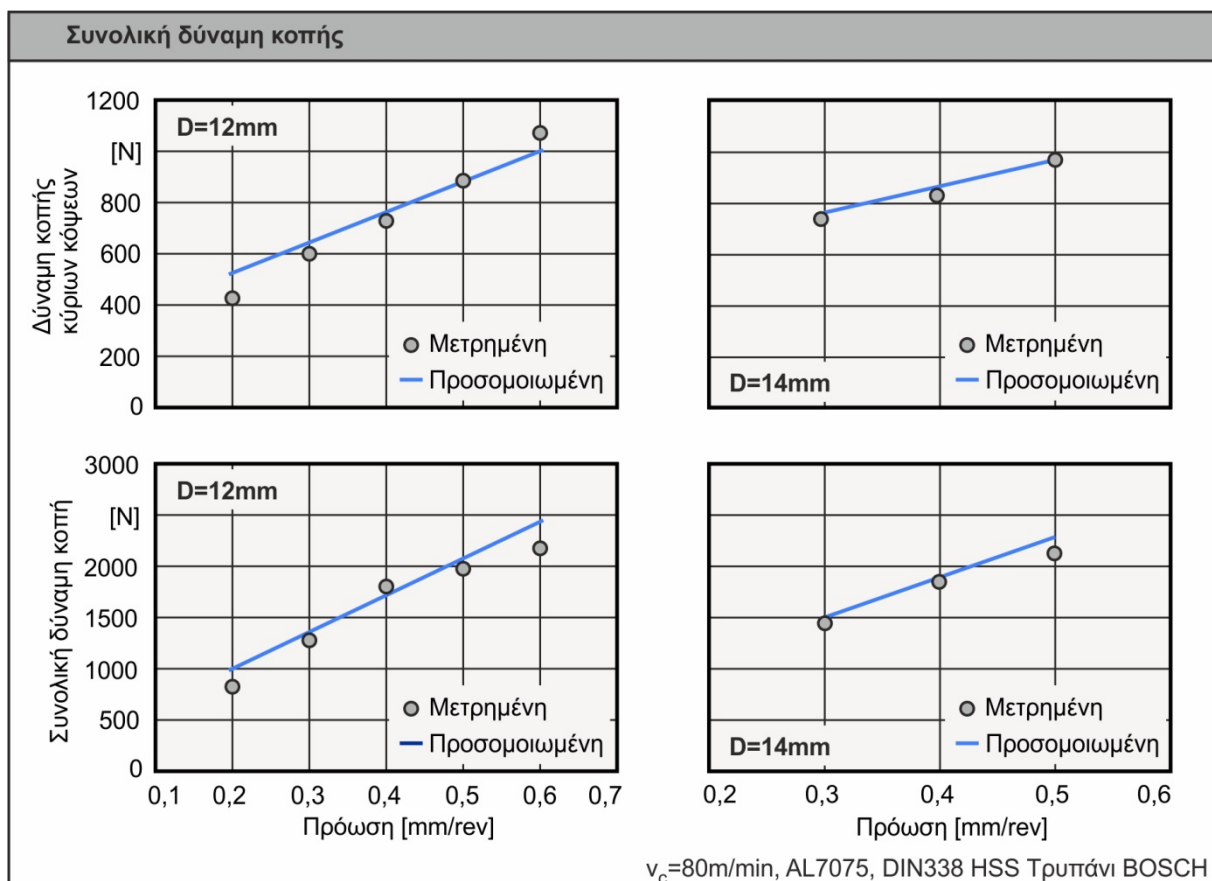
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά. Πιο συγκεκριμένα για $f=0,3\text{mm/rev}$ το μοντέλο φαίνεται να υπολογίζει ελάχιστα μεγαλύτερη δύναμη κοπής κατά μήκος όλης της κόψης και ιδιαίτερα κοντά στην περιφέρεια. Η κατανομή της δύναμης κοπής κυμαίνεται από 55N για το πρώτο στοιχειώδες μοντέλο μέχρι 23N για το τελευταίο στοιχειώδες μοντέλο της κύριας κόψης.

Για $f=0,4\text{mm/rev}$ καθώς και για $f=0,5\text{mm/rev}$ το μοντέλο υπολογίζει ελάχιστα μεγαλύτερη δύναμη κοπής κοντά στην περιφέρεια και την ελάχιστα μικρότερη κοντά στον άξονα περιστροφής του εργαλείου. Στην περίπτωση

παρατηρείται πως η αύξηση της πρόωσης οδηγεί σε αύξηση της δύναμης κοπής στο τμήμα των κύριων κόψεων που βρίσκονται κοντά στον άξονα περιστροφής του εργαλείου, ενώ παραμένει σταθερή στην περιφέρεια.

Για να γίνει περαιτέρω επαλήθευση του μοντέλου εξετάστηκαν δύο επιπλέον προώσεις για το εργαλείο διαμέτρου 12mm και τρεις για το εργαλείο διαμέτρου 14mm, με επίσης πολύ καλά αποτελέσματα. Οι περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6 όπου φαίνονται οι κατανομές των δυνάμεων που προέκυψαν από το μοντέλο DIATRISIS. Το άθροισμα των στοιχειωδών αυτών δυνάμεων πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των κόψεων του εργαλείου έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική δύναμη κοπής των κύριων κόψεων.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της δύναμης κοπής στις κύριες κόψεις αλλά και συνολικά. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προσομοιωμένων και των αντίστοιχα μετρημένων τιμών. Η ευθεία των προσομοιωμένων τιμών προκύπτει από γραμμική παρεμβολή στα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου. Επισημαίνεται ότι το κάθε αποτέλεσμα του μοντέλου για τη συνολική δύναμη κοπής προκύπτει από το άθροισμα 12 προσομοιώσεων, ενώ για τη δύναμη κοπής στις κύριες κόψεις από το άθροισμα 10 προσομοιώσεων.



Σχήμα 4.7 Επαλήθευση αποτελεσμάτων της συνολικής δύναμης κοπής

5

Μοντέλο Ανάλυσης Εργαλείου και Οπής

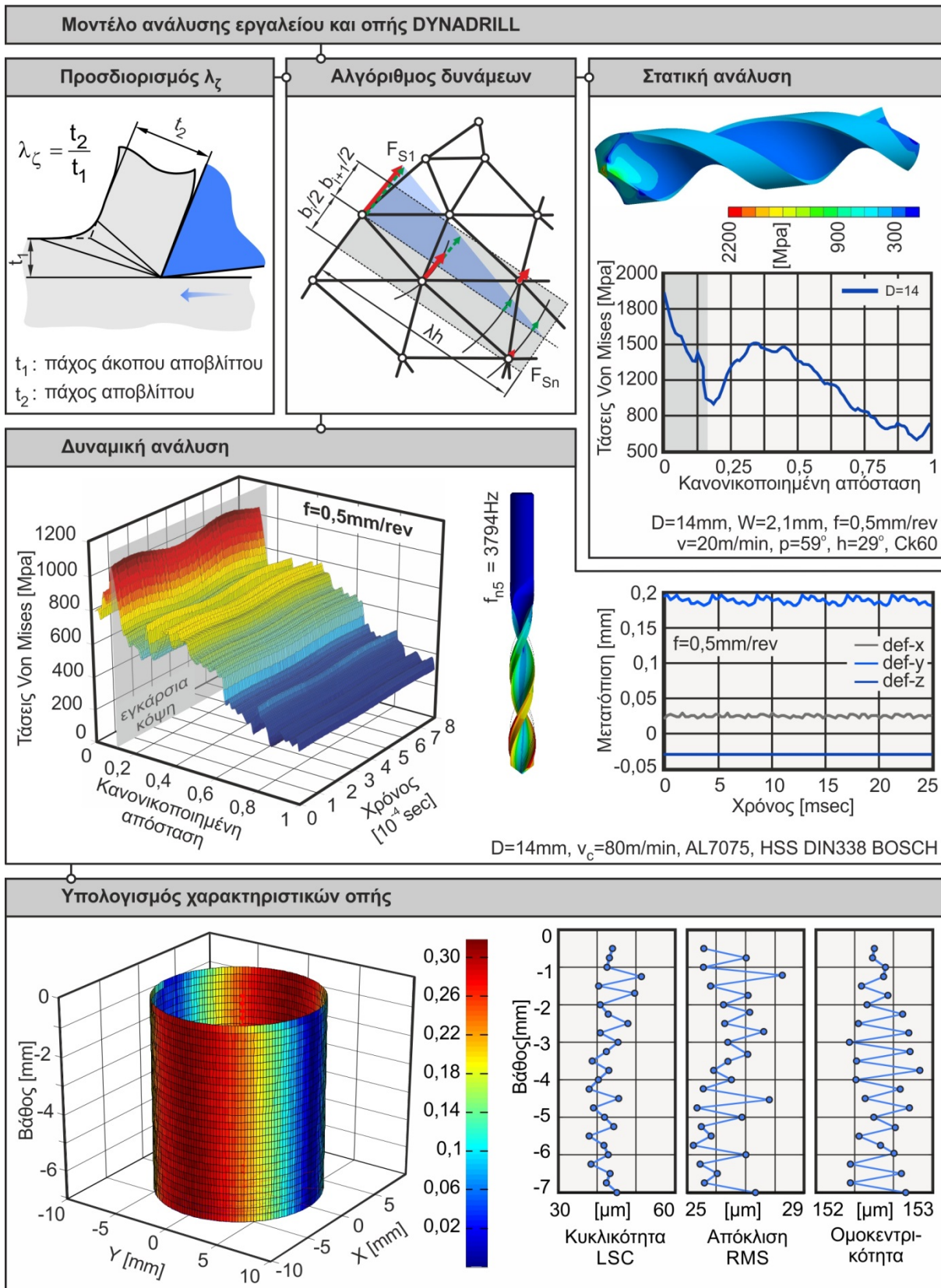
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εκτενής ανάλυση του εργαλείου και της κατεργασμένης οπής με τη βοήθεια του μοντέλου DYNADRILL. Η ανάλυση του εργαλείου περιλαμβάνει τη μελέτη των μετατοπίσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται, κάνοντας χρήση ειδικών αλγορίθμων προεπεξεργασίας και μεταεπεξεργασίας που αναπτύχθηκαν. Η ανάλυση της οπής περιλαμβάνει τη μελέτη των χαρακτηριστικών της και βασίζεται σε ένα νέο αλγόριθμο μεταεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του εργαλείου που προτείνεται.

Λεπτομερέστερα, στο [Σχήμα 5.1](#) παρουσιάζονται τα στάδια της διαδικασίας ανάλυσης του εργαλείου και της οπής του μοντέλου DYNADRILL. Ο πυρήνας του μοντέλου αποτελείται από έναν αλγόριθμο κατανομής των δυνάμεων κοπής στις κόψεις και τις παρειές του εργαλείου. Οι δυνάμεις προκύπτουν είτε από μοντέλα προσομοίωσης (DIATRISIS, DRILL3D κ.α.), είτε από δυναμομετρήσεις. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος για να υπολογίσει το μήκος της επαφής του αποβλίττου με το κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιεί τον συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια μόνο πειραματικά. Έτσι αναπτύχθηκε μια πρότυπη διάταξη μέτρησης του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου η οποία χρησιμοποιεί κάμερα υψηλής ταχύτητας. Ο παραπάνω αλγόριθμος ενσωματώθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης ANSYS μειώνοντας έτσι δραστικά το χρόνο προεπεξεργασίας του μοντέλου αφού τα απαιτούμενα στάδια προεπεξεργασίας γίνονται χωρίς την παρέμβαση εξωτερικών προγραμμάτων.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την στατική ανάλυση του εργαλείου. Στο στάδιο αυτό το εργαλείο διακριτοποιείται με μεγάλη ακρίβεια, αφού η επίλυση του στατικού μοντέλου δεν απαιτεί υψηλούς υπολογιστικούς πόρους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης περιλαμβάνουν τις μέγιστες τάσεις και μετατοπίσεις, καθώς και την κατανομή τους στις παρειές του εργαλείου.

Εκτός από τη στατική ανάλυση το μοντέλο DYNADRILL χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο κατανομής των δυνάμεων κοπής για να αναλύσει δυναμικά το εργαλείο. Το πρώτο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης περιλαμβάνει τη μελέτη των ιδιομορφών και τον ιδιοσυχνοτήτων. Για να ολοκληρωθεί η περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς του εργαλείου διεξάγεται αρμονική ανάλυση ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιομορφές που συμμετέχουν στην κοπή και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητές τους. Αφού καθοριστούν οι παράμετροι της προσομοίωσης, γίνεται η κατανομή των δυναμικών φορτίσεων στις παρειές του εργαλείου συναρτήσει του χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτού του σταδίου περιλαμβάνουν τις τάσεις και τις μετατοπίσεις συναρτήσει του χρόνου. Για την μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των γραφημάτων των τάσεων και των μετατοπίσεων αναπτύχθηκε κώδικας του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο τελευταίο στάδιο του μοντέλου.

Το τελευταίο στάδιο του μοντέλου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της κατεργασμένης οπής. Το στάδιο αυτό βασίζεται στις δυναμικές μετατοπίσεις που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση του εργαλείου, ενώ για τους υπολογισμούς αναπτύχθηκε πρόγραμμα μεταεπεξεργασίας. Τα χαρακτηριστικά που υπολογίζονται περιλαμβάνουν της κυκλικότητα, την κυλινδρικήτητα, την ομοαξονικότητα και την ομοκεντρικότητα. Οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν την παρεμβολή των τρισδιάστατων μετατοπίσεων στις τροχιές που διαγράφουν τα δύο άκρα των κόψεων του εργαλείου και στη συνέχεια τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα ISO.

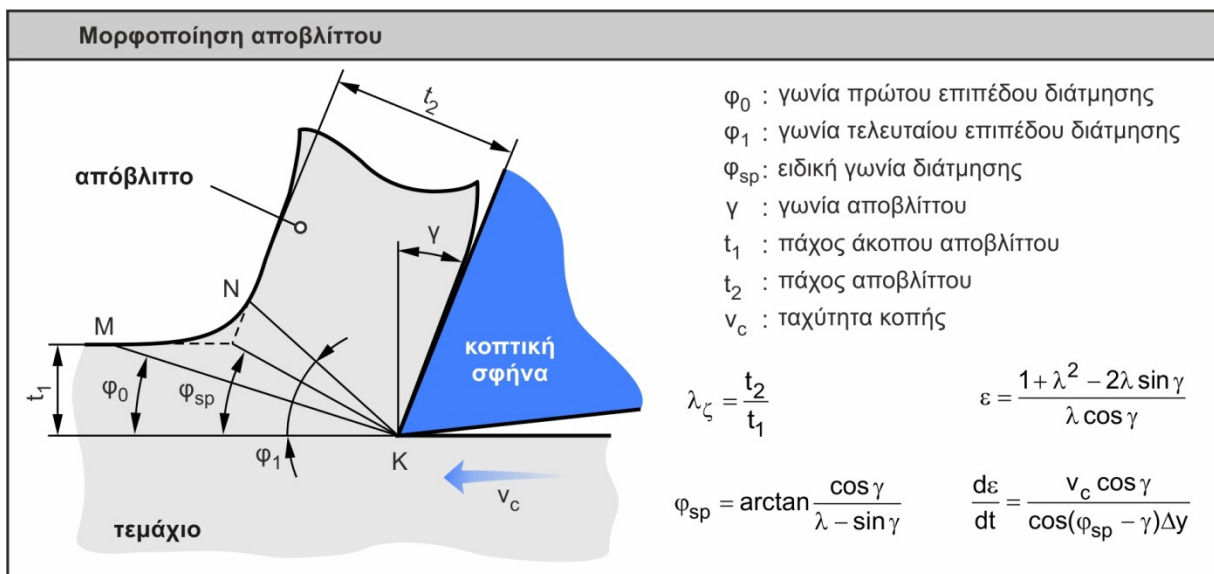


Σχήμα 5.1 Βασικά στάδια ανάλυσης του εργαλείου και της οπής του μοντέλου DYNADRILL

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

5.1 Πειραματική διερεύνηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου

Ένα σημαντικό στοιχείο της εισόδου του αλγορίθμου προεπεξεργασίας για την ανάλυση του εργαλείου αποτελεί ο συντελεστής συμπίεσης αποβλίττου. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί ένα μέτρο της πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το κατεργαζόμενο υλικό και χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία για τον προσδιορισμό του μήκους της επαφής του αποβλίττου με το κοπτικό εργαλείο [97, 117]. Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τους ορισμούς του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου, της διατμητικής παραμόρφωσης και του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης αποβλίττου. Η διατμητική παραμόρφωση αποτελεί ένα εναλλακτικό μέτρο της πλαστικής παραμόρφωσης του αποβλίττου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου. Στη συγκεκριμένη εργασία προτιμήθηκε η χρήση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς του σε ακραίες τιμές παραμορφώσεων [117, 118].



Σχήμα 5.2 Γωνία διάτμησης και λόγος συμπίεσης αποβλίττου

Ο ορισμός του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου είναι απλός και προσδιορίζεται ως το πηλίκο του πάχους αποβλίττου προς το πάχος του άκοπου αποβλίττου. Βάσει αυτού του συντελεστή μπορούν να υπολογιστούν επίσης η διατμητική παραμόρφωση, η γωνία διάτμησης και ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου είναι η ταχύτητα κοπής, η γωνία αποβλίττου, η πρόωση, η χρήση υγρών κοπής και η θερμοκρασία. Ο Degner και οι συνεργάτες του [119] παρατήρησαν πως η τιμή του συντελεστή μειώνεται με αύξηση της πρόωσης, με αύξηση της ταχύτητας κοπής και με αύξηση της γωνίας διάτμησης, ενώ αυξάνεται ελάχιστα με την αύξηση της γωνίας αποβλίττου. Οι Astakhov και Shvets [120] παρατήρησαν πως η ταχύτητα κοπής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το συντελεστή και μάλιστα με μη γραμμικό τρόπο ενώ στη συνέχεια παρατήρησαν πως η μη γραμμική συμπεριφορά οφείλεται στο σχηματισμό ψευδοκοπής στο εργαλείο.

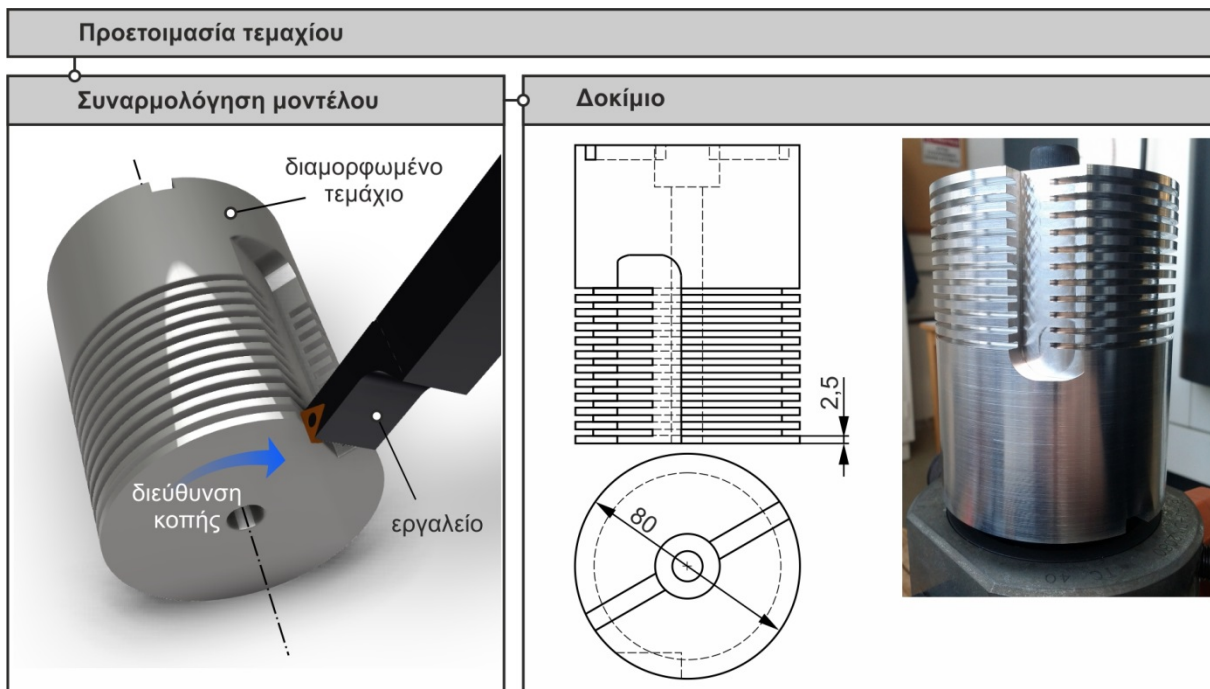
Λόγω της επίδρασης όλων αυτών των παραμέτρων, δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο που να δίνει ακριβή αποτελέσματα. Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

5.1.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για τη μέτρηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου βασίζεται στη χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών. Η διεθνής

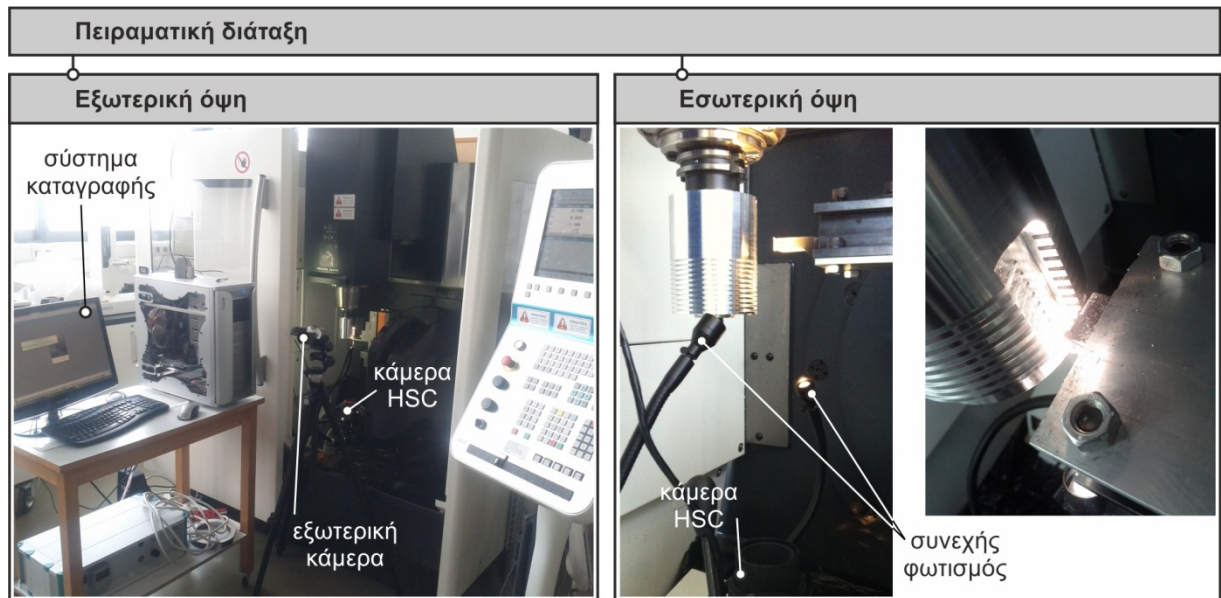
επιστημονική κοινότητα έχει προτείνει διάφορες παρόμοιες διατάξεις βασισμένες σε τόνρο [121-125]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε μια παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου, υλοποιούμενη στο πενταξονικό κέντρο κατεργασιών DMU 50 της DMG. Για να υλοποιηθεί η μέθοδος έπρεπε η κινηματική της φραιζας να μετατραπεί σε κινηματική τόννου. Αυτό προϋποθέτει τη συγκράτηση του τεμαχίου στην άτρακτο της μηχανής, τη συγκράτηση του κοπτικού εργαλείου στην τράπεζα, καθώς και την ανάπτυξη αντίστοιχου πρωτοκόλλου για τον έλεγχο της νέας κινηματικής. Για όλα τα παραπάνω αναπτύχθηκαν αντίστοιχες ιδιοκατασκευές.

Στο [Σχήμα 5.3](#) παρουσιάζεται το τεμάχιο AL7075 διαμέτρου 80mm με την κατάλληλη προετοιμασία που υπέστη ώστε να προσδεθεί σε κώνο συγκράτησης SK40 κατά DIN69871. Μετά την πρόσδεσή του στον κώνο, η κυλινδρική του επιφάνεια υπέστη κατεργασία ώστε να εξαλειφθεί τυχόν εκκεντρότητα. Στη συνέχεια χωρίστηκαν 11 δισκοειδή δοκίμια, ενώ κατεργάστηκε και μια διαμόρφωση παράλληλα με τον άξονα περιστροφής του τεμαχίου. Ο ρόλος της διαμόρφωσης εικονίζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος και σχετίζεται με την εισαγωγή του εργαλείου ώστε να πάρει το κατάλληλο βάθος κοπής πριν ξεκινήσει η περιστροφή του τεμαχίου. Η διαδικασία αυτή γίνεται ώστε να διασφαλιστούν ορθογωνικές συνθήκες κοπής, ενώ σε περίπτωση σταδιακής εισχώρησης του εργαλείου θα γινόταν τόννευση και θα μεταβαλλόταν αντίστοιχα και το διάνυσμα της ταχύτητας κοπής.



Σχήμα 5.3 Προετοιμασία δοκιμίου AL7075

Αναφορικά με τη συγκράτηση του κοπτικού εργαλείου στην τράπεζα, αυτή έγινε με τη βοήθεια ειδικού εξαρτήματος συγκράτησης για τόννευση που συνοδεύει το δυναμόμετρο. Στο εξάρτημα αυτό προσαρτήθηκε πλάκα μετάλλου ώστε να διασφαλιστεί η επαρκής στήριξη του κοπτικού εργαλείου από όλες τις κατευθύνσεις, ελαχιστοποιώντας έτσι τις ταλαντώσεις του συστήματος. Το σύστημα κοπτικού εργαλείου - δοκιμίου εικονίζεται στο δεξί τμήμα του [Σχήματος 5.4](#). Κάτω από το κοπτικό εργαλείο τοποθετήθηκε η κάμερα υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών (HSC) καθώς επίσης και η πηγή συνεχούς φωτισμού. Η κάμερα συνδέθηκε με Η/Υ ο οποίος μέσω κατάλληλου λογισμικού κατέγραφε την πειραματική διαδικασία, ενώ μια εξωτερική κάμερα χρησιμοποιήθηκε για μακροσκοπική καταγραφή της κατεργασίας.



Σχήμα 5.4 Πειραματική διάταξη μέτρησης του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου

Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η MotionBLITZ EoSens mini2 της εταιρίας Microtron με αισθητήρα CMOS 1696x1710pixels, ικανή για λήψεις μέχρι 200.000fps. Ο συνολικός χρόνος καταγραφής αγγίζει τα 3sec σε πλήρη ανάλυση, ενώ η ταχύτητα του κλείστρου μπορεί να ρυθμιστεί στο εύρος 2μs-1sec. Στην κάμερα προσαρμόστηκε επίσης κατάλληλος φακός της εταιρίας SIGMA με ελάχιστη εστιακή απόσταση 300mm. Η πηγή ψυχρού φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι η KL2500 LCD της εταιρίας SCHOTT, με μέγιστη ροή φωτός 1300lm.

5.1.2 Σχεδιασμός των πειραμάτων

Για τη μελέτη του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου πραγματοποιήθηκαν 60 πειράματα. Οι συνθήκες των πειραμάτων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βαθών a_p και ταχυτήτων κοπής v_c για τρεις διαφορετικές γωνίες αποβλίττου γ . Οι γωνίες αποβλίττου που μελετήθηκαν ήταν 0° , 3° και 6° , για βάθη κοπής 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5mm και για ταχύτητες κοπής 100, 80, 60, 40 και 20m/min, ενώ δε χρησιμοποιήθηκε ψυκτικό υγρό.

Πείραμα	v_c [m/min]	a_p [mm]	γ [deg]	Πείραμα	v_c [m/min]	a_p [mm]	γ [deg]	Πείραμα	v_c [m/min]	a_p [mm]	γ [deg]
1	100	0,2	6	21	100	0,2	3	41	100	0,2	0
2	100	0,3	6	22	100	0,3	3	42	100	0,3	0
3	100	0,4	6	23	100	0,4	3	43	100	0,4	0
4	100	0,5	6	24	100	0,5	3	44	100	0,5	0
5	80	0,2	6	25	80	0,2	3	45	80	0,2	0
6	80	0,3	6	26	80	0,3	3	46	80	0,3	0
7	80	0,4	6	27	80	0,4	3	47	80	0,4	0
8	80	0,5	6	28	80	0,5	3	48	80	0,5	0
9	60	0,2	6	29	60	0,2	3	49	60	0,2	0
10	60	0,3	6	30	60	0,3	3	50	60	0,3	0
11	60	0,4	6	31	60	0,4	3	51	60	0,4	0
12	60	0,5	6	32	60	0,5	3	52	60	0,5	0

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

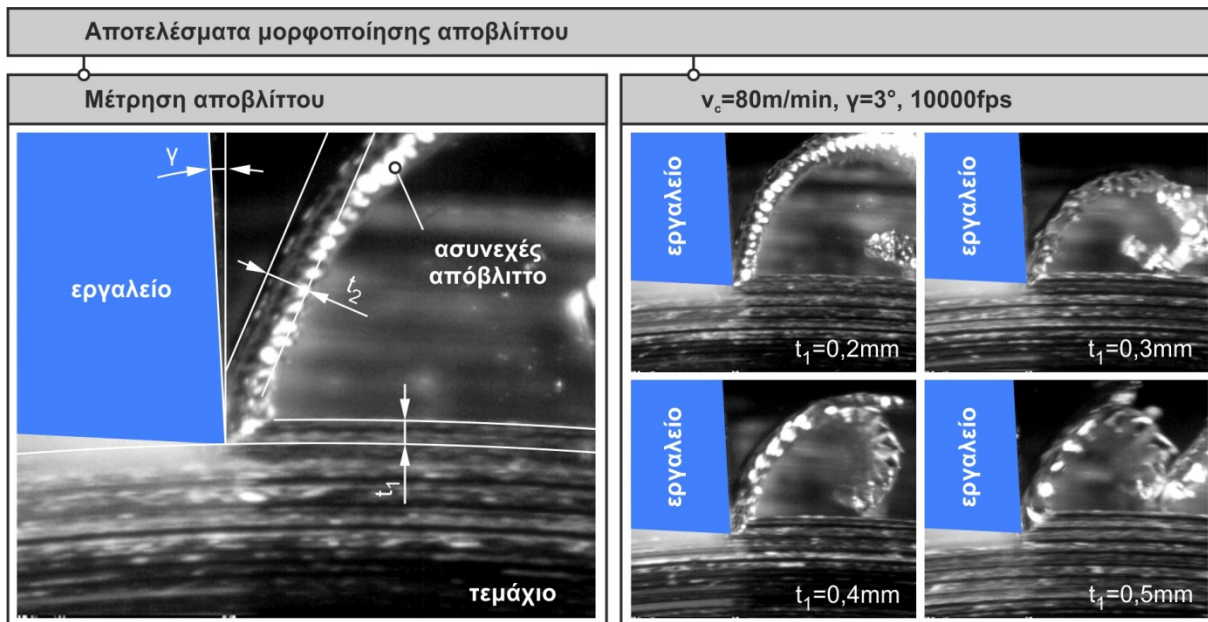
13	40	0,2	6	33	40	0,2	3	53	40	0,2	0
14	40	0,3	6	34	40	0,3	3	54	40	0,3	0
15	40	0,4	6	35	40	0,4	3	55	40	0,4	0
16	40	0,5	6	36	40	0,5	3	56	40	0,5	0
17	20	0,2	6	37	20	0,2	3	57	20	0,2	0
18	20	0,3	6	38	20	0,3	3	58	20	0,3	0
19	20	0,4	6	39	20	0,4	3	59	20	0,4	0
20	20	0,5	6	40	20	0,5	3	60	20	0,5	0

Πίνακας 5.1 Παράμετροι κοπής των πειραμάτων μέτρησης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η ταχύτητα λήψης της κάμερας ρυθμίστηκε στα 10.000fps, η ταχύτητα του κλείστρου στα 62μs με ανάλυση της εικόνας στα 272x228pixels. Ο έλεγχος και η επιλογή της περιοχής καταγραφής αλλά και η ρύθμιση των παραμέτρων έγινε μέσω ειδικού λογισμικού της MotionBLITZ.

5.1.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων αποτελούνται από σειρές εικόνων ορθογωνικής κοπής. Τα άμεσα συμπεράσματα από την παρατήρηση των εικόνων σχετίζονται με τη μορφοποίηση και το είδος του παραγόμενου αποβλίττου. Ο υπολογισμός των υπόλοιπων μεγεθών απαιτεί μετρήσεις επί των εικόνων. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνων και βάσει αυτών υπολογίστηκε ο συντελεστής συμπίεσης αποβλίττου. Στο [Σχήμα 5.5](#) εικονίζονται κάποια παραδείγματα μέτρησης για συγκεκριμένες συνθήκες κοπής.

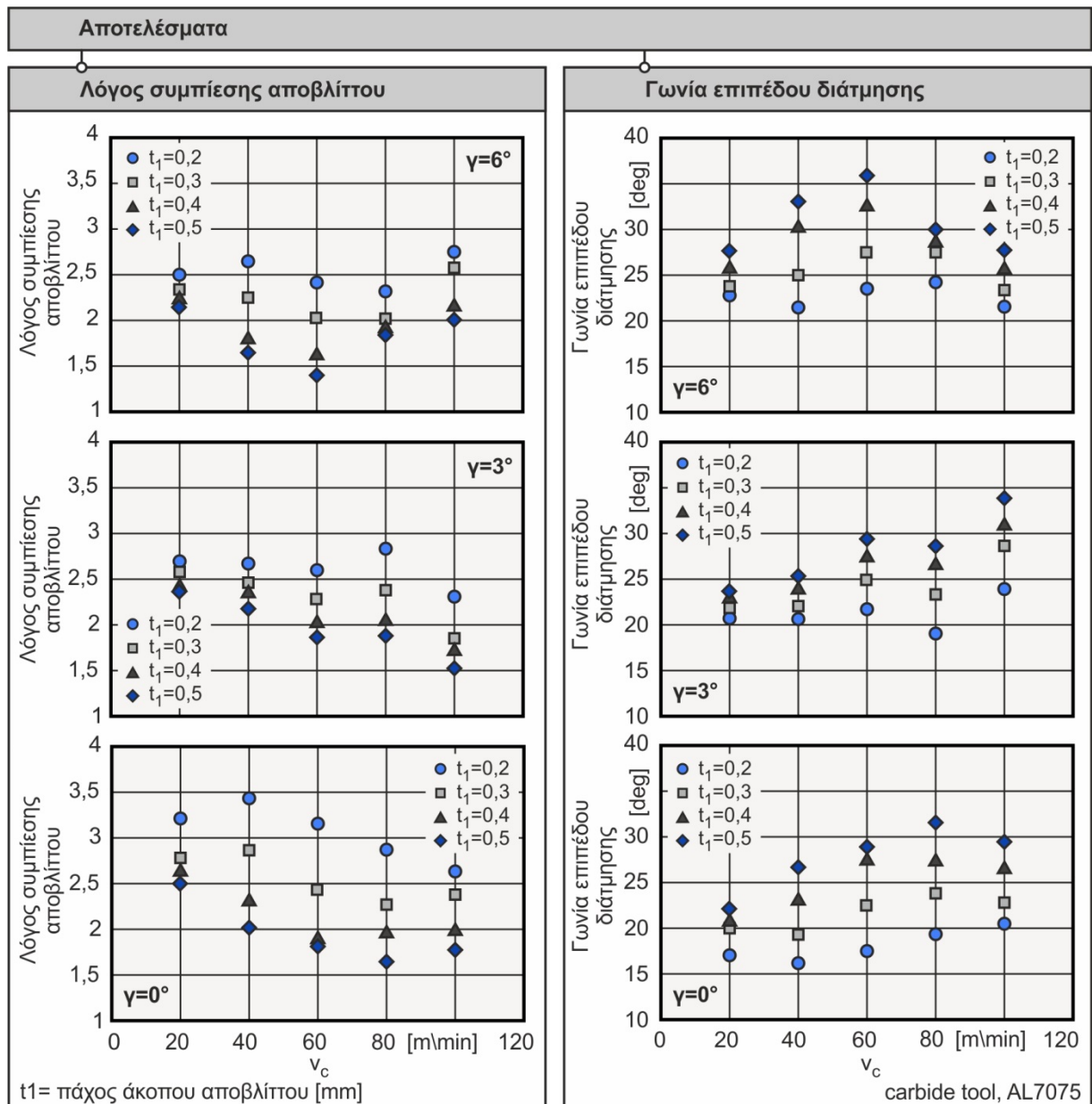


Σχήμα 5.5 Αποτελέσματα μετρήσεων αποβλίττου

Στο αριστερό μέρος του σχήματος 5.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μέτρησης αποβλίττου όπου το t_1 ισούται με το πάχος του άκοπου αποβλίττου και το t_2 με το πάχος του παραμορφωμένου αποβλίττου. Για την επιβεβαίωση των πειραμάτων μετράται επίσης και η γωνία αποβλίττου γ για να επιβεβαιωθεί η σωστή τοποθέτηση του κοπτικού σε σχέση με το τεμάχιο. Το δεξί μέρος του σχήματος 5.5 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μορφοποίησης

αποβλίττου για συγκεκριμένες συνθήκες κοπής και διαφορετικά βάθη t_1 , όπου παρατηρείται πως η αύξηση του πάχους του άκοππου αποβλίττου δεν επιφέρει αντίστοιχη αύξηση του πάχους του παραμορφωμένου.

Κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων παρατηρήθηκε σχηματισμός συνεχούς αποβλίττου με διαφορετική όμως συχνότητα θραύσης. Ο υπολογισμός του λόγου συμπίεσης αποβλίττου παρουσιάζεται στην αριστερή στήλη του Σχήματος 5.6. Στις μηχανουργικές κατεργασίες συχνά απαιτείται ο υπολογισμός του ρυθμού παραμόρφωσης για τη εύρεση και επαλήθευση ιδιοτήτων των υλικών αλλά και την αξιολόγηση της μορφοποίησης του αποβλίττου. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στη γωνία του επιπέδου διάτμησης ο οποίος παρουσιάζεται στο δεξί μέρος του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 5.6 Συνολικά αποτελέσματα μετρήσεων αποβλίττου

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει πως η αύξηση του βάθους και της ταχύτητας κοπής επιφέρει μείωση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου. Επίσης παρατηρείται πως μικρή αύξηση της γωνίας αποβλίττου δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στη μεταβολή του συντελεστή. Η

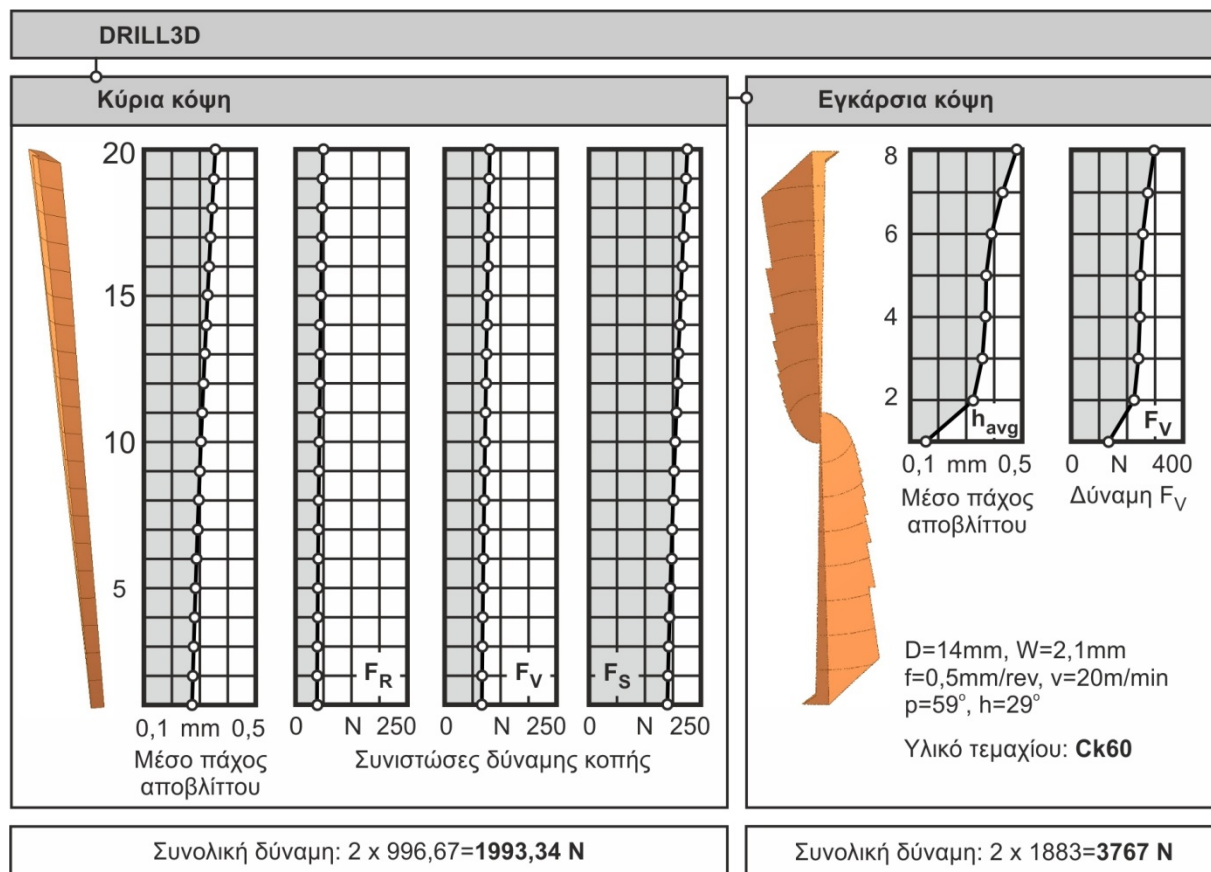
διακύμανση που παρατηρείται στις τιμές μπορεί να οφείλεται σε αύξηση της θερμοκρασίας η οποία με τη σειρά της αυξάνει την πλαστική παραμόρφωση. Επίσης, αναφορικά με τη γωνία διάτμησης, προκύπτει πως η αύξηση του βάθους και της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε αύξηση της γωνίας διάτμησης.

5.2 Στατική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης

Οι δυνάμεις κοπής που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο τόσο για τη σχεδίαση και ανάλυση νέων κοπτικών εργαλείων, όσο και για το χαρακτηρισμό της τελικής ποιότητας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται και οι δύο αυτές κατευθύνσεις. Αναφορικά με την ανάλυση των κοπτικών εργαλείων με πεπερασμένα στοιχεία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για την κατανομή των δυνάμεων κοπής σε κοπτικά εργαλεία. Οι δυνάμεις αυτές πρέπει να προέρχονται από μοντέλα υπολογισμού τα οποία λειτουργούν στη λογική της διαίρεσης του μακροσκοπικού προβλήματος σε ισοδύναμα και ως εκ τούτου να παρέχουν την κατανομή των δυνάμεων στις κόψεις. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό μοντέλο είναι το DRILL3D [98] το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια.

5.2.1 Περιγραφή του μοντέλου DRILL3D

Το μοντέλο DRILL3D προσομοιώνει την κατεργασία της διάτρησης βασιζόμενο σε σύστημα CAD. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το στερεό μοντέλο του εργαλείου το οποίο προωθείται στο στερεό μοντέλο του τεμαχίου και μέσω κατάλληλων λογικών τελεστών προσδιορίζονται τα απαραμόρφωτα απόβλιττα χωριστά για την εγκάρσια και για τις κύριες κόψεις. Στη συνέχεια, το απόβλιττο της μιας κύριας κόψης χωρίζεται σε 20 στοιχειώδη κομμάτια, ενώ το απόβλιττο της εγκάρσιας σε 8 όπως παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.7](#).



Σχήμα 5.7 Αποτελέσματα του μοντέλου DRILL3D

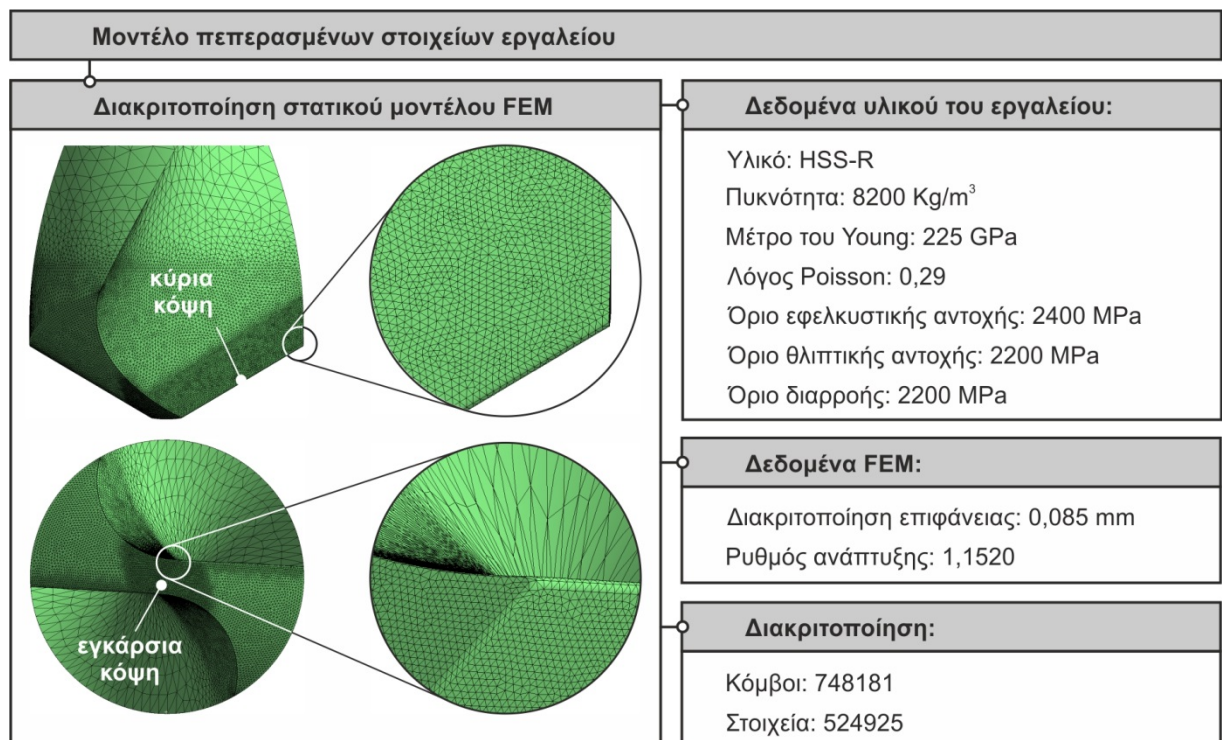
Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

Στο κάθε στοιχειώδες κομμάτι προσδιορίζεται το πλάτος και το πάχος αποβλίττου και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο τύπος του Kienzle [126] για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Εκτός από τις διαστάσεις των στοιχειωδών αποβλίττων, ο τύπος του Kienzle λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κοπής μέσω συντελεστών οι οποίοι προκύπτουν από πειράματα. Η άμεση εξάρτηση της μεθόδου από τους παραπάνω συντελεστές την καθιστά δαπανηρή και εξειδικευμένη σε συγκεκριμένες συνθήκες κοπής. Έτσι υπολογίζονται οι στοιχειώδεις δυνάμεις σε κάθε στοιχειώδες υποαπόβλιττο οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7.

Στο αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζεται το απόβλιττο και ο χωρισμός των υποαποβλίττων, το διάγραμμα του μέσου πάχους αποβλίττου και η κατανομή των συνιστωσών της δύναμης κοπής στην κύρια κόψη του εργαλείου. Στο δεξί μέρος του σχήματος παρουσιάζεται το απαραμόρφωτο απόβλιττο και τα αντίστοιχα διαγράμματα για την εγκάρσια κόψη. Οι υπολογισμοί αναφέρονται στη μισή εγκάρσια κόψη, στο μέσο πάχος αποβλίττου και στην κατανομή της κάθετης δύναμης κοπής. Οι δυνάμεις αυτές ύστερα από κατάλληλους μετασχηματισμούς δίνουν τη συνολική δύναμη κοπής στις κύριες και στην εγκάρσια κόψη. Τα παραπάνω αποτελούν είσοδο στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφεται στη συνέχεια.

5.2.2 Περιγραφή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του εργαλείου

Το πρώτο βήμα για τη μοντελοποίηση του εργαλείου είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας και ο χωρισμός των επιφανειών αναφοράς. Ο χωρισμός αυτός χρησιμεύει, τόσο στον ορισμό των επιφανειών στις οποίες θα κατανεμηθούν οι δυνάμεις κοπής, όσο και στην πύκνωση των περιοχών αυξημένου ενδιαφέροντος. Η διαδικασία του χωρισμού επιφανειών αναφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι αυτοματοποιεί τη διαδικασία της προεπεξεργασίας, αναγνωρίζοντας τις ορισμένες από το χρήστη επιφάνειες ακόμα και στην περίπτωση μεταβολής της αρχικής γεωμετρίας. Στη συνέχεια, ορίζονται τα συστήματα συντεταγμένων που απαιτεί ο αλγόριθμος κατανομής τα οποία περιγράφονται παρακάτω. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει διακριτοποίηση του μοντέλου με πύκνωση του πλέγματος σύμφωνα με τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.8](#).



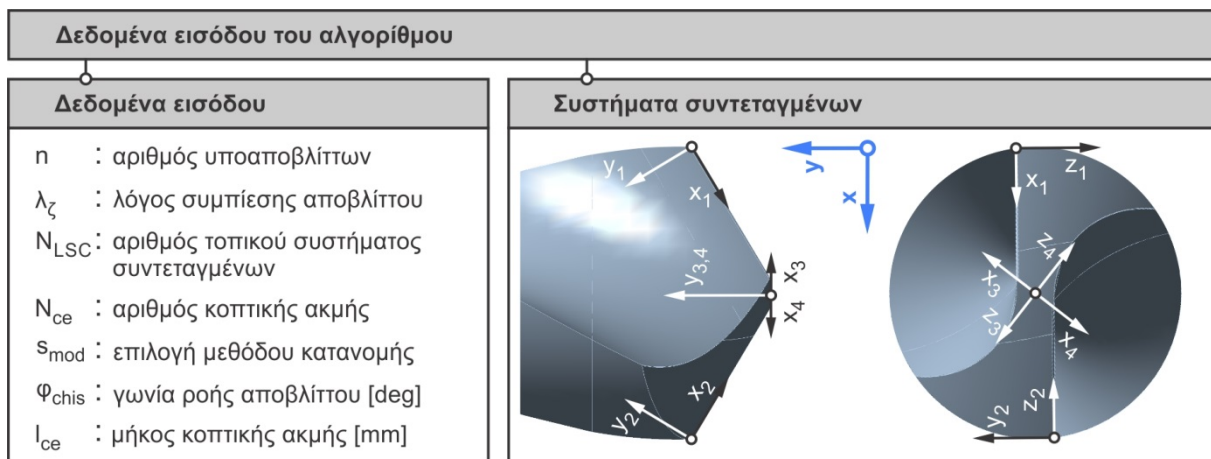
Σχήμα 5.8 Διακριτοποίηση του στατικού μοντέλου του εργαλείου

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

Στη συνέχεια γίνεται αξιολόγηση του πλέγματος που δημιουργήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα στατιστικά χαρακτηριστικά όπως η μέγιστη γωνία, η ασυμμετρία και ο λόγος των πεπερασμένων στοιχείων. Το πεπερασμένο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση ήταν το SOLID187. Πρόκειται για ένα τετραεδρικό στοιχείο με 10 κόμβους, με τετραγωνική συμπεριφορά μετατοπίσεων το οποίο είναι κατάλληλο για 3D διακριτοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών. Κατόπιν εισάγονται τα δεδομένα του υλικού και ορίζεται η πάκτωση της βάσης του εργαλείου. Τέλος, ορίζονται οι παράμετροι επίλυσης, οι επιθυμητοί τύποι των αποτελεσμάτων, ενώ εισάγεται και μια διεπαφή προγραμματισμού του μοντέλου

5.2.3 Αλγόριθμος κατανομής δυνάμεων στις παρειές του εργαλείου

Το πρώτο βήμα για την εφαρμογή του αλγορίθμου κατανομής των δυνάμεων είναι ο ορισμός των συστημάτων συντεταγμένων των κόψεων. Συνολικά ορίζονται τέσσερα τοπικά συστήματα συντεταγμένων. Δύο συστήματα εφαρμόζονται στις κύριες κόψεις του εργαλείου με τον x άξονα να συμπίπτει με την κόψη με φορά προς το κέντρο, τον y άξονα να είναι κάθετος σε αυτήν και τον άξονα z να είναι κάθετος στους άλλους δύο. Επίσης ορίζονται δύο συστήματα σε κάθε μισό της εγκάρσιας κόψης. Στα συστήματα αυτά ο άξονας x συμπίπτει με την εγκάρσια κόψη, ο άξονας y είναι παράλληλος με τον άξονα περιστροφής του εργαλείου και ο άξονας z κάθετος στους άλλους δύο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι πως ενσωματώθηκε στο σύστημα πεπερασμένων στοιχείων, παρακάμτοντας έτσι χρονοβόρες διαδικασίες εξαγωγής του πλέγματος, επεξεργασίας και επαναεισαγωγής του. Τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.9](#).



Σχήμα 5.9 Δεδομένα εισόδου αλγορίθμου κατανομής δυνάμεων σε κοπτικά εργαλεία

Ο αλγόριθμος κατανομής των δυνάμεων κοπής χωρίζεται σε δύο στάδια, όπως αυτά περιγράφονται στο [Σχήμα 5.10](#). Στο πρώτο στάδιο γίνεται κατανομή των δυνάμεων κοπής στους κόμβους της κοπτικής ακμής. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τα εξής τρία βήματα:

1. Το κάθε στοιχειώδες απόβλιπτο μεταξύ των αποστάσεων $i+1$ και $i+2$, πλάτους b_{i+1} , χωρίζεται έτσι ώστε να έχει ορθογώνιο σχήμα και ίδιο εμβαδό S_{i+1} με το προηγούμενο τραπεζοειδές. Σε αυτό το στοιχειώδες απόβλιπτο αντιστοιχεί μια στοιχειώδης δύναμη F_i , η οποία προκύπτει από το μοντέλο δυνάμεων.
2. Σε αυτό το βήμα το κάθε στοιχειώδες απόβλιπτο χωρίζεται σε στοιχειώδες υπο-απόβλιπτα από τους κόμβους της ακμής του μοντέλου. Στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστό της δύναμης F_i που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχειώδες υπο-απόβλιπτο. Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται ως το πηλίκο του πλάτους του κάθε στοιχειώδους υπο-αποβλίπτου προς το πλάτος του στοιχειώδους αποβλίπτου.

3. Στη συνέχεια η κάθε δύναμη F_i ισομοιράζεται στους κόμβους που οριοθετούν κάθε στοιχειώδες υπο-απόβλιπτο. Στο τέλος οι δυνάμεις F_i που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο αθροίζονται δίνοντας την κατανομή F_{Ni} .

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η κατανομή των δυνάμεων κοπής στους εσωτερικούς κόμβους της επιφάνειας αποβλίπτου του εργαλείου. Οι δυνάμεις F_{Ni} οι οποίες επεξεργάζονται σε αυτό το στάδιο προκύπτουν από την προηγούμενη κατανομή. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τα εξής δύο βασικά βήματα:

1. Η επιλογή των εσωτερικών κόμβων στους οποίους θα κατανεμηθεί η κάθε δύναμη F_N γίνεται μέσω μιας ορθογώνιας παραλληλόγραμμης περιοχής, κάθετα στην κόψη του εργαλείου. Το πλάτος αυτής της περιοχής ισούται με το άθροισμα του μισού πλάτους του στοιχειώδους υπο-αποβλίπτου i και του μισού πλάτους του στοιχειώδους υπο-αποβλίπτου $i+1$. Το μήκος της παραλληλόγραμμης περιοχής ισούται με το γινόμενο του πάχους του στοιχειώδους αποβλίπτου επί το λόγο συμπίεσης αποβλίπτου. Ο λόγος συμπίεσης αποβλίπτου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τον ακριβή προσδιορισμό των τάσεων γι αυτό και προσδιορίστηκε πειραματικά στο υποκεφάλαιο 5.1.
2. Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει την κατανομή των δυνάμεων κοπής. Οι δυνάμεις στις διευθύνσεις x και y κατανέμονται ομοιόμορφα στους επιλεγμένους κόμβους. Η δύναμη στην διεύθυνση z ακολουθεί φθίνουσα γραμμική πορεία συναρτήσει της απόστασης του κάθε επιλεγμένου κόμβου από την κοπτική ακμή. Η εξίσωση (5.34) δίνει τη δύναμη F_z του κάθε επιλεγμένου εσωτερικού κόμβου k , του περιφερειακού κόμβου i , που ανήκει στο στοιχειώδες απόβλιπτο j .

$$F_{zb_{k,i,j}} = F_{Ni} \frac{\lambda_{\zeta_j} h_j - d_k}{N_{pi} \lambda_{\zeta_j} h_j - \sum_{k=1}^{N_{pi}} d_k}, \text{ για } i=1:N_{ce}, j=1:n, k=1:N_{pi} \quad (5.34)$$

όπου:

- $F_{zb_{k,i,j}}$: δύναμη που αντιστοιχεί στον κόμβο k , του στοιχειώδους αποβλίπτου j , του στοιχειώδους υπο-αποβλίπτου i [N]
- F_{Ni} : δύναμη που αντιστοιχεί στον περιφερειακό κόμβο i [N]
- λ_{ζ_j} : λόγος συμπίεσης αποβλίπτου
- h_j : πάχος στοιχειώδους αποβλίπτου j [N]
- d_k : απόσταση κόμβου k από την ακμή του εργαλείου [mm]
- N_{CE} : πλήθος των κόμβων της κοπτικής ακμής
- n : πλήθος των στοιχειωδών αποβλίπτων
- N_{pi} : πλήθος των επιλεγμένων κόμβων της περιοχής που αντιστοιχεί στον κόμβο i

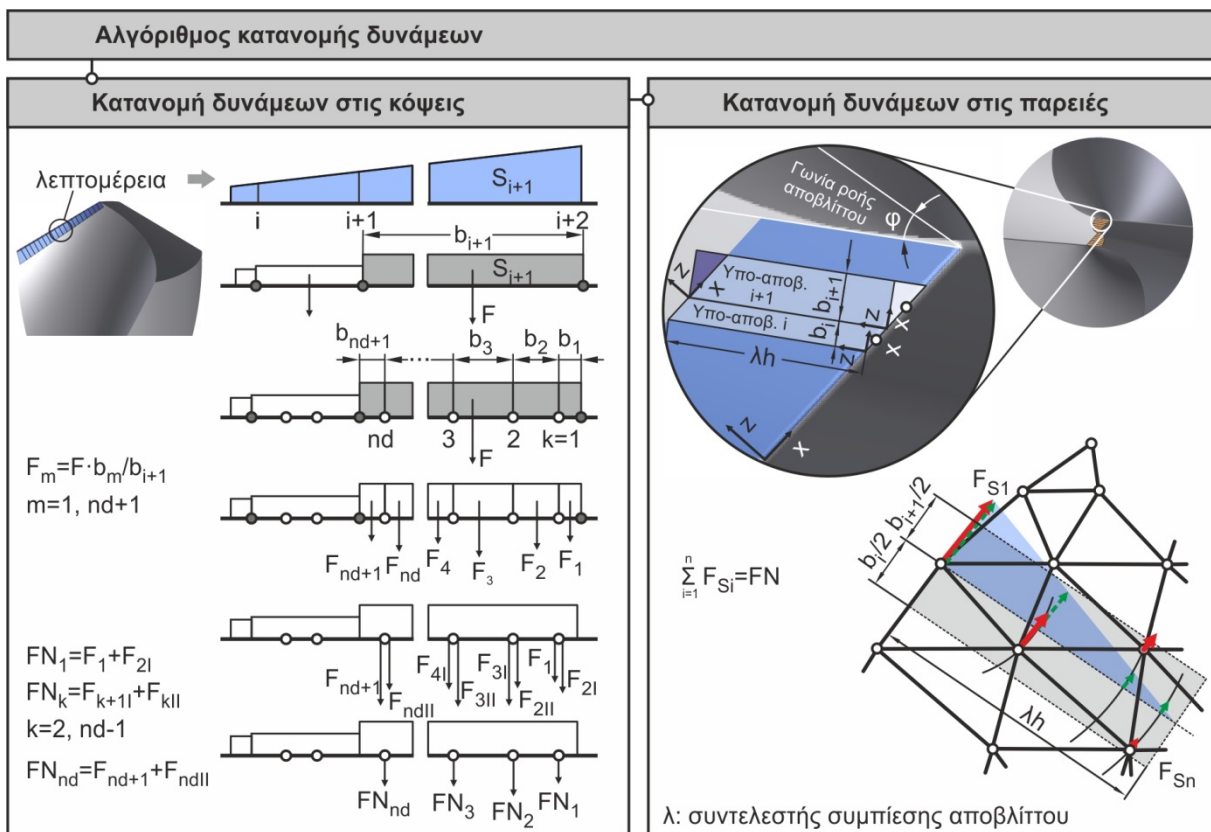
Η παραπάνω μέθοδος επιλογής προσεγγίζει το πλάτος επαφής του αποβλίπτου με το κοπτικό, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [127, 128].

Αναφορικά με την εγκάρσια κόψη, η διαδικασία κατανομής που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτήν της κύριας, με τη διαφορά ότι η επιλογή των κόμβων γίνεται υπό γωνία, ίση με τη γωνία ροής αποβλίπτου. Η διαδικασία επιλογής των κόμβων περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Ορισμός N_{CE} τοπικών συστημάτων συντεταγμένων για κάθε στοιχειώδες υπο-απόβλιπτο. Η αρχή αυτών των μετατοπισμένων συστημάτων είναι το αριστερό άκρο

του κάθε στοιχειώδους υπο-αποβλίττου, ενώ περιστρέφονται γύρω από το άξονα y κατά γωνία φ.

2. Στη συνέχεια επιλέγονται όλοι οι κόμβοι της επιφάνειας αποβλίττου που βρίσκονται στα αρνητικά του άξονα z (κίτρινη περιοχή), καθώς και αυτοί που βρίσκονται στα θετικά του άξονα z σε απόσταση ίση με λz, όπου λz ο συντελεστής συμπίεση και h το πάχος αποβλίττου. Στη συνέχεια, το σύστημα μεταφέρεται στην πάνω αριστερή γωνία του ορθογωνίου και περιστρέφεται έτσι ώστε ο άξονας x να γίνει παράλληλος με την εγκάρσια κόψη. Οι κόμβοι που βρίσκονται στα θετικά του άξονα z αφαιρούνται από το προηγούμενο σύνολο των επιλεγμένων κόμβων (κόκκινη περιοχή). Τέλος η κατανομή των δυνάμεων γίνεται στο σύνολο των επιλεγμένων κόμβων (πράσινη και κίτρινη περιοχή) σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 5.10 Αλγόριθμος κατανομής δυνάμεων κοπής σε κοπτικά εργαλεία

Σε κάθε βήμα εκτέλεσης, ο αλγόριθμος εξάγει ένα σύνολο αρχείων με αναλυτικούς υπολογισμούς, επιτρέποντας στο χρήστη να παρέμβει και να ελέγξει την παραπάνω διαδικασία.

5.2.4 Αποτελέσματα κατανομής τάσεων

Τα αποτελέσματα του μοντέλου στατικής ανάλυσης εργαλείων με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνουν τις μετατοπίσεις του εργαλείου στις τρεις διευθύνσεις και την κατανομή των τάσεων von-Mises, όπως εικονίζονται στο Σχήμα 5.11. Στη θεωρία von Mises για τη διαρροή του υλικού λαμβάνεται υπόψη η τριαξονική εντατική κατάσταση ή ισοδύναμη τάση η οποία δίνεται από την εξίσωση (3.35).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]} \quad (3.35)$$

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

όπου:

σ_x : ορθή τάση στη διεύθυνση x [Pa]

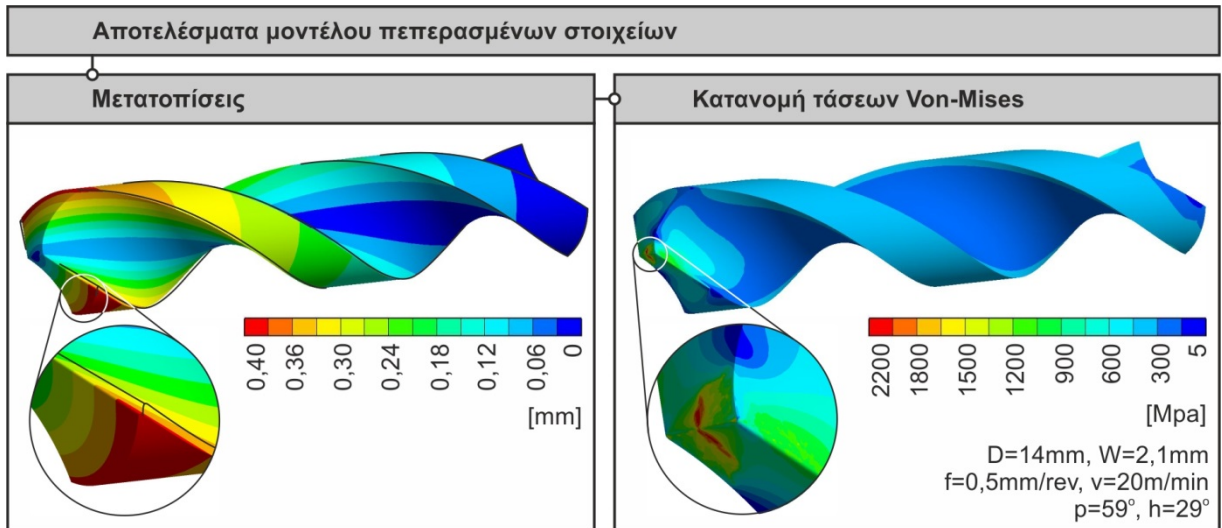
σ_y : ορθή τάση στη διεύθυνση y [Pa]

σ_z : ορθή τάση στη διεύθυνση z [Pa]

τ_{xy} : διατμητική τάση στο επίπεδο xy [Pa]

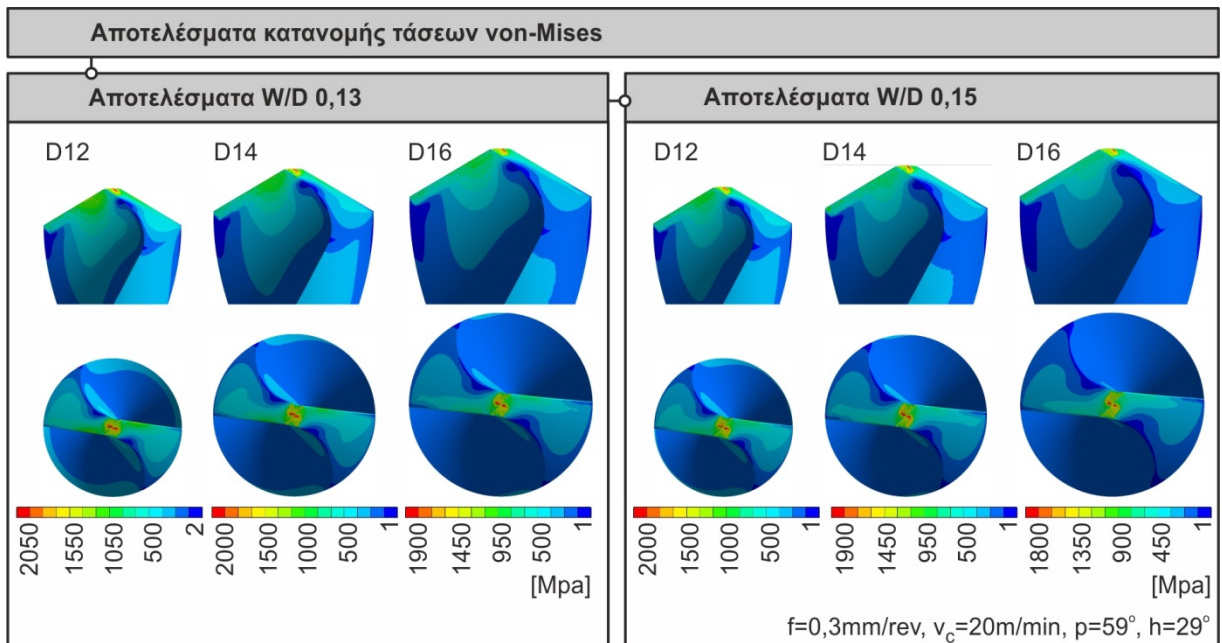
τ_{yz} : διατμητική τάση στο επίπεδο yz [Pa]

τ_{zx} : διατμητική τάση στο επίπεδο zx [Pa]



Σχήμα 5.11 Αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τάσεων του εργαλείου για συγκεκριμένη πρόωση, για τρεις διαφορετικές διαμέτρους και δύο λόγους W/D.



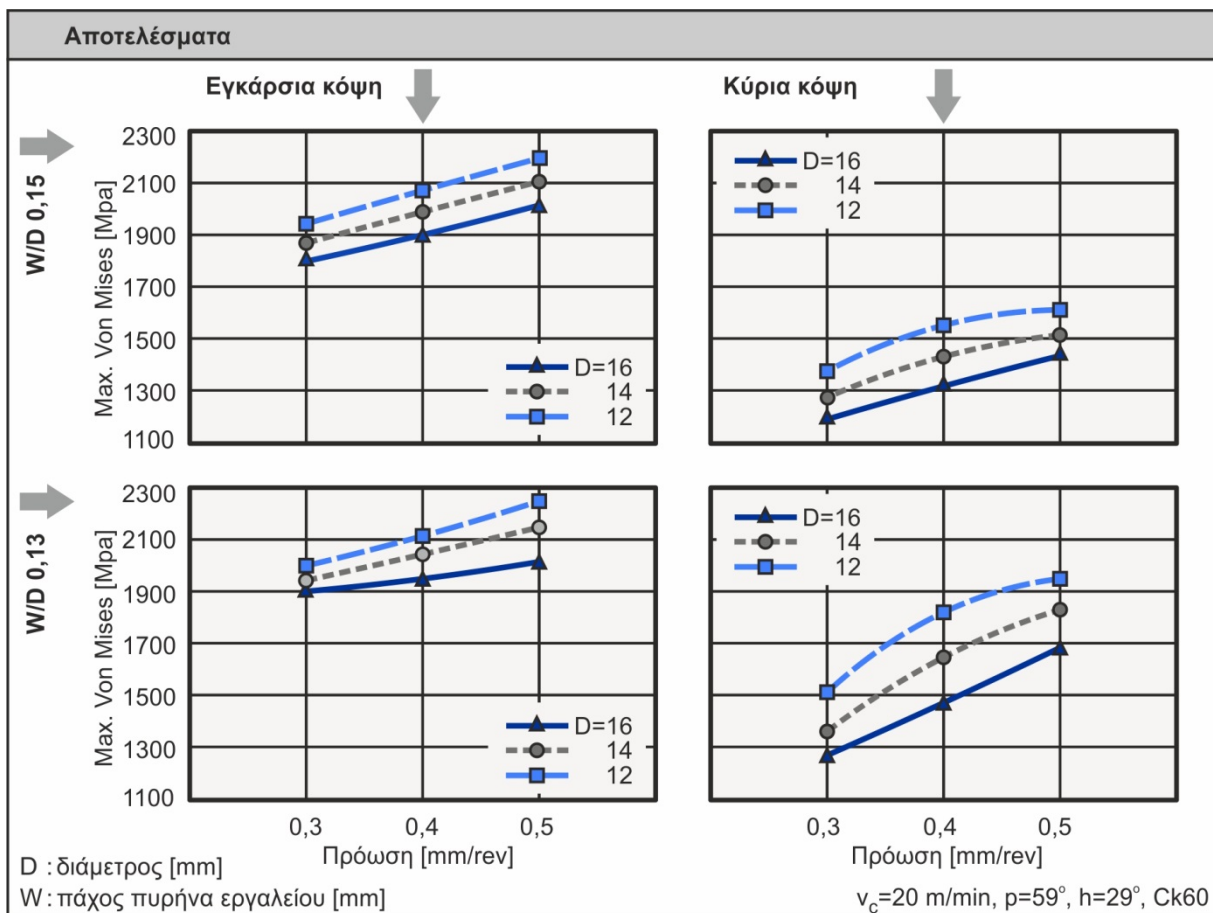
Σχήμα 5.12 Κατανομή τάσεων von-Mises στις παρειές των εργαλείων

Στην παρούσα ανάλυση εξετάστηκε ιδιαίτερα το μέγεθος και η κατανομή των τάσεων von-Mises στις επιφάνειες του εργαλείου διάτρησης. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της πρόωσης, της διαμέτρου του εργαλείου και του λόγου W/D στις αναπτυσσόμενες τάσεις.

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

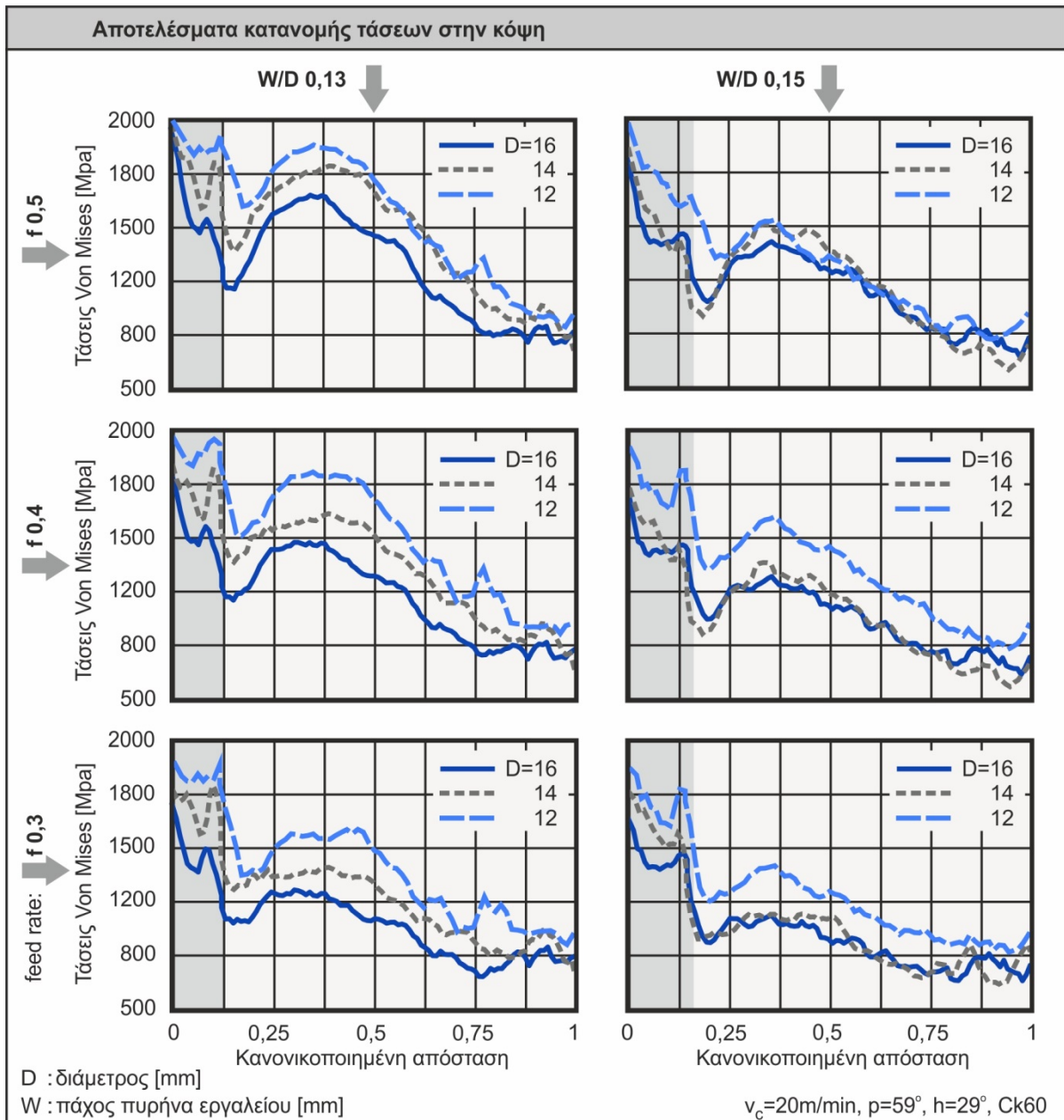
Ο λόγος W/D προκύπτει ως το πηλίκο του πάχους του πυρήνα προς τη διάμετρο του εργαλείου και παίζει σημαντικό ρόλο για τη στιβαρότητα του εργαλείου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του πυρήνα και συνεπώς ο λόγος W/D , η στιβαρότητα του εργαλείου αυξάνεται. Όμως αύξηση του πάχους του πυρήνα σημαίνει ταυτόχρονη αύξηση και της επιφάνειας της εγκάρσιας κόψης, στην οποία ασκείται μεγάλο ποσοστό της δύναμης κοπής.

Όπως εικονίζεται στο [Σχήμα 5.13](#) οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στην παρειά της εγκάρσιας κόψης. Τα αποτελέσματα των περιοχών ανάπτυξης μέγιστων τάσεων συμφωνούν με τη φθορά που παρατηρείται στα τρυπάνια κατά την κατεργασία. Επιπλέον παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ των τάσεων στην εγκάρσια και στην κύρια κόψη του εργαλείου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός της έντονα αρνητικής γωνίας αποβλίπτου της εγκάρσιας κόψης η οποία είναι υπεύθυνη για τις μεγάλες δυνάμεις κοπής που ασκούνται. Επίσης στην περιοχή αυτή υπάρχει συγκέντρωση τάσεων λόγω στρέψης του εργαλείου.



Σχήμα 5.13 Μέγιστες τάσεις von-Mises στις παρείες του εργαλείου

Στο [Σχήμα 5.14](#) παρουσιάζεται λεπτομερέστερα η κατανομή των τάσεων von Mises στο ανάπτυγμα των κόψεων του εργαλείου. Στα γραφήματα που παρουσιάζονται η γκρι περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης. Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η αύξηση της διαμέτρου του εργαλείου δίνει μικρότερες τάσεις για τις ίδιες συνθήκες κοπής. Επίσης αύξηση της πρόωσης αντιστοιχεί σε αύξηση των τάσεων στο εργαλείο.



Σχήμα 5.14 Κατανομή των τάσεων κατά von-Mises στις κόψεις του εργαλείου

Η κατανομή των τάσεων στο ανάπτυγμα της κόψης δείχνει την ακόλουθη συμπεριφορά: Η μέγιστη τάση παρατηρείται στο κέντρο του εργαλείου με φθίνουσα πορεία μέχρι τη γωνία που εναλλάσσεται με την κύρια κόψη. Στη γωνία αυτή παρατηρείται μια τοπική αύξηση λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Στη συνέχεια παρατηρείται απότομη πτώση της τάσης λόγω εναλλαγής της κύριας κόψης. Η τάση σταδιακά αυξάνεται μέχρι περίπου το ένα τρίτο της κύριας κόψης. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται τόσο από την επίδραση των τάσεων της εγκάρσιας κόψης, όσο και από τα μεγέθη του αποβλίπτου και της γεωμετρίας της περιοχής. Στη συγκεκριμένη περιοχή, η γωνία αποβλίπτου της κόψης είναι μικρή, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων. Ταυτόχρονα στην περιοχή αυτή, το πάχος αποβλίπτου είναι μικρότερο, οδηγώντας έτσι σε αύξηση των τάσεων. Στη συνέχεια οι τάσεις ελαττώνονται σταδιακά μέχρι το τέλος της κύριας κόψης, όπου και παρατηρείται μικρή αύξηση. Η αύξηση αυτή αποτελεί συγκέντρωση τάσεων στην γωνία της κόψης, ενώ η σταδιακή πτώση εξηγείται λόγω της μεγαλύτερης γεωμετρίας του αποβλίπτου.

5.3 Δυναμική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης

Η δυναμική ανάλυση των εργαλείων αποτελεί σημαντικό τομέα μελέτης των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κοπής, όπως ο συντονισμός του εργαλείου και οι αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις. Τυπικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης αποτελούν η απόκριση του εργαλείου καθώς και η μεταβολή των τάσεων συναρτήσει του χρόνου. Το πρώτο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης περιλαμβάνει τη μελέτη των ιδιομορφών του εργαλείου και παρουσιάζεται στη συνέχεια.









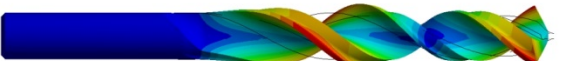



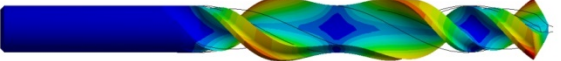
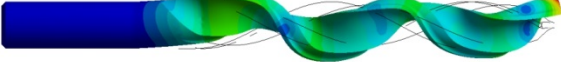

5.3.1 Ιδιομορφική ανάλυση του εργαλείου

Στην ιδιομορφική ανάλυση εξετάζονται οι ιδιοσυχνότητες, οι παράγοντες συμμετοχής και οι ιδιομορφές του εργαλείου. Στόχος της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των περιοχών συντονισμού, μέσω του προσδιορισμού των ιδιοσυχνοτήτων και η μελέτη της απόκρισης του εργαλείου υπό την επίδραση διαφόρων δυναμικών φορτίων, μέσω της ανάλυσης των ιδιομορφών και των παραγόντων συμμετοχής. Επίσης η μελέτη των ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμεύει στον προσδιορισμό του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης των δυναμικών αναλύσεων.

Η οριακή συνθήκη του εργαλείου περιλαμβάνει την πάκτωση της κυλινδρικής επιφάνειας του στελέχους σε ύψος ίσο με τα $\frac{3}{4}$ του μήκους του στελέχους. Η επίλυση του προβλήματος ιδιοτιμών, γίνεται απευθείας με τη χρήση του αλγορίθμου Block Lanczos.

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται οι ιδιομορφές του εργαλείου διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε, οι κανονικοποιημένοι παράγοντες συμμετοχής στις διευθύνσεις $x - y - z$ και οι κανονικοποιημένοι παράγοντες συμμετοχής σε στρέψη στις διευθύνσεις $rx - ry - rz$. Η κανονικοποίηση των παραγόντων συμμετοχής γίνεται σε καθεμία από τις 6 διευθύνσεις και σε σχέση με το μέγιστο παράγοντα συμμετοχής όλων των ιδιοσυχνοτήτων. Μεγάλη τιμή του παράγοντα συμμετοχής σε κάποια κατεύθυνση σημαίνει ότι μεγάλο ποσό μάζας κινείται προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Επιπλέον, υποδεικνύει πως η συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα διεγείρεται από δυνάμεις που ασκούνται προς αυτήν την κατεύθυνση. Συνεπώς, μπορούν να εξαχθούν ανάλογα συμπεράσματα αναφορικά με τον τύπο της ιδιομορφής (εγκάρσια, στρεπτική, αξονική). Στη συγκεκριμένη ανάλυση παρατηρούνται πέντε εγκάρσιες ιδιομορφές σε κάθε ένα από τα επίπεδα $x - z$ και $y - z$, τρεις στρεπτικές, και μια αξονική σε εύρος συχνοτήτων 0 - 25KHz.

Η πρώτη εγκάρσια ιδιομορφή παρατηρείται στα 335,69Hz και λαμβάνει χώρα στο επίπεδο $x - z$. Η δεύτερη εγκάρσια ιδιομορφή παρατηρείται στα 413,7Hz και λαμβάνει χώρα στο επίπεδο $y - z$. Επίσης, η πρώτη στρεπτική ιδιομορφή παρατηρείται στα 3733,6Hz. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύονται από πειραματικές μετρήσεις διάφορων ερευνητών [129-134].

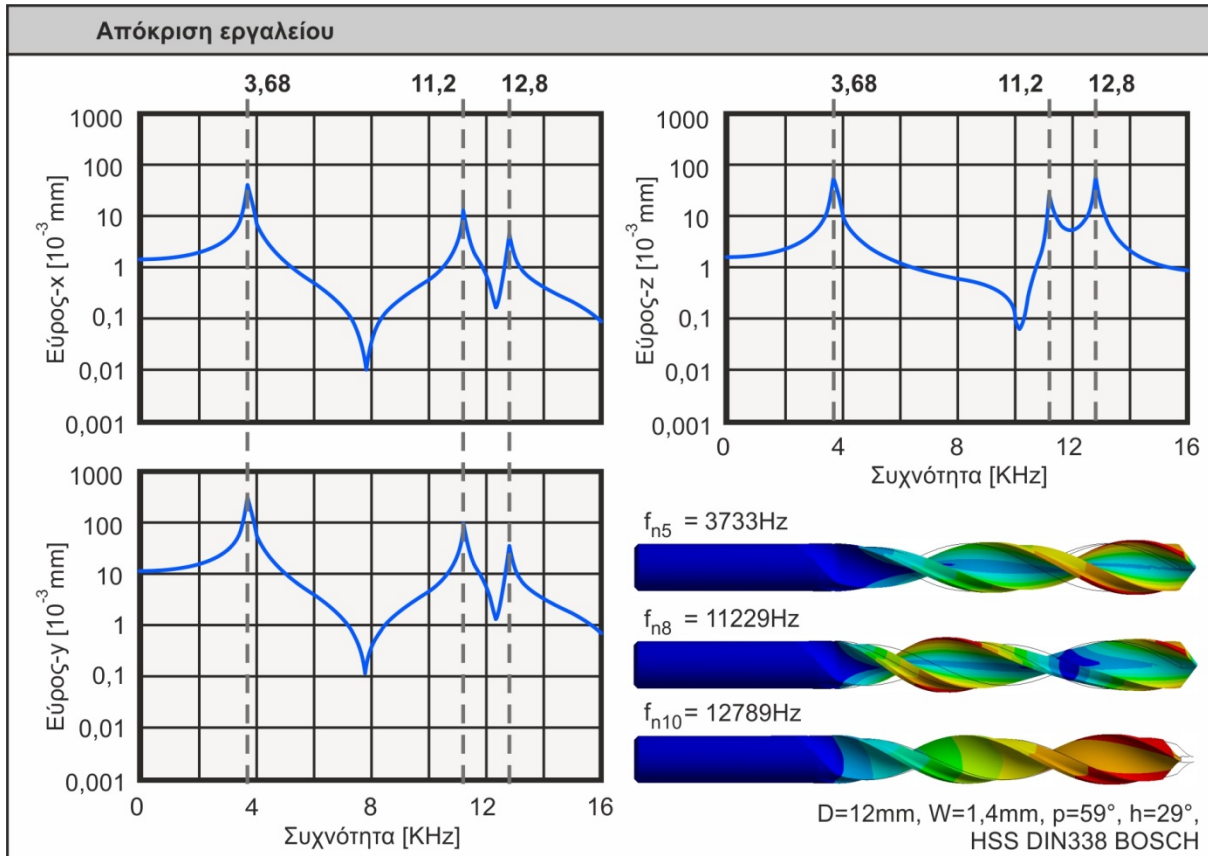
A/A	Ιδιομορφή 	Ιδιοσυχνότητα [Hz]	Καν. παρ. συμμετοχής x/y/z	Καν. παρ. συμμετοχής rx/ry/rz
1		335,69	1 0,369793 0,000004	0,218015 0,629838 0,000004
2		413,7	0,352543 1 0,000003	0,555980 0,217719 0,000010
3		2062	0,576675 0,028917 0,000026	0,055560 1 0,000015
4		2511,2	0,118641 0,598369 0,000052	0,932550 0,195061 0,000203
5		3733,6	0,000041 0,000116 0,274556	0,000184 0,000067 1
6		5367,1	0,211768 0,335363 0,000029	0,582530 0,402927 0,000110
7		7656,2	0,117783 0,517661 0,000028	0,933100 0,228593 0,000064
8		11229	0,000072 0,000055 0,020339	0,000103 0,000142 0,376625
9		11574	0,326484 0,392336 0,000005	0,741607 0,655905 0,000052
10		12789	0,000113 0,000094 1	0,000208 0,000233 0,297528
11		15413	0,453608 0,059178 0,000080	0,104991 0,937050 0,000052
12		18833	0,000310 0,000100 0,070851	0,000212 0,000655 0,236667
13		20714	0,452884 0,231775 0,000008	0,489908 0,961926 0,000097
14		24827	0,093263 0,469098 0,000037	1 0,202961 0,000014

D=12mm, W=1,4mm, ρ=59°, h=29°, HSS DIN338 BOSCH

Σχήμα 5.15 Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες εργαλείου διάτρησης D=12mm

5.3.2 Απόκριση συχνοτήτων του εργαλείου σε αρμονική φόρτιση

Για την περαιτέρω διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του εργαλείου, διεξήχθη αρμονική ανάλυση σε φάσμα συχνοτήτων 0 - 16KHz. Στόχος της ανάλυσης είναι η διερεύνηση των ιδιομορφών που παίζουν κύριο ρόλο στη διάτρηση. Τα αποτελέσματα της αρμονικής ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16 Απόκριση του εργαλείου σε αρμονική φόρτιση

Σε συνέχεια της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων, οι οριακές συνθήκες εκτός από την πάκτωση του στελέχους περιλαμβάνουν και την επιβολή δυνάμεων ημιτονοειδούς μορφής στις διευθύνσεις της κάθετης και της κύριας δύναμης κοπής. Το πλάτος των αρμονικών φορτίσεων εκτιμήθηκε από δυναμομετρήσεις στα 20N και η επίλυση του μοντέλου έγινε με τη μέθοδο υπέρθεσης ιδιομορφών. Από τη μελέτη των συχνοτήτων προκύπτουν τρεις κορυφές στα 3680Hz, στα 11200Hz και στα 12800Hz. Οι κορυφές αυτές αντιστοιχούν στην πέμπτη ($f_{n5}=3733\text{Hz}$), την όγδοη ($f_{n8}=11229\text{Hz}$) και την δέκατη ιδιομορφή ($f_{n10}=12789\text{Hz}$). Οι δύο πρώτες ιδιομορφές είναι στρεπτικές ενώ η τρίτη είναι αξονική.

Επισημαίνεται η άμεση συσχέτιση των αξονικών και των στρεπτικών ιδιομορφών η οποία οφείλεται στην ελικοειδή γεωμετρία του εργαλείου. Η δράση στρεπτικών δυνάμεων τείνει να αποσυστρέψει την έλικα με παράλληλη αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης του εργαλείου, ενώ αντίθετα η δράση αξονικών δυνάμεων τείνει να συστρέψει την έλικα με παράλληλη αρνητική αξονική παραμόρφωση του εργαλείου. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε και στις μελέτες [52, 129, 132, 135] και επιβεβαιώνεται και από τους αντίστοιχους παράγοντες συμμετοχής.

5.3.3 Αλγόριθμος κατανομής δυναμικών φορτίσεων στις παρειές του εργαλείου

Ο αλγόριθμος κατανομής των δυναμικών φορτίσεων είναι παρόμοιος με αυτόν της κατανομής των στατικών, με κάποιες μικρές διαφορές και προσθήκες. Μια βασική διαφορά του αλγορίθμου είναι πως η κατανομή των δυνάμεων στις κύριες και στην εγκάρσια κόψη γίνονται ταυτόχρονα. Αυτό οφείλεται στο ότι ο δυναμικός ορισμός των φορτίσεων γίνεται σε κάθε χρονικό βήμα και για ολόκληρο το εργαλείο.

Αναφορικά με τα δεδομένα εισόδου, οι δυνάμεις δίνονται συναρτήσει του χρόνου, ενώ επιπλέον ορίζονται και αρχεία με τα ποσοστά της κάθε δύναμης που κατανέμεται σε κάθε στοιχειώδη κόψη. Επίσης ορίζεται και ο αριθμός των σταδίων φόρτισης, όπου το πρώτο στάδιο ορίζει την αρχική κατάσταση του μοντέλου. Σε κάθε στάδιο φόρτισης εφαρμόζεται ο αλγόριθμος κατανομής των δυνάμεων που ήδη παρουσιάστηκε, ενώ ορίζεται και μια σειρά ιδιοτήτων που αφορούν το χρονικό βήμα. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν τον αυτόματο προσδιορισμό του χρονικού βήματος, και τη μέθοδο παρεμβολής του φορτίου στα στοιχειώδη χρονικά βήματα. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να είναι είτε γραμμική, είτε βηματική. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει χρήση της γραμμικής παρεμβολής του φορτίου για καλύτερη προσέγγιση της δυναμομέτρησης.

Ο εξωγενής καθορισμός του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης είναι πολύ σημαντικός για τη σύγκλιση και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του δυναμικού μοντέλου. Τα κριτήρια επιλογής του χρονικού βήματος αφορούν την ικανοποιητική προσέγγιση της καμπύλης φόρτισης και την προσέγγιση των ιδιομορφών. Για την επιλογή του αρχικού χρονικού βήματος προτείνεται η χρήση 20 σημείων ανά κύκλο φόρτισης στην υψηλότερη συχνότητα μελέτης του μοντέλου [136].

Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν τη χρονική απόκριση του εργαλείου και τη χρονική κατανομή των τάσεων ενώ γίνεται περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε να γίνει πρόβλεψη των ποιοτικών χαρακτηριστικών της οπής. Επισημαίνεται πως η δυναμική μελέτη του εργαλείου εστιάζεται στην περιοχή πλήρους κοπής.

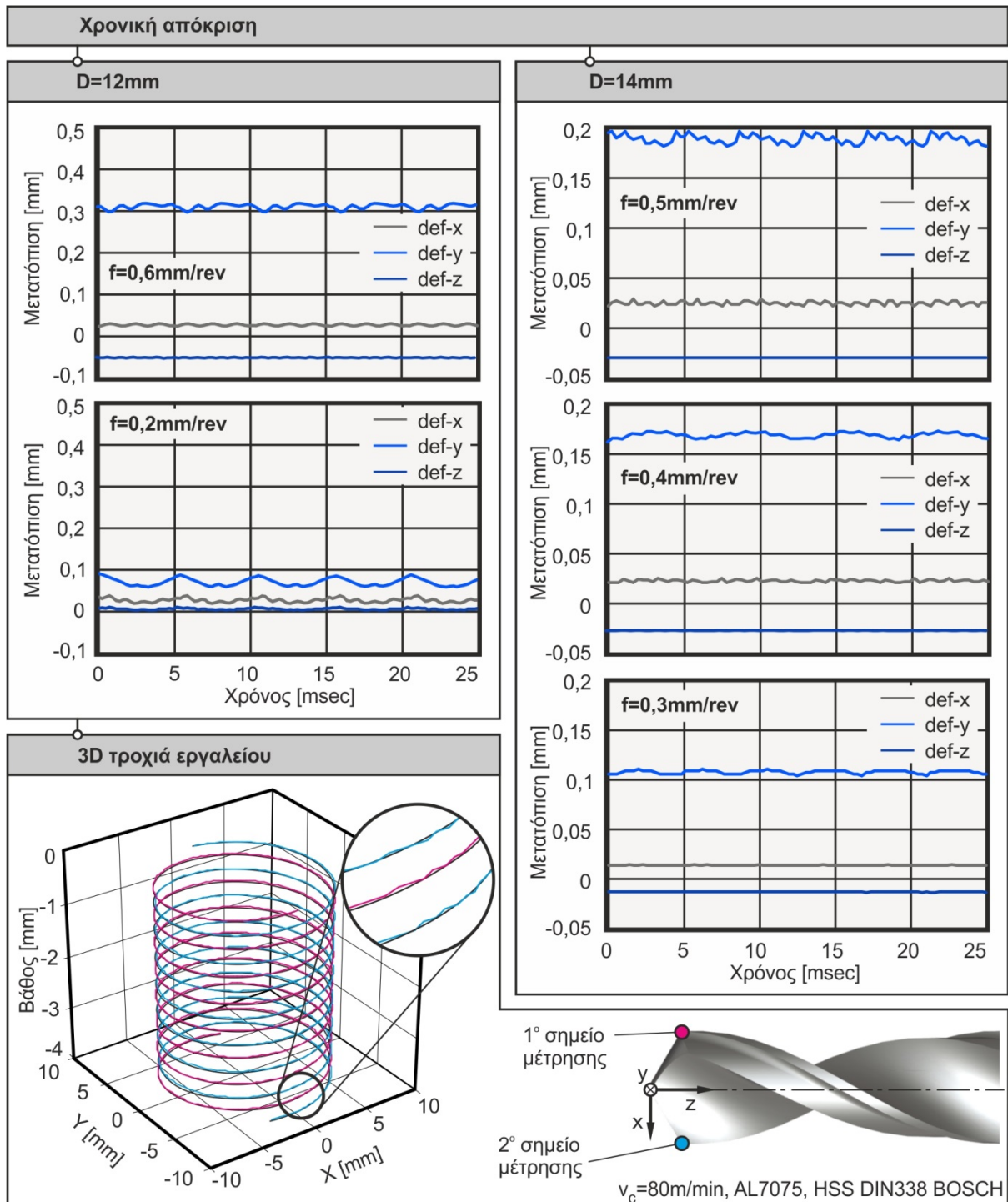
5.3.4 Χρονική απόκριση του εργαλείου σε δυναμική φόρτιση

Στη δυναμική ανάλυση του εργαλείου οι φορτίσεις μπορούν να έχουν οποιαδήποτε μορφή, ενώ λαμβάνεται υπόψη και η απόσβεση. Παρ' όλα αυτά στη συγκεκριμένη ανάλυση οι δυνάμεις θεωρούνται αρμονικές. Έτσι, το πρώτο στάδιο για τη μελέτη της χρονικής απόκρισης του εργαλείου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των φορτίσεων. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στις προσομοιωμένες δυνάμεις που προέκυψαν από το μοντέλο διάτρησης που προτείνεται. Αρχικά οι στοιχειώδεις δυνάμεις F_{x1i} , F_{y1i} και F_{z1i} μετασχηματίστηκαν στις F_{x2i} , F_{y2i} και F_{z2i} του συστήματος συντεταγμένων 2 που αντιστοιχεί στην κόψη του τρυπανιού όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η συνολική δύναμη σε κάθε κατεύθυνση και σε κάθε κόψη προκύπτει από το άθροισμα όλων των στοιχειωδών δυνάμεων. Τέλος, υπολογίζοντας το πλάτος και τη συχνότητα ταλάντωσης της δύναμης κοπής με τη βοήθεια των δυναμομετρήσεων, προέκυψαν οι δυναμικές φορτίσεις του μοντέλου.

Οι φορτίσεις αυτές, κατανέμονται στις κόψεις του εργαλείου με ποσόστωση. Το ποσό της δύναμης που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχειώδες απόβλιπτο υπολογίζεται ως ο λόγος της κάθε στοιχειώδους δύναμης προς τη συνολική δύναμη σε κάθε κατεύθυνση.

Τα αποτελέσματα των δυναμικών μετατοπίσεων παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.17](#). Οι μετατοπίσεις αυτές αναφέρονται στο σημείο της δεύτερης κύριας κόψης που βρίσκεται στην περιφέρεια του εργαλείου. Για το εργαλείο διαμέτρου 12mm εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για προώσεις 0,2 και 0,6mm/rev και ταχύτητα κοπής 80m/min. Για την πρόωση των 0,2mm/rev παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση των μετατοπίσεων, πράγμα που οφείλεται

στη μεγαλύτερη διακύμανση των δυνάμεων, όπως αποδεικνύεται τόσο από την μέτρηση της οπής, όσο και από την αντίστοιχη δυναμομέτρηση που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Επιπλέον, παρατηρείται αλλαγή διεύθυνσης των μετατοπίσεων στον άξονα Z για την περίπτωση της πρόωσης των 0,2mm/rev, πράγμα που οφείλεται στην άμεση σχέση μεταξύ στρεπτικών και αξονικών παραμορφώσεων η οποία περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.2. Οι μετατοπίσεις στον άξονα x (def-x) κυμαίνονται στα 15μm, στον άξονα y (def-y) στα 70μm και στον άξονα z (def-z) είναι ελαφρώς θετικές στα 2μm.



Σχήμα 5.17 Απόκριση του εργαλείου σε δυναμική φόρτιση

Αναφορικά με την πρόωση των 0,6mm/rev, οι μετατοπίσεις στον άξονα x κυμαίνονται στα 30μm, στον άξονα y στα 310μm και στον άξονα z στα -50μm. Σε σχέση με την πρόωση των 0,2mm/rev παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων κοπής αλλά μείωση της διακύμανσής τους ανάλογη της δυναμομέτρησης.

Στην περίπτωση του εργαλείου με διάμετρο 14mm, το μέγεθος των μετατοπίσεων μειώνεται ελαφρώς με μείωση της πρόωσης, ενώ αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στις αντίστοιχες μετρήσεις των οπών, αλλά και στις αντίστοιχες δυναμομετρήσεις που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους. Συνολικά, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται αυξημένη παραμόρφωση στον άξονα y. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα κοπής η οποία δημιουργεί μεγάλες στρεπτικές δυνάμεις. Οι αμέσως μεγαλύτερες παραμορφώσεις παρατηρούνται στον άξονα x και στον άξονα z, οι οποίες μειώνονται με μείωση της πρόωσης κοπής. Για την πρόωση των 0,5mm/rev οι μετατοπίσεις στον άξονα x (def-x) κυμαίνονται στα 25μm, στον άξονα y (def-y) στα 185μm και στον άξονα z (def-z) στα -30μm. Για την πρόωση των 0,4mm/rev οι μετατοπίσεις στον άξονα x (def-x) κυμαίνονται στα 21μm, στον άξονα y (def-y) στα 165μm και στον άξονα z (def-z) στα -26μm. Τέλος, για την πρόωση των 0,4mm/rev παρατηρείται επιπλέον μείωση, με τις μετατοπίσεις στον άξονα x (def-x) να κυμαίνονται στα 16μm, στον άξονα y (def-y) στα 110μm και στον άξονα z (def-z) στα -16μm.

Για την παρεμβολή των μετατοπίσεων στις τρισδιάστατες τροχιές των κόψεων αναπτύχθηκε ξεχωριστός αλγόριθμος μεταεπεξεργασίας. Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου περιλαμβάνει τη γραμμική παρεμβολή των δεδομένων της προσομοίωσης, έτσι ώστε το χρονικό βήμα να γίνει ομοιόμορφο. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο, εφόσον ο αλγόριθμος επίλυσης μπορεί να μεταβάλει το χρονικό βήμα για να διασφαλίσει τη σύγκλιση του μοντέλου.

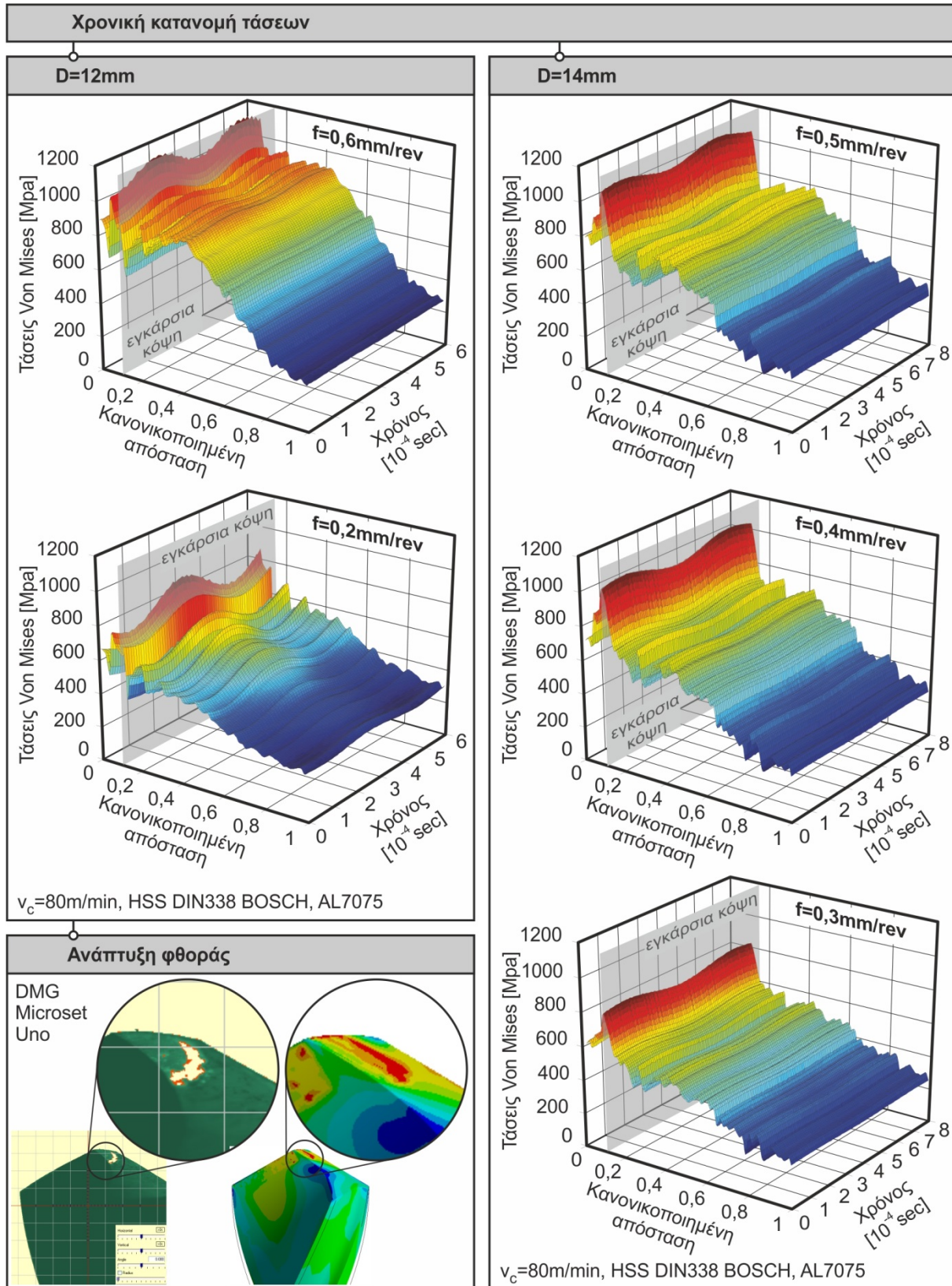
Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει την παρεμβολή των μετατοπίσεων στην τροχιά της κάθε κόψης με τη βοήθεια κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων. Στο στάδιο αυτό η τροχιά του εργαλείου διακριτοποιείται χρονικά και σε κάθε διακριτή θέση παρεμβάλλονται οι μετατοπίσεις και στις τρεις διαστάσεις. Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μιας τρισδιάστατης προσομοιωμένης τροχιάς ενώ εικονίζονται και οι αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετατοπίσεις στα δύο άκρα του εργαλείου δεν είναι συμμετρικές, αλλά λαμβάνονται ανεξάρτητα από το παραμορφωμένο εργαλείο, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια του μοντέλου. Στο κάτω μέρος του σχήματος 5.17 με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το πρώτο περιφερειακό σημείο του εργαλείου και με μπλε χρώμα το δεύτερο. Τα σημεία αυτά περιστρεφόμενα και προωθούμενα ως προς τον άξονα του εργαλείου, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κοπής, δημιουργούν τις δύο τρισδιάστατες τροχιές στις οποίες προστίθενται οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από το μοντέλο DYNADRILL. Στο κάτω αριστερά μέρος του σχήματος 5.17 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω διαδικασίας.

5.3.5 Αποτελέσματα κατανομής τάσεων υπό δυναμική φόρτιση

Για τη μελέτη της κατανομής των τάσεων υπό δυναμική φόρτιση, αναπτύχθηκε μέθοδος μεταεπεξεργασίας η οποία περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε κώδικας μεταεπεξεργασίας ο οποίος ενσωματώθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης ANSYS. Ο κώδικας είναι υπεύθυνος για την εξαγωγή των τάσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος για όλα τα στάδια φόρτισης και για την εξαγωγή των αντίστοιχων κόμβων με τις συντεταγμένες τους. Επίσης ο κώδικας εξάγει τις δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κόμβο και για κάθε χρονικό βήμα στις συγκεκριμένες περιοχές, για περαιτέρω επαλήθευση του αλγορίθμου.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα DIATRISIS εκτελεί ένα δεύτερο στάδιο μεταεπεξεργασίας στο οποίο τα αρχεία εξόδου επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να προκύψουν οι τάσεις στο ανάπτυσμα της κόψης του εργαλείου σε συνάρτηση με το χρόνο. Τα αποτελέσματα αυτής της επεξεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18. Από τα πειράματα που εξετάστηκαν, οι

μεγαλύτερες τάσεις παρατηρήθηκαν στο εργαλείο διαμέτρου 12mm και για πρόωση 0,6mm/rev. Οι μέγιστες τάσεις στο ανάπτυγμα των κόψεων παρατηρούνται στη γωνία του εργαλείου, όπου η εγκάρσια κόψη συναντά την κύρια.



Σχήμα 5.18 Κατανομή τάσεων στο ανάπτυγμα των κόψεων συναρτήσει του χρόνου

Συνολικά σε ολόκληρο το εργαλείο, η περιοχή των μέγιστων τάσεων οι οποίες φτάνουν τα 1286Μpa, παρατηρείται στην παρειά της εγκάρσιας κόψης και ακολουθεί τη ροή του αποβλίπτου. Η περιοχή αυτή εικονίζεται στο κάτω αριστερό μέρος του σχήματος 5.17 με τη βοήθεια της συσκευής μηδενισμού και μέτρησης φθοράς Microset 115. Υπο της εταιρίας DMG, ενώ δίπλα παρουσιάζεται η περιοχή ανάπτυξης των μέγιστων τάσεων στο μοντέλο που προτείνεται, επιβεβαιώνοντας έτσι περαιτέρω τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Στην πρόωση των 0,2mm/rev παρατηρείται μια αποφόρτιση του εργαλείου, με τις μέγιστες τάσεις στην κόψη να διαμορφώνονται στα 882Μpa και τις μέγιστες τάσεις στην παρειά της εγκάρσιας κόψης να διαμορφώνονται στα 1042Μpa. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται αυξημένη ταλαντωτική συμπεριφορά του εργαλείου, κάτι το οποίο απεικονίζεται στη χρονική μεταβολή των τάσεων και επαληθεύεται και από τις μετρήσεις της οπής που θα παρουσιαστούν σε επόμενη παράγραφο.

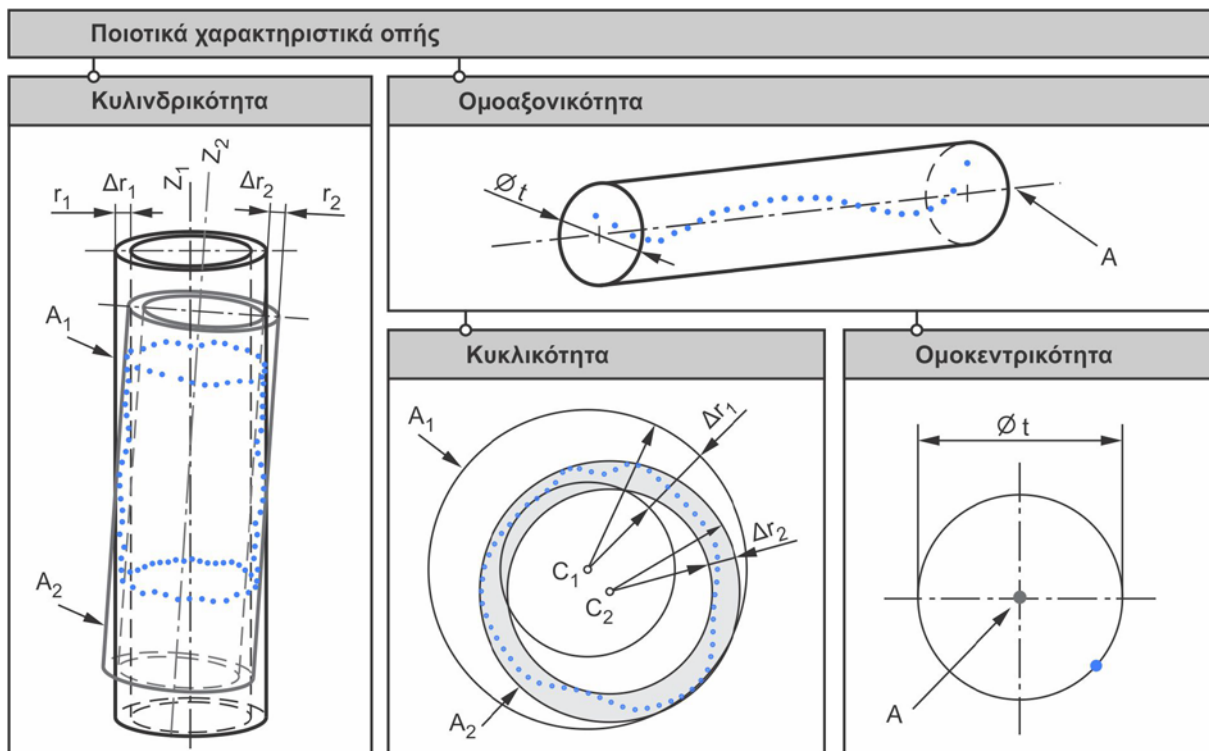
Για το εργαλείο διαμέτρου 14mm οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται για πρόωση 0,5mm/rev και διαμορφώνονται στα 1070Μpa στην εγκάρσια κόψη και 1217Μpa στην παρειά της εγκάρσιας κόψης. Για πρόωση ίση με 0,4mm/rev η μέγιστη τάση στην εγκάρσια κόψη ισούται με 1010Μpa και με 1123Μpa στην παρειά της εγκάρσιας κόψης. Η αποφόρτιση του εργαλείου συνεχίζεται και στην πρόωση των 0,3mm/rev όπου η μέγιστη τάση στην εγκάρσια κόψη ισούται με 840Μpa και 1021Μpa στην παρειά της εγκάρσιας κόψης. Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρείται εντονότερη διακύμανση των τάσεων, στην εγκάρσια κόψη και κοντά σε αυτήν, σε σχέση με την περιφέρεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η περιοχή αυτή παραλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δυνάμεων, ενώ το πάχος αποβλίπτου είναι μικρότερο σε σχέση με την περιφέρεια.

5.4 Πρόβλεψη ποιοτικών χαρακτηριστικών οπής

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του συστήματος DIATRISIS είναι η πρόβλεψη των ποιοτικών χαρακτηριστικών της οπής. Στα χαρακτηριστικά που μελετώνται περιλαμβάνονται η κυκλικότητα, η ομοκεντρικότητα, η ομοαξονικότητα και η κυλινδρικήτητα της οπής, όπως αυτές ορίζονται στο πρότυπο ISO1101 [137] και παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.19](#).

Η ομοαξονικότητα ανήκει στις ανοχές θέσης και αναφέρεται στη διάμετρο ενός κυλίνδρου ομοαξονικού προς μια γραμμή αναφοράς μέσα στον οποίο πρέπει να βρίσκονται όλα τα σημεία ενός άξονα. Η δεύτερη ανοχή θέσης που εξετάζεται έχει να κάνει με την ομοκεντρικότητα. Η ομοκεντρικότητα αναφέρεται στη διάμετρο ενός κύκλου, ομόκεντρου προς ένα σημείο αναφοράς, μέσα στον οποίο πρέπει να βρίσκεται το πραγματικό κέντρο.

Η κυκλικότητα ανήκει στις ανοχές μορφής και αναφέρεται στη διαφορά των ακτινών δύο συνεπίπεδων και ομόκεντρων κύκλων, μέσα στους οποίους πρέπει να βρίσκονται όλα τα σημεία του προφίλ της μετρημένης οπής. Οι κύκλοι αυτοί πρέπει να λαμβάνονται έτσι ώστε η διαφορά των ακτινών τους να είναι ελάχιστη $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Στο πρότυπο ISO4291 [116] αναφέρονται τρεις μέθοδοι εκτίμησης της κυκλικότητας. Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται στον προσδιορισμό του κέντρου από το οποίο θα υπολογιστούν οι δύο ομόκεντροι κύκλοι, από τους οποίους εν συνεχεία θα υπολογιστεί η τιμή της κυκλικότητας. Οι διαθέσιμες μεθοδολογίες περιλαμβάνουν τη μέθοδο προσδιορισμού του κέντρου ελαχίστων τετραγώνων (LSC), τη μέθοδο κέντρου ελάχιστης ζώνης (MZC), τη μέθοδο κέντρου ελάχιστου εγγεγραμμένου κύκλου (MCC) και τη μέθοδο κέντρου ελάχιστου περιγεγραμμένου κύκλου (MIC). Στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί βασίζονται στη μέθοδο LSC, η οποία είναι πιο αξιόπιστη και γρήγορη μέθοδος εφόσον δεν επηρεάζεται από πιθανές ακραίες ακτινικές τιμές του μετρούμενου προφίλ [138].



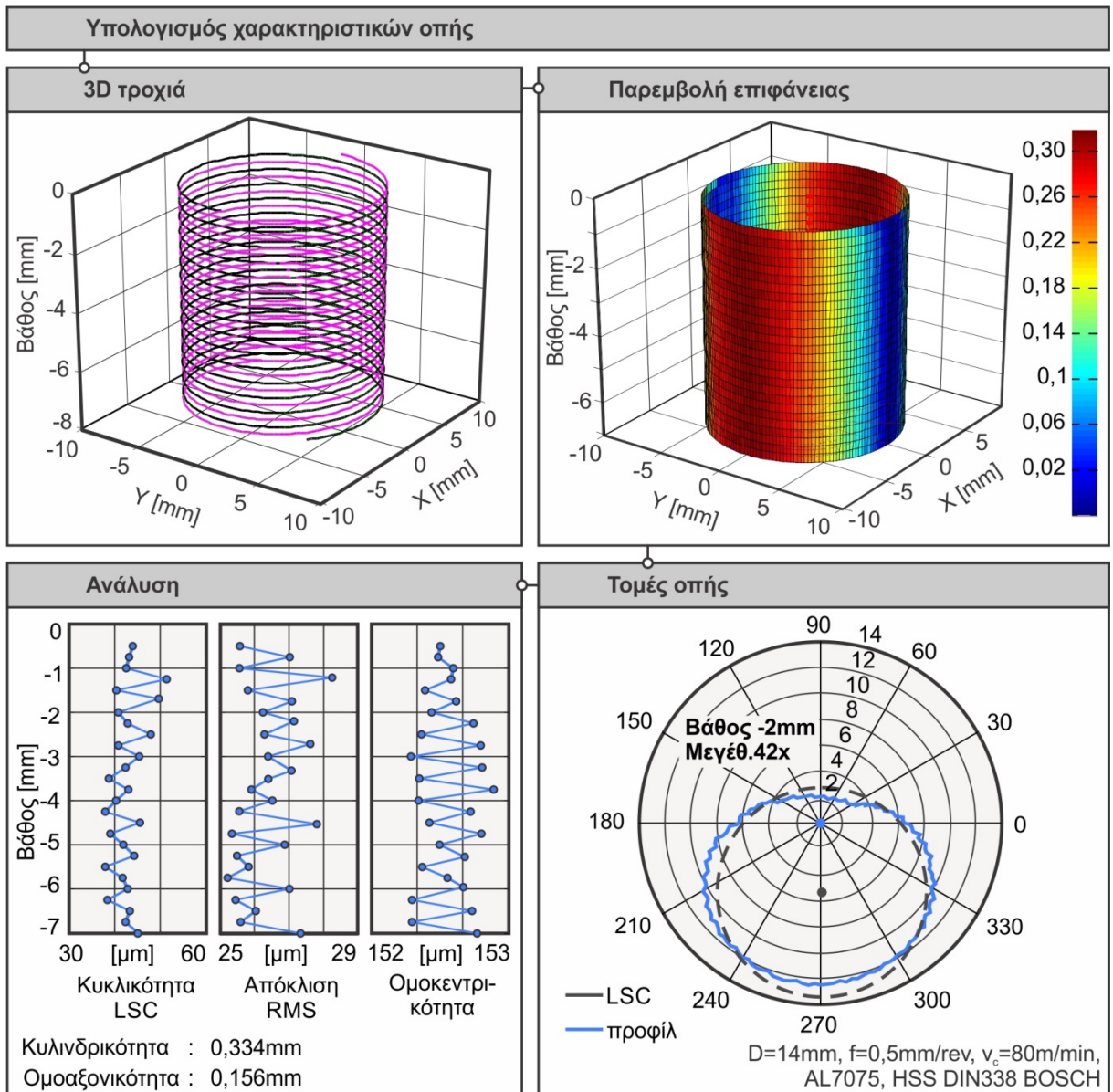
Σχήμα 5.19 Μετρούμενα χαρακτηριστικά οπής

Η κυλινδρικήτητα ανήκει επίσης στις ανοχές μορφής και ορίζεται ως η ελάχιστη ακτινική διαφορά δύο ομοαξονικών κυλίνδρων οι οποίοι περικλείουν όλα τα σημεία της μετρούμενης επιφάνειας της οπής, έτσι ώστε $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Ο άξονας των κυλίνδρων προκύπτει από παρεμβολή στα επιμέρους κέντρα των διαφόρων επιπέδων της οπής. Η εκτίμηση της κυλινδρικήτητας γίνεται με βάση τις ακόλουθες μεθόδους: τη μέθοδο προσδιορισμού κυλίνδρου ελάχιστης ζώνης (MZCY), τη μέθοδο μέγιστου εγγεγραμμένου κυλίνδρου (MICY), τη μέθοδο ελάχιστου περιγεγραμμένου κυλίνδρου (MCCY) και τη μέθοδο κυλίνδρου ελαχίστων τετραγώνων (LSCY), όπως αυτές αναφέρονται στο ISO12180-1 [139]. Στην παρούσα εργασία, όλοι οι υπολογισμοί κυλινδρικήτητας γίνονται βάσει της μεθόδου LSCY λόγω της αυξημένης αξιοπιστίας που παρουσιάζει.

Η διαδικασία υπολογισμού των χαρακτηριστικών της οπής παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.20](#). Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τρισδιάστατης παραμορφωμένης τροχιάς, η οποία προκύπτει με τη βοήθεια της μεθόδου που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.4.

Για τον υπολογισμό της κυκλικότητας και κατ' επέκταση των υπολοίπων χαρακτηριστικών, τα σημεία της τρισδιάστατης τροχιάς πρέπει να είναι συνεπίπεδα. Για το λόγο αυτό, στο δεύτερο στάδιο, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελεί μια δισδιάστατη κυβική παρεμβολή στο ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας, ώστε να υπολογιστεί το προφίλ της οπής σε κάθε επίπεδο. Η διακριτοποίηση της παρεμβολής ορίζεται από το χρήστη. Εν συνεχεία, γίνεται αναπαράσταση της παραμορφωμένης κυλινδρικής επιφάνειας με τη βοήθεια μπαλωμάτων, ενώ η χρωματική κλίμακα της οπής ορίζει τη διαφορά της μετρούμενης ακτίνας από την ακτίνα και το κέντρο αναφοράς.

Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τη δισδιάστατη επεξεργασία όλων των επιπέδων της οπής. Στο κάτω δεξί μέρος του σχήματος, παρουσιάζεται το προφίλ της προσομοιωμένης οπής σε βάθος 2mm, μεγεθυμένο κατά 42 φορές. Στο προφίλ αυτό παρεμβάλλεται ο κύκλος ελαχίστων τετραγώνων και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές της κυκλικότητας και της ομοκεντρικότητας.



Σχήμα 5.20 Μεθοδολογία υπολογισμού χαρακτηριστικών οπής

Τέλος, το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τρισδιάστατων χαρακτηριστικών της οπής. Στο στάδιο αυτό εξάγονται τα γραφήματα της κυκλικότητας, της μέσης τετραγωνικής απόκλισης της κυκλικότητας και της ομοκεντρικότητας, συναρτήσεως του βάθους της οπής. Η τιμή της ομοαξονικότητας υπολογίζεται με βάση τον άξονα που προκύπτει από τη γραμμική παρεμβολή των κέντρων ελαχίστων τετραγώνων σε όλα τα επίπεδα της οπής. Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία των μετρήσεων, γίνεται σύγκριση των ανοχών και εξάγεται η αντίστοιχη ποιότητα της οπής, σύμφωνα με το πρότυπο ISO286 [140] που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2.

Διαστάσεις σε μm													
[mm]	έως 3	3 έως 6	6 έως 10	10 έως 18	18 έως 30	30 έως 50	50 έως 80	80 έως 120	120 έως 180	180 έως 250	250 έως 315	315 έως 400	400 έως 500
IT01	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1,2	2	2,5	3	4
IT0	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1	12	1,5	2	3	4	5	6
IT1	0,8	1	1	1,2	1,5	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7	8

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής

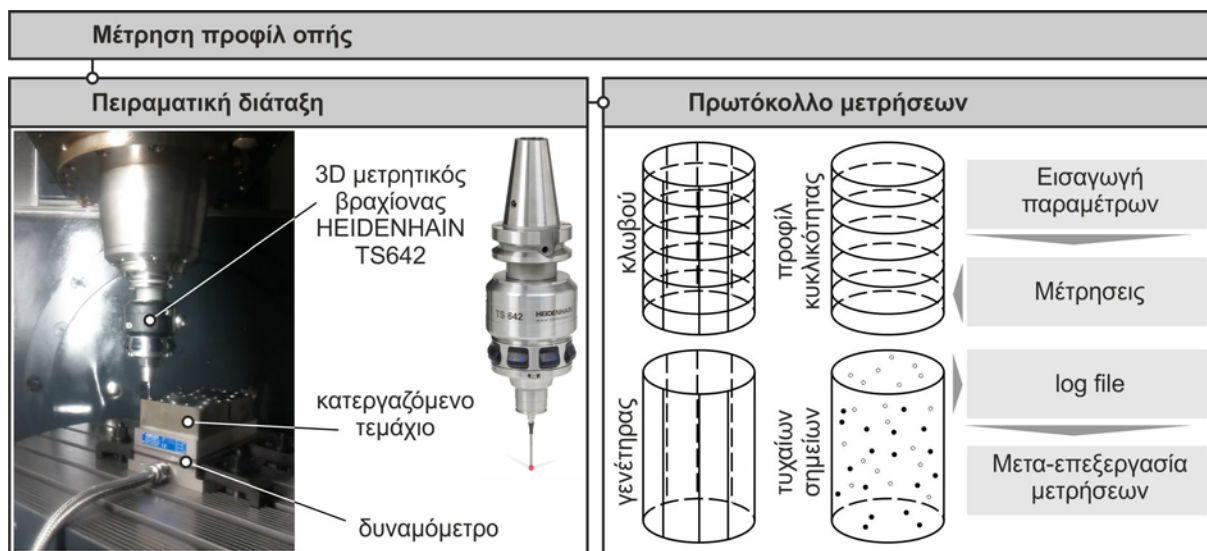
IT2	1,2	1,5	1,5	2	2,5	2,5	3	4	5	7	8	9	10
IT3	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT4	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT5	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	26	27
IT6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT15	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT16	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000
IT17	1000	1200	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4000	4600	5200	5700	6300
IT18	1400	1800	2200	2700	3300	3900	4600	5400	6300	7200	8100	8900	9700

Πίνακας 5.2 Ποιότητες ανοχών κατά ISO286

5.5 Επιβεβαίωση μοντέλου ανάλυσης εργαλείων και οπής

Για την επιβεβαίωση του μοντέλου ανάλυσης εργαλείων και οπής, διεξήχθησαν πειράματα σε AL7075 στην πειραματική διάταξη που εικονίζεται στο [Σχήμα 5.21](#). Η διάταξη αποτελείται από ένα δυναμόμετρο Kistler 9257BA με τον ελεγκτή του Kistler 5233A το οποίο στερεώθηκε κατάλληλα στην περιστρεφόμενη τράπεζα. Στο επάνω μέρος του δυναμόμετρου στερεώθηκε κατάλληλα το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης είναι πως, εκτός από τον υπολογισμό των ανοχών μορφής, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού και ανοχών θέσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η μέτρηση λαμβάνει χώρα μέσα στην εργαλειομηχανή και ακριβώς μετά την κατεργασία, οπότε το κατεργασμένο τεμάχιο παραμένει σταθερό. Για τη μέτρηση των οπών χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος μετρητικός βραχίονας HEIDENHAIN TS642. Λόγω του μεγάλου πλήθους των μετρήσεων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας οπής, η διαδικασία αυτοματοποιήθηκε, κάνοντας χρήση των προχωρημένων δυνατοτήτων του ελεγκτή της εργαλειομηχανής Siemens Sinumerik810D. Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε ο χρήστης εισάγει το αρχικό και τελικό βάθος των επιπέδων μέτρησης και τη διακριτοποίηση της γωνίας και του βάθους των μετρήσεων και ο ελεγκτής αναλαμβάνει την αυτόματη καταγραφή των αποτελεσμάτων σε ειδικά διαμορφωμένα αρχεία.

Οι στρατηγικές μέτρησης μιας οπής παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.21](#) και είναι σύμφωνες με το ISO12180-2 [141]. Για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας ακολουθήθηκε η στρατηγική μέτρησης των προφίλ κυκλικότητας. Η διακριτοποίηση της γωνίας των μετρήσεων ορίστηκε στις 5 μοίρες και η διακριτοποίηση του βάθους στα 0,5mm. Το αρχικό επίπεδο μέτρησης ορίστηκε στα -2,5mm ενώ το τελικό επίπεδο στα -9mm. Ο διαθέσιμος κύκλος μετρήσεων του ελεγκτή λαμβάνει μετρήσεις στη θετική και αρνητική κατεύθυνση των αξόνων x και y. Έτσι, οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη σειρά 0 - 180 - 90 - 270 και στη συνέχεια γίνεται επαναφορά του βραχίονα και περιστροφή της τράπεζας κατά τη γωνία διακριτοποίησης. Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις σε ένα επίπεδο, η τράπεζα επιστρέφει στο αρχικό σημείο και ο βραχίονας μετακινείται κάθετα κατά απόσταση ίση με τη διακριτοποίηση του βάθους και ξεκινά τη μέτρηση του επόμενου επιπέδου. Για την μεταεπεξεργασία του αρχείου των μετρήσεων αναπτύχθηκε ειδικό πρόγραμμα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.21 Πειραματική διάταξη

5.5.1 Σχεδιασμός των πειραμάτων

Πείραμα	D [mm]	v_c [m/min]	f [mm/rev]
1	12	80	0,2
2	12	80	0,6
3	14	80	0,3
4	14	80	0,4
5	14	80	0,5

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων βασίστηκε στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και καλύπτει δύο διαφορετικές διαμέτρους εργαλείου και πέντε διαφορετικές προώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Για το εργαλείο διαμέτρου 12mm εξετάστηκαν δύο προώσεις: 0,2 και 0,6mm/rev. Για το εργαλείο διαμέτρου 14mm εξετάστηκαν τρεις προώσεις: 0,3, 0,4 και 0,5mm/rev.

Πίνακας 5.3 Συνθήκες κοπής AL7075

Η ταχύτητα κοπής παρέμεινε σταθερή και ίση με 80m/min σε όλα τα πειράματα ενώ πρέπει να αναφερθεί ότι η ταχύτητα κοπής και οι προώσεις που επιλέχθηκαν αφορούν συνθήκες πολύ υψηλής παραγωγικότητας [142]. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ειδικό ψυκτικό υγρό για κοπές αλουμινίου για την αποφυγή υπερθέρμανσης του κοπτικού εργαλείου.

5.5.2 Αποτελέσματα

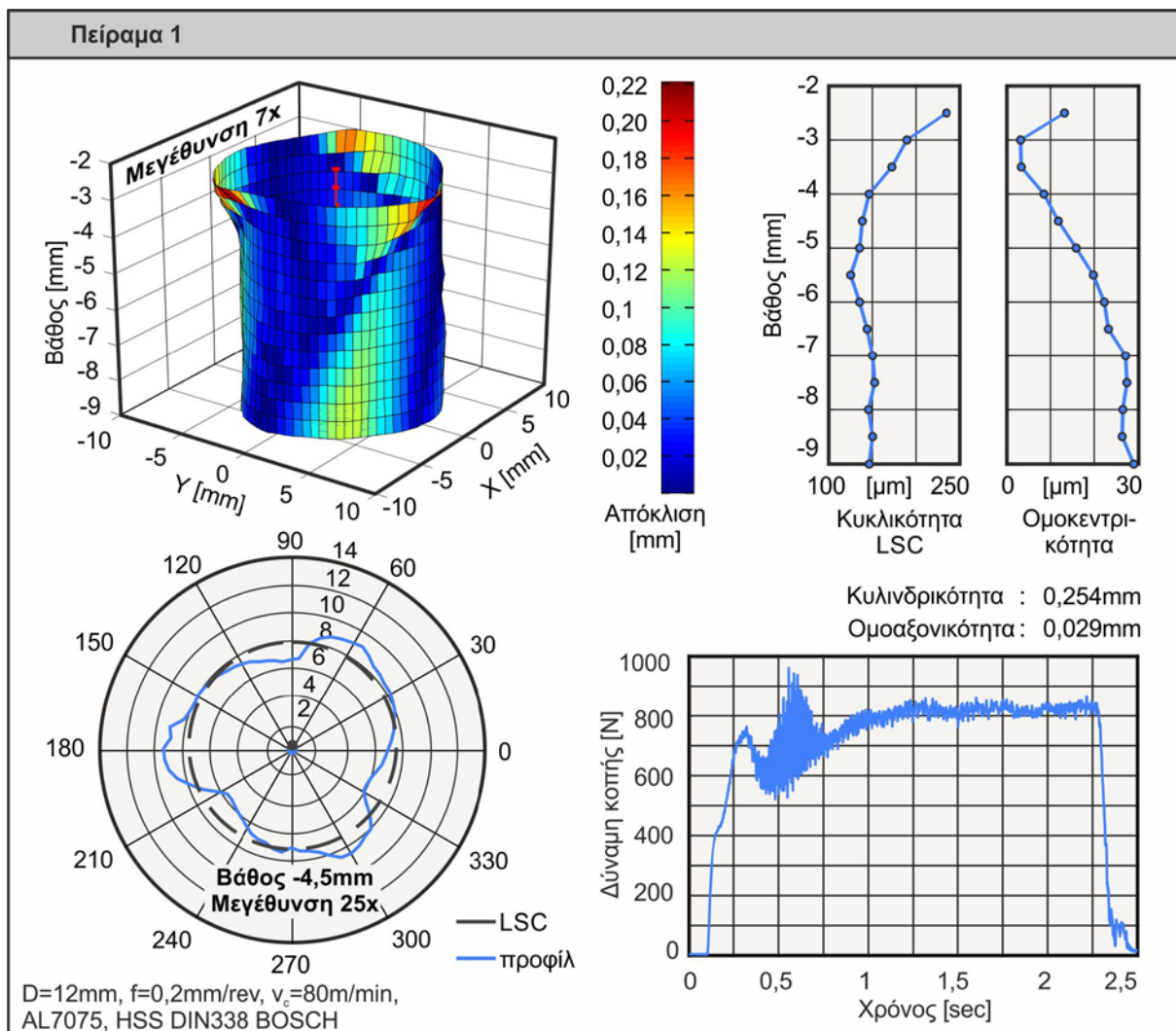
Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τις μετρήσεις της οπής σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες δυναμομετρήσεις. Το πρώτο αποτέλεσμα αφορά την τρισδιάστατη αναπαράσταση της μετρημένης οπής. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στη διαφορά του μετρημένου προφίλ σε κάθε επίπεδο από τη θεωρητική ακτίνα και το κέντρο του κυλίνδρου ελαχίστων τετραγώνων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της κυκλικότητας (μετρημένης με τη μέθοδο LSC) και της ομοκεντρικότητας συναρτήσει του βάθους μέτρησης. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της κυλινδρικότητας και της ομοαξονικότητας που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Επίσης παρουσιάζεται το πολικό διάγραμμα που αντιστοιχεί σε βάθος μέτρησης ίσο με το μισό του συνολικού βάθους. Τόσο η κλίμακα μεγέθυνσης του προφίλ στο δισδιάστατο πολικό διάγραμμα, όσο και η αντίστοιχη κλίμακα μεγέθυνσης της τρισδιάστατης αναπαράστασης, επιλέγονται αυτόματα κάθε φορά με βάση τους κανόνες απεικόνισης του προτύπου ISO4291 [116]. Με μπλε χρώμα στο διάγραμμα απεικονίζεται το θεωρητικό κέντρο και το μετρούμενο προφίλ της οπής σε μεγέθυνση, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται ο κύκλος ελαχίστων τετραγώνων και το αντίστοιχο κέντρο του.

Τέλος, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται και η αντίστοιχη δυναμομέτρηση.

Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα υπήρξε έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά του εργαλείου, πράγμα που απεικονίζεται τόσο στη μετρημένη οπή όσο και στη δυναμομέτρηση. Στην αναπαράσταση της τρισδιάστατης οπής παρατηρούνται τρεις κορυφές με μέγιστη απόκλιση 0,22mm από τον κύκλο ελαχίστων τετραγώνων του συγκεκριμένου επιπέδου. Οι κορυφές αυτές παρατηρούνται και στο πολικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στο επίπεδο -4,5mm όπου παρατηρείται μια σχετική εξομάλυνση. Η εξομάλυνση αυτή οφείλεται στη σταδιακή εισχώρηση του εργαλείου στο τεμάχιο, μεταβάλλοντας έτσι τις οριακές του συνθήκες και συνεπώς τη δυναμική του συμπεριφορά.

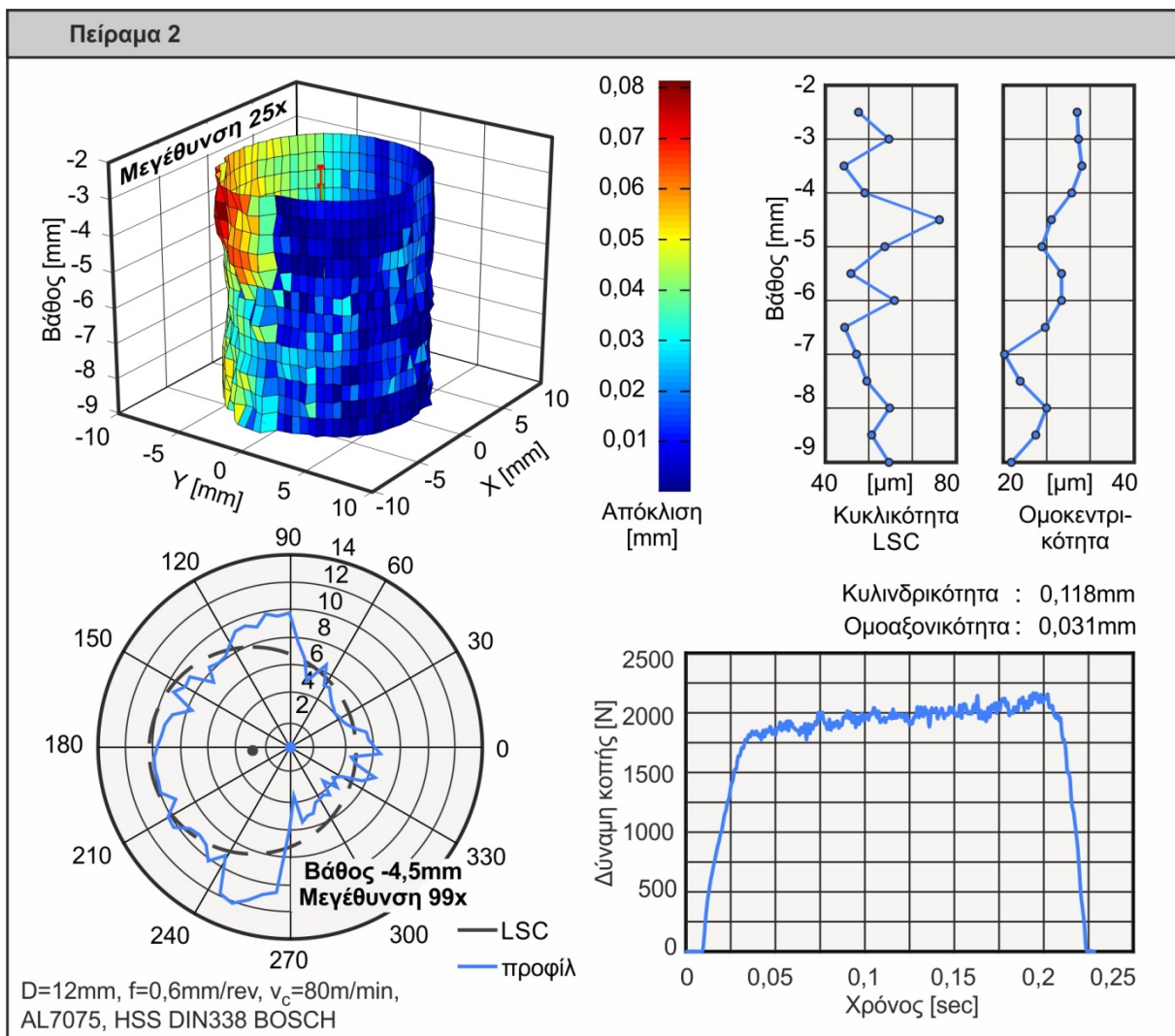
Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η δυναμομέτρηση του πειράματος, όπου παρατηρείται αυξημένος θόρυβος στο χρονικό διάστημα 0,35 - 0,75sec, που αντιστοιχεί στη μεταβατική περιοχή της κοπής. Στη συνέχεια παρατηρείται εξομάλυνση των αποκλίσεων, τόσο της μετρημένης οπής, όσο και της δυναμομέτρησης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στον υπολογισμό της κυκλικότητας με τη μέθοδο LSC ανά επίπεδο μέτρησης. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στα βάθη μέτρησης -2,5 έως -3,5mm και η μέγιστη τιμή της ανέρχεται στα 238 μ m. Στη συνέχεια η τιμή της σταθεροποιείται περίπου στα 150 μ m.



Σχήμα 5.22 Αποτελέσματα 1ου πειράματος

Παρ' όλη την έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά του συγκεκριμένου πειράματος, οι τιμές της ομοκεντρικότητας ανά επίπεδο μέτρησης παραμένουν αρκετά χαμηλές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι παραμορφώσεις, παρ' όλο που είναι μεγάλες σε μέγεθος είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα του εργαλείου. Επίσης παρατηρείται μια αυξανόμενη τάση της ομοκεντρικότητας σε συνάρτηση με το βάθος μέτρησης ως συνέπεια της έκκεντρης εισχώρησης του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, η οποία έχει μελετηθεί από τους ερευνητές [143, 144]. Η μέγιστη τιμή της ομοκεντρικότητας ανέρχεται στα 29 μm . Η κυλινδρικότητα, λόγω των υψηλών αρχικών παραμορφώσεων ανέρχεται στα 254 μm , ενώ η ομοαξονικότητα ανέρχεται στα 29 μm λόγω των σχετικά χαμηλών τιμών της ομοκεντρικότητας. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.2 η κατηγορία της ποιότητας της οπής είναι η IT13.

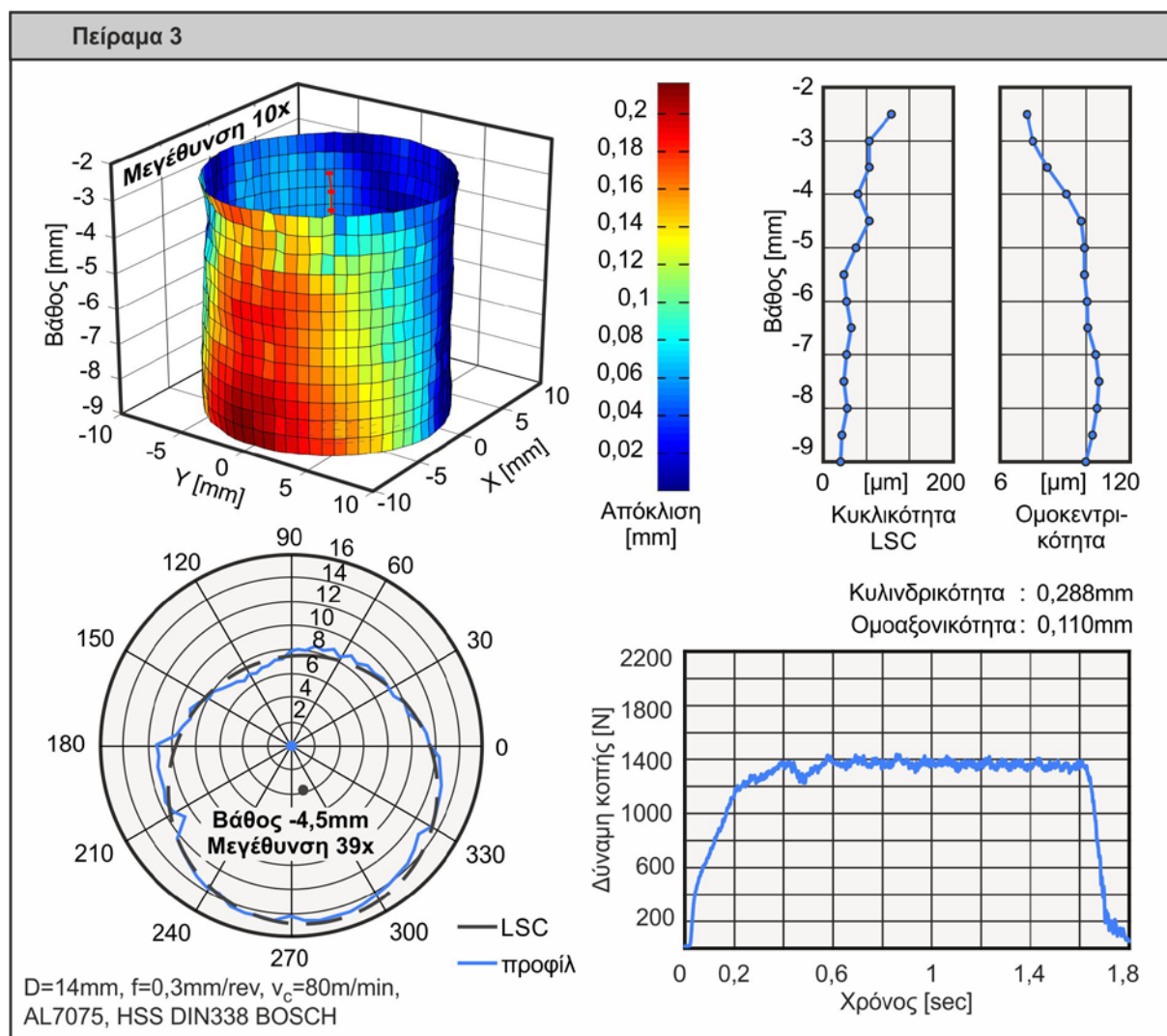
Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου πειράματος. Στην τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής παρατηρείται μια κορυφή με μέγιστη απόκλιση 80 μm από τον κύκλο ελαχίστων τετραγώνων του δεύτερου επιπέδου μέτρησης. Για βάθος κοπής μεγαλύτερο των 5mm παρατηρείται μια εξομάλυνση των μετρήσεων ανάλογη με αυτήν του πρώτου πειράματος. Η δύναμη κοπής παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 2000N. Η μέγιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρήθηκε για βάθος μέτρησης -4,5mm και το αντίστοιχο προφίλ της οπής παρουσιάζεται στο κάτω αριστερά πολικό διάγραμμα. Για τα υπόλοιπα επίπεδα η τιμή της κυκλικότητας διαμορφώνεται περίπου στα 50 μm .



Σχήμα 5.23 Αποτελέσματα 2ου πειράματος

Η ομοκεντρικότητα των διαδοχικών προφίλ κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα με τη μέγιστη τιμή της στα 31 μm , η οποία μειώνεται σταδιακά με αύξηση του βάθους μέτρησης. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να επιβεβαιωθεί και από την τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής, όπου φαίνεται η ομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων στα τοιχώματα, με εξαίρεση την μικρή κορυφή στο επάνω μέρος της οπής. Η κυλινδρικότητα της οπής υπολογίστηκε στα 118 μm και η αντίστοιχη ποιότητά της ορίζεται σε IT12. Η ομοαξονικότητα της οπής διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και ισούται με 31 μm .

Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τρίτου πειράματος. Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής παρουσιάζει μια ομοιόμορφη απόκλιση με απόκλιση 170 μm από τον κύκλο ελαχίστων τετραγώνων του πρώτου επιπέδου μέτρησης, ενώ η μέγιστη απόκλιση από τη θεωρητική ακτίνα ισούται με 200 μm . Για βάθος μέτρησης μεγαλύτερο των 4,5mm παρατηρείται αύξηση των αποκλίσεων από τη θεωρητική ακτίνα των 7mm. Η μέγιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρήθηκε για βάθος μέτρησης -2,5mm και ισούται με 102 μm . Στη συνέχεια, η τιμή της κυκλικότητας μειώνεται και η μέση τιμή της κυμαίνεται στα 50 μm . Οι χαμηλές τιμές της κυκλικότητας επιβεβαιώνονται και από το πολικό διάγραμμα σε βάθος μέτρησης -4,5mm όπου οι αποκλίσεις είναι ομοιόμορφες.

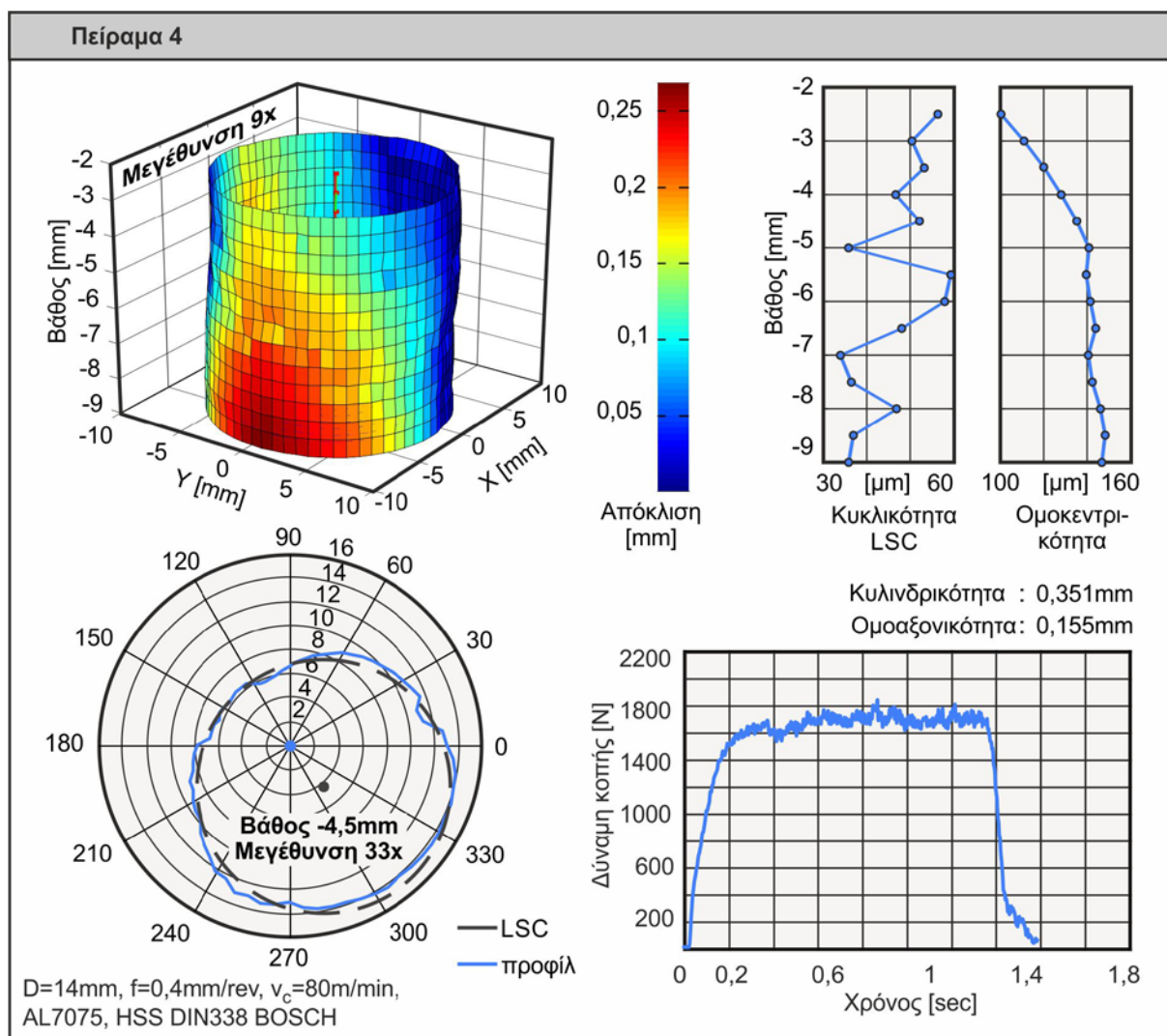


Σχήμα 5.24 Αποτελέσματα 3ου πειράματος

Η δύναμη κοπής παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 1400N. Η ομοκεντρικότητα των διαδοχικών προφίλ κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα με τη μέγιστη τιμή της στα 110 μm , ενώ

αυξάνεται σε σχέση με το βάθος κοπής. Οι τιμές της ομοκεντρικότητας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη αναπαράσταση υποδεικνύουν τη λοξή εισχώρηση του κοπτικού στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η κυλινδρικότητα της οπής υπολογίστηκε στα 288 μm και η αντίστοιχη ποιότητα της ορίζεται σε IT14. Η ομοαξονικότητα της οπής μετρήθηκε στα 110 μm .

Τα αποτελέσματα του τέταρτου πειράματος παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.25](#). Στην τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των αποκλίσεων οι οποίες μεγιστοποιούνται στο τελευταίο επίπεδο της οπής και αγγίζουν τα 250 μm . Για βάθος μέτρησης μεγαλύτερο των 3,5mm παρατηρείται αύξηση των αποκλίσεων από τη θεωρητική ακτίνα των 7mm. Η μέγιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρείται στο επίπεδο μέτρησης των 5,5mm και ανέρχεται στα 59 μm , ενώ η τιμές της παραμένουν σχετικά μειωμένες με το μέσο όρο να κινείται στα 48 μm . Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, οι τιμές της κυκλικότητας παραμένουν χαμηλές λόγω της ομοιομορφίας των αποκλίσεων, ομοιομορφία η οποία φαίνεται και στο πολικό διάγραμμα σε βάθος -4,5mm. Η δύναμη κοπής παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 1700N. Οι τιμές της ομοκεντρικότητας κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα με τη μέγιστη τιμή να διαμορφώνεται στα 155 μm και τη μέση τιμή στα 135 μm .

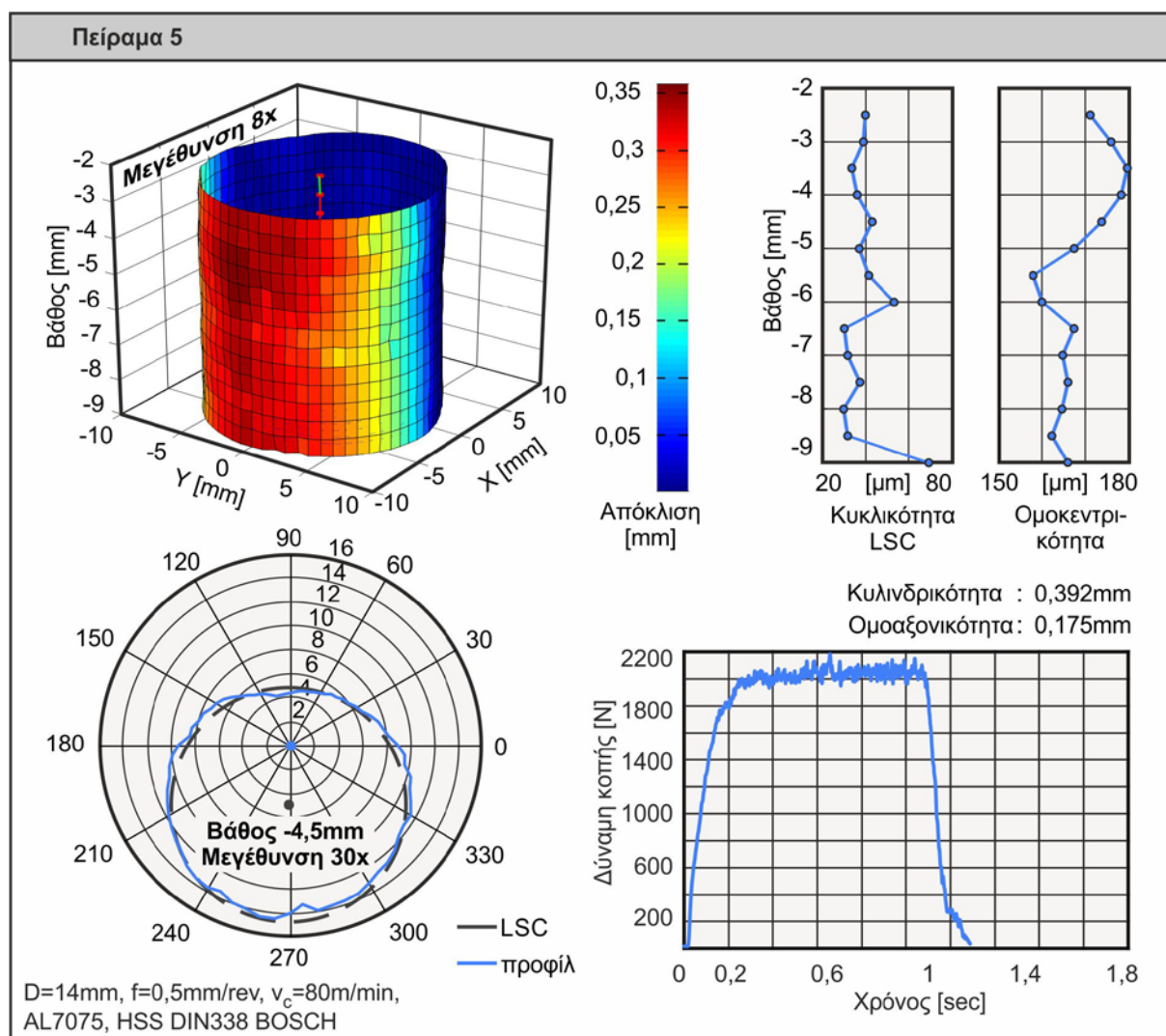


Σχήμα 5.25 Αποτελέσματα 4ου πειράματος

Τόσο από τις τιμές της ομοκεντρικότητας, οι οποίες αυξάνονται με αύξηση του βάθους μέτρησης, όσο και από την τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής, αποδεικνύεται η λοξή

εισχώρηση του εργαλείου στο τεμάχιο. Η κυλινδρική της οπής μετρήθηκε στα 351 μm ενώ η ομοαξονικότητα στα 155 μm . Σύμφωνα με τον πίνακα 5.2 η ποιότητα της ανοχής εμπίπτει στην κατηγορία IT14.

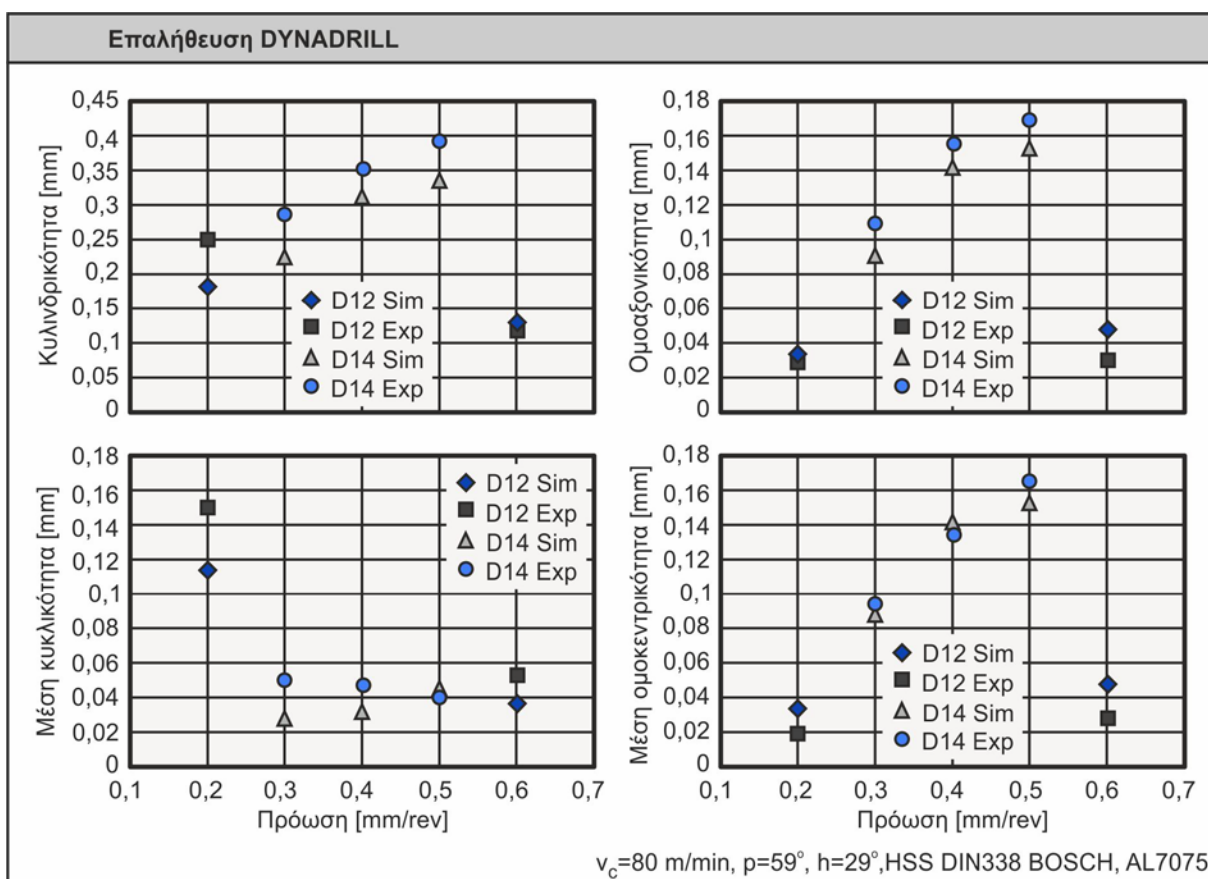
Τα αποτελέσματα του τελευταίου πειράματος επαλήθευσης παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.26](#). Στην τρισδιάστατη αναπαράσταση της οπής παρατηρούνται μονόπλευρες αποκλίσεις συναρτήσει του βάθους μέτρησης, με τη μέγιστη τιμή τους να φτάνει τα 350 μm . Οι αποκλίσεις αυτές δίνουν στην οπή ένα ελλειψοειδές σχήμα το οποίο παρατηρήθηκε και στα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σχήματος 5.19. Η μέγιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρείται στο τελευταίο επίπεδο και ανέρχεται στα 70 μm . Και σε αυτό το πείραμα η κυκλικότητα ανά επίπεδο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα με το μέσο όρο να κυμαίνεται στα 40 μm . Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται, όπως και στα προηγούμενα πειράματα, στις ομοιόμορφες αποκλίσεις οι οποίες παρουσιάζονται και στο αντίστοιχο πολικό διάγραμμα. Η δύναμη κοπής ανέρχεται στα 2000N και παραμένει σταθερή. Η ομοκεντρικότητα παρουσιάζει φθίνουσα τάση με τη μέγιστη τιμή της να ανέρχεται στα 175 μm και τη μέση τιμή της στα 165 μm . Η τιμή της ομοκεντρικότητας σταθεροποιείται μετά τα 5,5mm βάθους μέτρησης. Η κυλινδρικότητα υπολογίστηκε στα 392 μm και η ομοαξονικότητα στα 175 μm . Η ποιότητα της ανοχής της οπής εμπίπτει στην κατηγορία IT14.



Σχήμα 5.26 Αποτελέσματα 5ου πειράματος

Συνολικά στα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι ποιότητες των ανοχών κυμάνθηκαν από IT12 - IT14. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των προσομοιωμένων και των αντίστοιχων μετρημένων οπών, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.27.

Αναφορικά με την πρόβλεψη της κυλινδρικότητας, παρατηρείται μια μικρή υποεκτίμηση των μεγεθών από το μοντέλο DYNADRILL. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται για το εργαλείο διαμέτρου 12mm και στην πρόωση των 0,2mm/rev. Στην περίπτωση αυτή υπήρξε αυξημένη ταλαντωτική συμπεριφορά του εργαλείου, όπως αναλύθηκε στο Σχήμα 5.22. Η συμπεριφορά αυτή δεν ήταν δυνατόν να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο το οποίο υποθέτει μια μέση δυναμική φόρτιση. Το μοντέλο επίσης δε λαμβάνει υπόψη την ολίσθηση και την έκκεντρη εισχώρηση του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, φαινόμενα τα οποία συμβάλλουν στην περαιτέρω παραμόρφωση της οπής. Η κυλινδρικότητα, λόγω του ότι αποτελεί τρισδιάστατο μέγεθος, επηρεάζεται περισσότερο από τα παραπάνω φαινόμενα. Για το εργαλείο των 12mm η καλύτερη απόδοση παρατηρείται στην πρόωση των 0,6mm/rev, όπου ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού μεγιστοποιείται και παράλληλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής παραμένουν σε καλό επίπεδο ανοχών IT12. Για το εργαλείο των 14mm παρατηρείται μια γραμμική αύξηση της κυλινδρικότητας σε σχέση με την πρόωση, ενώ οι τιμές της παραμένουν υψηλές φτάνοντας τα 392μm.



Σχήμα 5.27 Επαλήθευση των αποτελεσμάτων υπολογισμού της οπής του DYNADRILL

Αναφορικά με το εργαλείο των 12mm, το μοντέλο προσεγγίζει με καλή ακρίβεια, τόσο τις μέγιστες τιμές της ομοαξονικότητας, όσο και τις μέσες τιμές της ομοκεντρικότητας. Και για τις δύο προώσεις που εξετάστηκαν οι τιμές αυτές παρέμειναν χαμηλές και κυμάνθηκαν από 20-50μm. Για το εργαλείο των 14mm το μοντέλο προσεγγίζει με επίσης καλή ακρίβεια τις τιμές της ομοαξονικότητας και της μέσης ομοκεντρικότητας. Οι τιμές αυτές αυξάνονται με αύξηση της πρόωσης κοπής ακολουθώντας τη συμπεριφορά της κυλινδρικότητας. Μια επιπλέον αιτία για την αύξηση των τιμών της ομοαξονικότητας στο εργαλείο των 14mm είναι το μεγαλύτερο

μήκος της εγκάρσιας κόπης το οποίο ευθύνεται για τη δυσκολότερη εισχώρηση του κοπτικού και άρα τη μεγαλύτερη ολίσθησή του.

Για τη μέση κυκλικότητα παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων, με εξαίρεση την περίπτωση της πρόωσης των 0,2mm/rev του εργαλείου των 12mm. Για την περίπτωση αυτή ισχύουν αντίστοιχες παρατηρήσεις με την κυλινδρικότητα. Για τα υπόλοιπα πειράματα η τιμή της μέσης κυκλικότητας παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 40 μ m.

5.6 Διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας σε σχέση με την ποιότητα της οπής

Για τη διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας εκτελέστηκε μια σειρά πειραμάτων για διαφορετικό υλικό, για τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής και για δύο εργαλεία διαφορετικής διαμέτρου. Η διερεύνηση αυτή βασίζεται στα αποτελέσματα της διάτρησης στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, ενώ επιπλέον υπολογίζονται και οι αντίστοιχες ποιότητες των ανοχών.

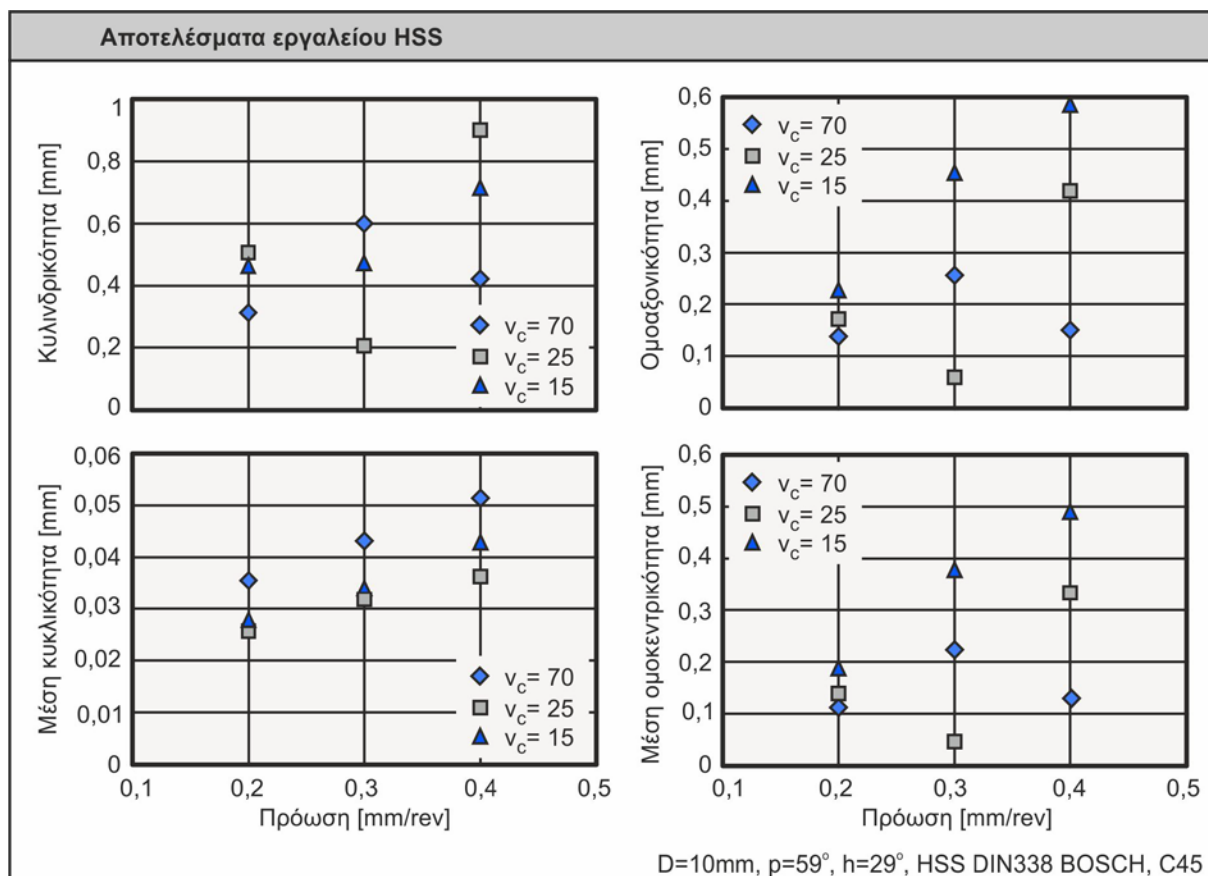
Όλα τα πειράματα έγιναν σε χάλυβα C45 σκληρότητας 62 Rockwell A και το βάθος κοπής ήταν 40mm. Επίσης τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο ίση με 10mm. Λόγω του μεγαλύτερου βάθους κοπής σε σχέση με τα αντίστοιχα πειράματα σε αλουμίνιο παρατηρούνται αυξημένες τιμές στα μετρούμενα χαρακτηριστικά. Επιπλέον λόγοι για τις αυξημένες τιμές που παρατηρούνται σε σχέση με το AL7075 είναι η μεγάλη σκληρότητα του χάλυβα καθώς και η μείωση της διαμέτρου του εργαλείου καθιστώντας το λιγότερο στιβαρό.

5.6.1 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στα χαρακτηριστικά της οπής

Οι ταχύτητες κοπής που εξετάστηκαν και για τα δύο εργαλεία ήταν 15, 25 και 70m/min ενώ λόγω των πολύ διαφορετικών χαρακτηριστικών τους, τα δύο εργαλεία έχουν διαφορετικά εύρη προτεινόμενων ταχυτήτων κοπής. Το εργαλείο καρβιδίου αποδίδει χωρίς πρόβλημα μέχρι και σε 120m/min. Αντιθέτως για το εργαλείο HSS στην ταχύτητα των 70m/min παρατηρήθηκε αυξημένη φθορά και μικροθραύσεις του εργαλείου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στο [Σχήμα 5.28](#).

Αναφορικά με την κυλινδρικότητα, το εργαλείο HSS παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ το ίδιο ισχύει και για την ομοαξονικότητα και για την μέση ομοκεντρικότητα. Οι τιμές της κυλινδρικότητας κυμαίνονται από 198 μ m (για πρόωση 0,3mm/rev) μέχρι 906 μ m (για πρόωση 0,4mm/rev). Οι τιμές της ομοαξονικότητας κυμαίνονται από 56 μ m (για πρόωση 0,3mm/rev) μέχρι 588 μ m (για πρόωση 0,4mm/rev). Η μέση ομοκεντρικότητα παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά με την ομοαξονικότητα με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 493 μ m για πρόωση ίση με 0,4mm/rev. Οι τιμές της μέσης κυκλικότητας παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά και κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 52 μ m.

Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι υπάρχει τάση βελτίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών της οπής με αύξηση της ταχύτητας και της πρόωσης κοπής. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη γρήγορη εισχώρηση του εργαλείου στο τεμάχιο, αποφεύγοντας έτσι την ολίσθηση του εργαλείου στη μεταβατική περιοχή, γεγονός το οποίο χρήζει περαιτέρω μελέτης.



Σχήμα 5.28 Σύγκριση αποτελεσμάτων οπής σε χάλυβα για το HSS εργαλείο

5.6.2 Επίδραση του εργαλείου στα χαρακτηριστικά της οπής

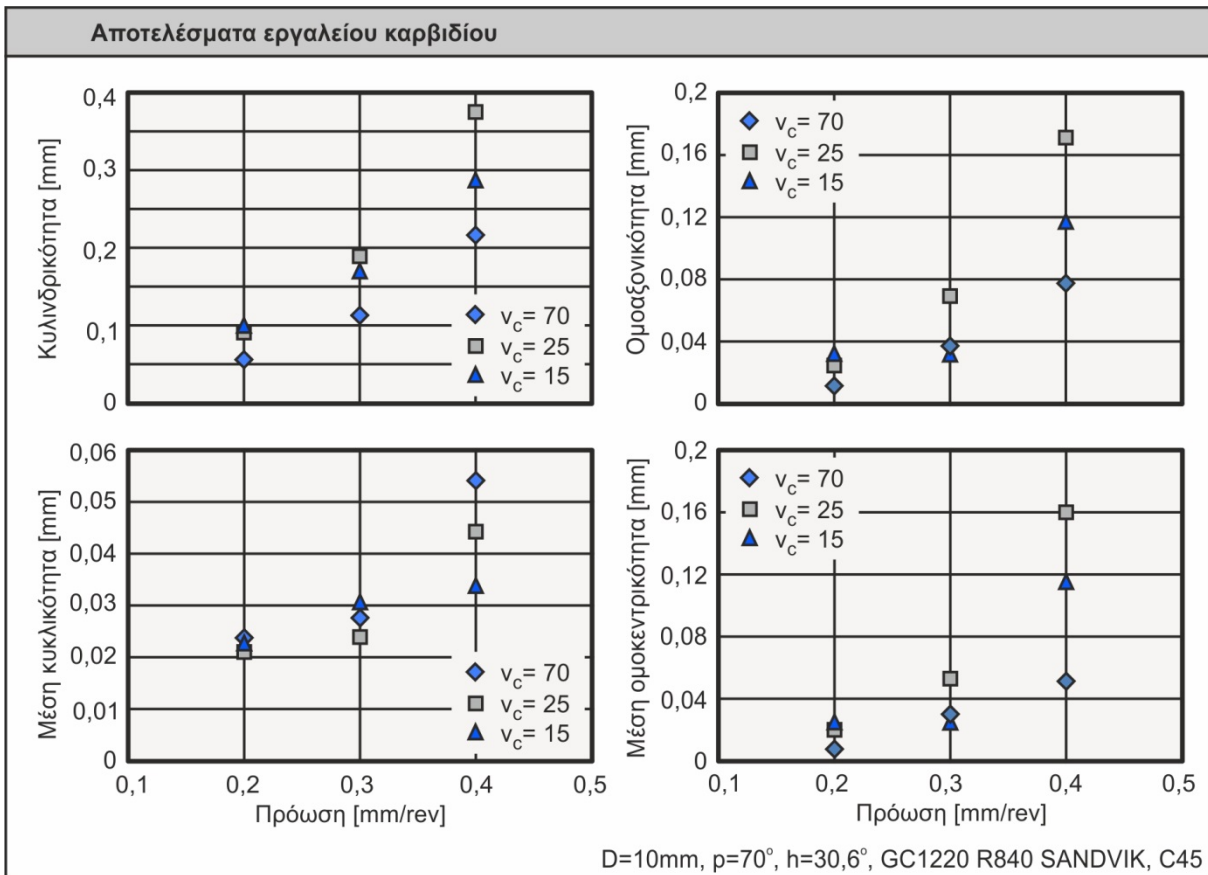
Για τη διερεύνηση της επίδρασης του εργαλείου στα χαρακτηριστικά της οπής χρησιμοποιήθηκε ένα ανώτερο ποιοτικά εργαλείο διάτρησης split point πολλαπλάσιου κόστους. Τα χαρακτηριστικά του εργαλείου περιλαμβάνουν γωνία ελίκωσης $30,6^\circ$, ημιγωνία κορυφής 140° , υλικό κατασκευής καρβίδιο GC1220 και επικαλύψεις TiN-TiAlN. Η στιβαρότητα της κατασκευής του εργαλείου έχει άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών της οπής τα οποία παρουσιάζονται εμφανώς μειωμένα από το αντίστοιχο HSS εργαλείο. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται λεπτομερέστερα στο Σχήμα 5.29.

Αναφορικά με τα μεγέθη που μετρήθηκαν παρατηρείται μια εκθετική αύξηση όλων των μεγεθών σε σχέση με την πρόωση. Επιπλέον, για μικρές τιμές τις πρόωσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής φαίνεται να σταθεροποιούνται, ενώ για μεγαλύτερες τιμές οι αποκλίσεις αυξάνονται.

Οι τιμές της κυλινδρικότητας κυμαίνονται από $57\mu\text{m}$ (για πρόωση $0,2\text{mm/rev}$) μέχρι $375\mu\text{m}$ (για πρόωση $0,4\text{mm/rev}$). Οι τιμές της ομοαξονικότητας κυμαίνονται από $12\mu\text{m}$ (για πρόωση $0,2\text{mm/rev}$) μέχρι $172\mu\text{m}$ (για πρόωση $0,4\text{mm/rev}$). Η μέση ομοκεντρικότητα παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά με την ομοαξονικότητα με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα $160\mu\text{m}$ για πρόωση ίση με $0,4\text{mm/rev}$. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή της μέσης κυκλικότητας ανέρχεται στα $54\mu\text{m}$.

Οι ποιότητες των ανοχών του εργαλείου HSS κυμαίνονται από IT13- IT16 ενώ οι αντίστοιχες ποιότητες στο εργαλείο R840 κυμαίνονται από IT10- IT13. Συνολικά καθίσταται σαφές πως το εργαλείο R840 οδηγεί σε βελτίωση όλων των ποιοτικών χαρακτηριστικών, ενώ επιπρόσθετη βελτίωση παρατηρείται για μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής. Αναφορικά με τη μέση

κυκλικότητα η βελτίωση που παρατηρήθηκε είναι μικρή και οφείλεται στη συμμετρία των αποκλίσεων.



Σχήμα 5.29 Σύγκριση αποτελεσμάτων οπής σε χάλυβα για το εργαλείο καρβιδίου R840

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η μηχανουργική κατεργασία της διάτρησης λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα της κοπής. Η μελέτη αυτή βασίστηκε σε δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Το πρώτο μοντέλο αφορά την προσομοίωση της κατεργασίας μέσω μιας σειράς λοξών και ορθογωνικών κοπών και η επίλυσή του βασίστηκε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το δεύτερο μοντέλο αφορά τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων της κατεργασίας και την επίδρασή τους, τόσο στο εργαλείο όσο και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα βασικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν περιλαμβάνουν:

1. Την ανάπτυξη της εφαρμογής DIATRISIS η οποία περιλαμβάνει όλα τα στάδια προσομοίωσης της κατεργασίας της διάτρησης. Η εφαρμογή χρησιμοποιεί τον επιλύτη LS-DYNA για την επίλυση του μη-γραμμικού μοντέλου, ενώ αξιοποιεί πλήρως προχωρημένες δυνατότητες του σχεδιαστικού πακέτου Autodesk Inventor και της MATLAB για τις διάφορες λειτουργίες που εκτελούνται και οι οποίες είναι οι εξής:
 - Η αυτοματοποίηση της σχεδίασης κωνικών, υπερβολοειδών και ελλειψοειδών εργαλείων διάτρησης σε μια ενιαία πλατφόρμα προσομοίωσης. Το λογισμικό έχει επιπλέον την ικανότητα να μοντελοποιεί αυτόματα την οδηγική λωρίδα και το στέλεχος του εργαλείου διευκολύνοντας έτσι την περαιτέρω ανάλυσή τους με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα εργαλεία που σχεδιάστηκαν, βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πραγματικά όπως αυτά μετρήθηκαν στο στερεοσκόπιο. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στις αρχές τροχίσματος ενός πραγματικού εργαλείου και έτσι καθίσταται εύκολα επεκτάσιμος και για άλλες γεωμετρικές διατομές και κορυφές. Αντίθετα από τα πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά το παρελθόν για να περιγράψουν τη γεωμετρία των κόψεων, τα τρισδιάστατα μοντέλα των εργαλείων εμπεριέχουν όλη την απαιτούμενη πληροφορία.
 - Ο προεπεξεργαστής του προγράμματος DIATRISIS αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο περιλαμβάνει τη δημιουργία της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, τη συναρμολόγησή τους, την 2D και 3D διακριτοποίηση, την εισαγωγή των οριακών συνθηκών, τα διαφορετικά μοντέλα υλικών, τα δεδομένα επαφής, τις παραμέτρους προσομοίωσης και την εξαγωγή του τελικού αρχείου του επιλύτη. Ο χρόνος επίλυσης των στοιχειωδών μοντέλων κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες και είναι σημαντικά μικρότερος από το χρόνο επίλυσης μακροσκοπικών μοντέλων στα υπάρχοντα εμπορικά προγράμματα προσομοίωσης μηχανουργικών κατεργασιών για ίδιες συνθήκες κοπής. Το πλεονέκτημα αυτό έχει να κάνει με τη διαίρεση του μακροσκοπικού μοντέλου σε πολλά μικρότερα και ισοδύναμα, επιτρέποντας έτσι την παράλληλη επίλυσή τους αλλά και στην ελαχιστοποίηση της μεταβατικής περιοχής της κοπής. Επιπλέον η συγκεκριμένη προσέγγιση εστιάζει καθαρά στην περιοχή της κοπής, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ένα επίσης μεγάλο πλεονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας αποτελεί η γενικευμένη χρήση της, αφού οποιαδήποτε μηχανουργική κατεργασία κοπής μπορεί να προσεγγιστεί με μια σειρά προβλημάτων λοξής και ορθογωνικής κοπής.
 - Ο μεταεπεξεργαστής του προγράμματος DIATRISIS αναλαμβάνει τη λειτουργία του μετασχηματισμού των στοιχειωδών δυνάμεων κοπής σε δύναμη και ροπή διάτρησης. Επιπλέον, επωφελείται των δυνατοτήτων της προτεινόμενης προσέγγισης, υπολογίζοντας εκτός από τις συνολικές δυνάμεις και την κατανομή τους στις κόψεις του εργαλείου. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ σημαντικό για την ακριβή ανάλυση του εργαλείου αλλά και για τη σχεδίαση νέων.

- Η ακρίβεια των υπολογισμών του προγράμματος DIATRISIS επιβεβαιώθηκε πειραματικά μέσω 43 πειραμάτων. Έτσι παρέχεται πλέον η δυνατότητα εκτέλεσης σεναρίων προσομοίωσης αντικαθιστώντας έτσι τα αντίστοιχα κοστοβόρα εργαστηριακά πειράματα. Επιπλέον, μέσω της εκτέλεσης ικανού αριθμού πειραμάτων προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, ελαχιστοποιώντας έτσι το υπολογιστικό κόστος.
2. Το μοντέλο DYNADRILL που αναπτύχθηκε, ενσωματώθηκε στο εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης ANSYS. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για στατική και δυναμική ανάλυση εργαλείων διάτρησης και περιλαμβάνει τις εξής λειτουργίες:
- Την ανάπτυξη αλγορίθμου κατανομής των δυνάμεων κοπής στις παρειές των τρυπανιών. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του την καμπυλότητα των παρειών και την ιδιαίτερη ροή αποβλίπτου στην εγκάρσια κόψη. Επίσης αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αφού σε παλαιότερες έρευνες η κατανομή των δυνάμεων θεωρούνταν ομοιόμορφη. Ο αλγόριθμος ενσωματώθηκε στο εμπορικό λογισμικό αυτοματοποιώντας έτσι τη ολόκληρη τη διαδικασία, αφού δεν απαιτεί την εξαγωγή του πλέγματος, την επεξεργασία και την επανεισαγωγή των οριακών συνθηκών.
 - Την ανάπτυξη πρότυπης εργαστηριακής διάταξης μέτρησης των χαρακτηριστικών της κοπής. Η διάταξη κάνει χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψης φωτογραφιών. Σε αντίθεση με υπάρχουσες μεθόδους, η παρακολούθηση της κοπής σε πραγματικό χρόνο αυξάνει την ακρίβεια και παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο μέτρησης διαφόρων μεγεθών της κοπής. Επιπλέον, η μέτρηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίπτου αυξάνει την ακρίβεια υπολογισμού του μήκους της επαφής εργαλείου-αποβλίπτου, με επακόλουθη αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των τάσεων.
 - Την ανάλυση των τάσεων και των μετατοπίσεων του εργαλείου υπό στατικό ή δυναμικό φορτίο με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την κατανομή των τάσεων, τις μέγιστες τάσεις και τις μετατοπίσεις συναρτήσει του χρόνου. Στις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων παρατηρήθηκε αντίστοιχη φθορά του εργαλείου από ειδική εργαστηριακή συσκευή μέτρησης, επαληθεύοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επιπλέον το σύστημα έχει τη δυνατότητα να συνεργάζεται και με άλλα μοντέλα που λειτουργούν στη λογική υπολογισμού των στοιχειωδών δυνάμεων κοπής όπως το DRILL3D.
 - Την ανάπτυξη προγράμματος υπολογισμού των χαρακτηριστικών της οπής. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε προβλέπει χαρακτηριστικά της οπής όπως ομοαξονικότητα, κυλινδρικότητα, κυκλικότητα και ομοκεντρικότητα βάσει των αντίστοιχων προτύπων ISO. Σε αντίθεση με τα αναλυτικά μοντέλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων DYNADRILL κάνει χρήση των δυναμικών μετατοπίσεων για να κατασκευάσει την τρισδιάστατη οπή και εν συνεχεία να υπολογίσει τα χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, με βάση τους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών αυτών, εξάγεται η αντίστοιχη ποιότητα ανοχών της οπής. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν μέσω πειραμάτων με εργαλεία διαφορετικών διαμέτρων και για διάφορες συνθήκες κοπής.
 - Την ανάπτυξη πρωτοκόλλου τρισδιάστατων μετρήσεων οπών. Η διάταξη που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί δυναμόμετρο σε συνδυασμό με έναν τρισδιάστατο αισθητήρα επαφής για τη μέτρηση των οπών. Ένα πλεονέκτημα της διάταξης είναι ο υπολογισμός των αποκλίσεων από το θεωρητικό άξονα, αφού το τεμάχιο δε μετακινείται μετά την κατεργασία. Για τη λήψη μεγάλου όγκου δεδομένων αναπτύχθηκε πρόγραμμα για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και την καταγραφή των δεδομένων.

3. Οι παραπάνω λειτουργίες ενσωματώθηκαν σε ένα σύγχρονο και λειτουργικό γραφικό περιβάλλον διεπαφής για περαιτέρω διευκόλυνση και διάδοση του μοντέλου. Το περιβάλλον αυτό είναι πλήρως επεκτάσιμο ώστε να μπορέσει να ενσωματώσει τα αποτελέσματα των μελλοντικών κατευθύνσεων.

Μελλοντικές ερευνητικές προτάσεις - κατευθύνσεις:

- Αντίστοιχη μελέτη και πειραματική επιβεβαίωση της ροπής διάτρησης. Για την πρόταση αυτή απαιτείται ειδικό δυναμόμετρο τεσσάρων συνιστωσών με δυνατότητα μέτρησης ροπής.
- Μελέτη της μεταβατικής περιοχής της κοπής. Για την πρόταση αυτή απαιτείται επέκταση του μοντέλου DRILL3D ώστε να εξάγει το απαιτούμενο πάχος αποβλίπτου συναρτήσει του χρόνου κοπής.
- Μελέτη της έκκεντρης εισχώρησης του εργαλείου για περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου υπολογισμού των χαρακτηριστικών της οπής. Η πρόταση αυτή απαιτεί ειδικό επιταχυνσιόμετρο.
- Επέκταση της σχεδίασης και μελέτης κοπτικών με εργαλεία διάτρησης διαιρεμένης κορυφής και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της διατομής και της κορυφής τους.
- Επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας προσομοίωσης και σε άλλες κατεργασίες και δημιουργία μιας ενιαίας πλατφόρμας προσομοίωσης μηχανουργικών κατεργασιών και ειδικότερα κατεργασιών με αντίστοιχη κινηματική όπως το φραιζάρισμα και η τórνευση.
- Στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εν συνεχεία βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής με χρήση γενετικών αλγορίθμων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Galloway, D., 1957, "Some experiments on the influence of various factors on drill performance," *Trans. ASME*, 79, pp. 191-231.
- [2] Fujii, S., DeVries, M., and Wu, S.-M., 1970, "An Analysis of Drill Geometry for Optimum Drill Design by Computer. Part I—Drill Geometry Analysis," *Journal of Engineering for Industry*, 92, p. 647.
- [3] Fujii, S., DeVries, M., and Wu, S., 1970, "An Analysis of Drill Geometry for Optimum Drill Design by Computer. Part II—Computer-Aided Design," *Journal of Engineering for Industry*, 92, p. 657.
- [4] Fujii, S., DeVries, M., and Wu, S.-M., 1971, "Analysis of the Chisel Edge and the Effect of the d - Θ Relationship on Drill Point Geometry," *Engineering for Industry*, pp. 1093-1105.
- [5] Tsai, W., and Wu, S., 1979, "Computer analysis of drill point geometry," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 19(2), pp. 95-108.
- [6] Wu, S., and Tsai, W., 1979, "A Mathematical Model for Drill. Point Design and Grinding," *Journal of Engineering for Industry*, 101, p. 333.
- [7] Armarego, E., and Rotenberg, A., 1973, "An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method—I. basic analysis," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 13(3), pp. 155-164.
- [8] Armarego, E., and Rotenberg, A., 1973, "An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method—II. A criterion for selecting a solution," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 13(3), pp. 165-182.
- [9] Armarego, E., and Rotenberg, A., 1973, "An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method—III. Drill point grinder design features," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 13(4), pp. 233-241.
- [10] Armarego, E., 1994, "Some fundamental and practical aspects of twist drills and drilling," *Journal of materials processing technology*, 44(3), pp. 189-198.
- [11] Armarego, E., Wright, J., and Lorenz, G., 1980, "An analytical study of three point grinding methods for general purpose twist drills," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 29(1), pp. 5-10.
- [12] Armarego, E., Smith, A., and Gong, Z., 1990, "Four plane facet point drills—basic design and cutting model predictions," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 39(1), pp. 41-45.
- [13] Fugelso, M., 1990, "Conical flank twist drill points," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 30(2), pp. 291-295.
- [14] Fugelso, M., 2001, "A standard conical point drill grinding machine," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(6), pp. 915-922.
- [15] Vangsness, J., Fugelso, M., and Lindeke, R., 1995, "Closed form solution of kinematic equations for the mechanism of a twist drill grinding machine," *Mechanism and machine theory*, 30(2), pp. 193-199.
- [16] Hsieh, J.-F., 2005, "Mathematical model for helical drill point," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(7), pp. 967-977.
- [17] Hsieh, J.-F., and Lin, P. D., 2002, "Mathematical model of multiflute drill point," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(10), pp. 1181-1193.
- [18] Hsieh, J.-F., and Lin, P. D., 2003, "Production of multifluted drills on six-axis CNC tool-grinding machine," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(11), pp. 1117-1127.
- [19] Hsieh, J.-F., and Lin, P. D., 2005, "Drill point geometry of multi-flute drills," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5-6), pp. 466-476.
- [20] Li, B., Hu, Y., and Wang, H., 2007, "Analysis and simulation for a parallel drill point grinder," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(9-10), pp. 915-925.

-
- [21] Wang, J., and Zhang, Q., 2008, "A study of high-performance plane rake faced twist drills.: Part I: Geometrical analysis and experimental investigation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11), pp. 1276-1285.
- [22] Wang, J., and Zhang, Q., 2008, "A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part II: predictive force models," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11), pp. 1286-1295.
- [23] Thornley, R., El Wahab, A., and Maiden, J., 1987, "Some aspects of twist drill design," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 27(3), pp. 383-397.
- [24] Xiong, L., Fang, N., and Shi, H., 2009, "A new methodology for designing a curve-edged twist drill with an arbitrarily given distribution of the cutting angles along the tool cutting edge," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7), pp. 667-677.
- [25] Audy, J., 2008, "Optimization of Drill Point Geometries Through Computer Assisted Modeling and Experimental Thrust, Torque and Power in Drilling," *Manufacturing Engineering*, 2, pp. 8-11.
- [26] Audy, J., 2008, "Geometrical Analysis of General Purpose Twist and Deep Hole Jobber Drill Designs." *Manufacturing Engineering*, 2, pp. 9-12.
- [27] Audy, J., 2008, "A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling," *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1), pp. 130-138.
- [28] Watson, A., 1985, "Geometry of drill elements," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 25(3), pp. 209-227.
- [29] Chyan, H.-C., and Ehmann, K. F., 1997, "Design and Analysis of Helical Drill Points," *Transactions-North American Manufacturing Research Institution of SME*, pp. 135-140.
- [30] Chyan, H., and Ehmann, K., 1998, "Development of curved helical micro-drill point technology for micro-hole drilling," *Mechatronics*, 8(4), pp. 337-358.
- [31] Kang, S., Lin, C., and Ehmann, K., 1993, "Comparative analysis of planar and helical micro-drill points," *Trans NAMRI/SME*, 21, pp. 189-196.
- [32] Lin, C., Kang, S., and Ehmann, K., 1992, "Planar micro-drill point design and grinding methods," *Transactions of*.
- [33] Salama, A., and Elsayw, A., 1996, "The dynamic geometry of a twist drill point," *Journal of materials processing technology*, 56(1), pp. 45-53.
- [34] Williams, R., 1968, "Dynamic geometry of a twist drill," *International Journal of production Research*, 7(4), pp. 253-267.
- [35] Zhang, W., and Xiong, D., 2010, "A practical method to determine rake angles of twist drill by measuring the cutting edge," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(8), pp. 747-751.
- [36] Kang, D., and Armarego, E., 2003, "Computer-Aided Geometrical Analysis of the Fluting Operation for Twist Drill Design and Production. I. Forward Analysis and Generated Flute Profile," *Machining science and technology*, 7(2), pp. 221-248.
- [37] Kang, D., and Armarego, E., 2003, "Computer-Aided Geometrical Analysis of the Fluting Operation for Twist Drill Design and Production. II. Backward Analysis, Wheel Profile, and Simulation Studies," *Machining science and technology*, 7(2), pp. 249-266.
- [38] Billau, D., and McGoldrick, P., 1979, "An analysis of the geometry of the periphery of the flank face of twist drills ground with cylindrical and conical forms," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 19(2), pp. 69-86.
- [39] Abele, E., and Fujara, M., 2010, "Simulation-based twist drill design and geometry optimization," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59(1), pp. 145-150.
- [40] Spur, G., and Masuha, J., 1981, "Drilling with twist drills of different cross section profiles," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 30(1), pp. 31-35.
- [41] Vijayaraghavan, A., 2006, "Automated Drill Design Software," *Berkeley University of California*.

- [42] Sambhav, K., Dhande, S., and Tandon, P., 2010, "CAD based mechanistic modeling of forces for generic drill point geometry," *Computer Aided Design & Applications*, 7(6), pp. 809-819.
- [43] Gardner, J. D., Vijayaraghavan, A., and Dornfeld, D. A., 2005, "Comparative Study of Finite Element Simulation Software."
- [44] Gardner, J. D., and Dornfeld, D., 2006, "Finite element modeling of drilling using DEFORM."
- [45] Selvam, S., and Sujatha, C., 1995, "Twist drill deformation and optimum drill geometry," *Computers & structures*, 57(5), pp. 903-914.
- [46] Hinds, B., and Treanor, G., 2000, "Analysis of stresses in micro-drills using the finite element method," *International journal of machine tools and manufacture*, 40(10), pp. 1443-1456.
- [47] Zhang, Z., and Babitsky, V., 2011, "Finite element modeling of a micro-drill and experiments on high speed ultrasonically assisted micro-drilling," *Journal of Sound and Vibration*, 330(10), pp. 2124-2137.
- [48] Chen, W.-C., 1997, "Applying the finite element method to drill design based on drill deformations," *Finite elements in analysis and design*, 26(1), pp. 57-81.
- [49] Chen, W.-C., Fuh, K.-H., Wu, C.-F., and Chang, B.-R., 1996, "Design optimization of a split-point drill by force analysis," *Journal of materials processing technology*, 58(2), pp. 314-322.
- [50] Gong, Y., Ehmann, K. F., and Lin, C., 2003, "Analysis of dynamic characteristics of micro-drills," *Journal of materials processing technology*, 141(1), pp. 16-28.
- [51] Denkena, B., Deichmueller, M., Kroeger, M., Panning, L., Carstensen, C., and Kilian, S., "Modeling and simulation of the process machine interaction during tool grinding processes," *Proc. Proceedings of the 10th CIRP international workshop on modelling of machining operations*, pp. 27-28.28.
- [52] Ostasevicius, V., Ubartas, M., Gaidys, R., Jurenas, V., Samper, S., and Dauksevicius, R., 2012, "Numerical–experimental identification of the most effective dynamic operation mode of a vibration drilling tool for improved cutting performance," *Journal of Sound and Vibration*.
- [53] Paszenda, Z., and Basiaga, M., 2009, "FEM analysis of drills used in bone surgery," *Archives of Materials Science and Engineering*, 36(2), pp. 103-109.
- [54] Miao, C., Qin, F., Sthur, G., Chou, K., and Thompson, R., 2009, "Integrated Design and Analysis of Diamond-coated Drills," *Computer-Aided Design & Applications*, 6(2).
- [55] Li, R., and Shih, A. J., 2007, "Tool temperature in titanium drilling," *Ann Arbor*, 1001, pp. 48109-42125.
- [56] Li, R., and Shih, A. J., 2007, "Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12), pp. 2005-2017.
- [57] Wern, H., 1995, "Finite-element solutions for mechanical drilling methods: a new integral formalism," *Journal of computational and applied mathematics*, 63(1), pp. 365-372.
- [58] Guu, Y., Deng, C., Hou, M. T.-K., Hsu, C.-H., and Tseng, K.-S., 2012, "Optimization of Machining Parameters for Stress Concentration in Microdrilling of Titanium Alloy," *Materials and Manufacturing Processes*, 27(2), pp. 207-213.
- [59] Sicot, O., Gong, X., Cherouat, A., and Lu, J., 2003, "Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method," *Journal of composite materials*, 37(9), pp. 831-844.
- [60] Sicot, O., Gong, X., Cherouat, A., and Lu, J., 2004, "Influence of experimental parameters on determination of residual stress using the incremental hole-drilling method," *Composites science and technology*, 64(2), pp. 171-180.
- [61] Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P., Franke, V., Leitz, L., and Min, S., 2009, "Burrs—analysis, control and removal," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), pp. 519-542.

- [62] Guo, Y., and Dornfeld, D., 1998, "Integration of CAD of drill with FEA of drilling burr formation," *Transactions of NAMRI/SME*, XXVI, pp. 201-206.
- [63] Guo, Y., and Dornfeld, D., 2000, "Finite element modeling of burr formation process in drilling 304 stainless steel," *Journal of manufacturing science and engineering*, 122(4), pp. 612-619.
- [64] Guo, Y., and Dornfeld, D., 1998, "Finite element analysis of drilling burr minimization with a backup material," *Transactions of NAMRI/SME*, 26, pp. 207-212.
- [65] Min, S., Dornfeld, D. A., Kim, J., and Shyu, B., 2001, "Finite element modeling of burr formation in metal cutting."
- [66] Min, S., Kim, J., and Dornfeld, D. A., 2002, "Thrust force analysis of drilling burr formation using finite element method," *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*, Springer, pp. 169-173.
- [67] Choi, J., Min, S., and Dornfeld, D. A., 2004, "Finite element modeling of burr formation in drilling of a multi-layered material."
- [68] Avila, M. C., Gardner, J. D., Reich-Weiser, C., Vijayaraghavan, A., and Dornfeld, D., 2006, "Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing."
- [69] Zitoune, R., and Collombet, F., 2007, "Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), pp. 858-866.
- [70] Yunming, Z., Guicheng, W., and Lei, W., "Simulation and Analysis of Exit Burr Formation in Drilling," *Proc. Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, 2010 International Conference on, IEEE, pp. 369-373.
- [71] Saunders, L., 2003, "A finite element model of exit burrs for drilling of metals," *Finite elements in analysis and design*, 40(2), pp. 139-158.
- [72] Strenkowski, J., Hsieh, C., and Shih, A., 2004, "An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12), pp. 1413-1421.
- [73] Li, R., and Shih, A. J., 2007, "Finite element modeling of high-throughput drilling of Ti-6Al-4V," *Transactions of NAMRI/SME*, 35, pp. 73-80.
- [74] Han, R. D., and Wu, J., 2010, "Finite Element Simulation of Drilling Based on Third Wave Systems AdvantEdge," *Key Engineering Materials*, 431, pp. 229-232.
- [75] Li, X., and Liang, Y., "Finite element simulation and experiment study of high manganese steel drilling," *Proc. Computer Modeling and Simulation*, 2010. ICCMS'10. Second International Conference on, IEEE, pp. 54-58.
- [76] Abouridouane, M., Klocke, F., Lung, D., and Adams, O., 2012, "A new 3D multiphase FE model for micro cutting ferritic-pearlitic carbon steels," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*.
- [77] Chakladar, N. D., Pal, S. K., and Mandal, P., 2012, "Drilling of woven glass fiber-reinforced plastic—an experimental and finite element study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1-4), pp. 267-278.
- [78] Isbilir, O., and Ghassemieh, E., 2011, "Finite Element Analysis of Drilling of Titanium Alloy," *Procedia Engineering*, 10, pp. 1877-1882.
- [79] Marusich, T., Usui, S., Ma, J., and Stephenson, D., 2005, "Finite Element Modelling of Drilling Processes and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, pp. 421-431.
- [80] Bil, H., Kılıç, S., and Tekkaya, A. E., 2004, "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), pp. 933-944.
- [81] Davim, J. P., Maranhao, C., Jackson, M., Cabral, G., and Gracio, J., 2008, "FEM analysis in high speed machining of aluminium alloy (Al7075-0) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K10) cutting tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11-12), pp. 1093-1100.

- [82] Raczy, A., Altenhof, W., and Alpas, A., "An Eulerian Finite Element Model of the Metal Cutting Process," Proc. Proceedings of the 8th International LS-DYNA Users Conference.-2005.-C, pp. 11-26.
- [83] Arrazola, P., Llanos, I., Villar, J., Ugarte, D., and Marya, S., 2007, "3D finite element modelling of chip formation process," Proc. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations.
- [84] Filice, L., Micari, F., Rizzuti, S., and Umbrello, D., 2007, "Dependance of machining simulation effectiveness on material and friction modelling. that's why industrial application of machining simulation is still so far," Proc. Proceedings of the 10th CIRP international workshop on modelling of machining operations, Calabria, pp. 27-28.
- [85] Marusich, T. D., 2001, "Effects of friction and cutting speed on cutting force," Proc. IMECE (ASME), Nov. 11-16, New York.
- [86] Guo, J., and Ming, L., 2010, "Explicit Finite Element Simulation of Oblique Cutting Process," Key Engineering Materials 431 - 432, pp. 297-300.
- [87] Villumsen, M. F., and Fauerholdt, T. G., 2008, "Prediction of Cutting Forces in Metal Cutting, Using the Finite Element Method, a Lagrangian Approach."
- [88] Wu, J., and Han, R. D., 2009, "A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model," Journal of Manufacturing Processes, 11(1), pp. 19-30.
- [89] Kalidas, S., Kapoor, S. G., and DeVor, R. E., 2002, "Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 1: A thermal model of workpiece temperatures," Journal of manufacturing science and engineering, 124(2), pp. 258-266.
- [90] Kalidas, S., Kapoor, S. G., and DeVor, R. E., 2002, "Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 2: Thermo-elastic effects on hole quality," Journal of manufacturing science and engineering, 124(2), pp. 267-274.
- [91] Bagci, E., and Ozcelik, B., 2006, "Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28(7), pp. 680-687.
- [92] Ozcelik, B., and Bagci, E., 2006, "Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach," Materials & design, 27(10), pp. 920-927.
- [93] Miller, S. F., RUI, L., Wang, H., and Shih, A. J., 2006, "Experimental and numerical analysis of the friction drilling process," Journal of manufacturing science and engineering, 128(3), pp. 802-810.
- [94] Miller, S., and Shih, A., 2007, "Thermo-Mechanical Finite Element Modeling of the Friction Drilling Process," Manufacturing Science and Engineering, 129, pp. 531-538.
- [95] Krasauskas, P., 2011, "Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process," MECHANIKA, 17(6), pp. 681-686.
- [96] Antoniadis, A., Vidakis, N., and Bilalis, N., 2002, "Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, Part 2: The effect of cutting parameters on the level of tool stresses: A quantitative parametric analysis," Journal of manufacturing science and engineering, 124(4), pp. 792-798.
- [97] Αντωνιάδης Α., 1989, "Προσδιορισμός κρουστικών καταπονήσεων των εργαλείων στο φραιζάρισμα κυλίσεως οδοντώσεων και προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής κατά την αποφλοίωση στην αυτή κατεργασία μορφοποιήσεως οδοντώσεων,"
- [98] Kyratsis, P., Tapoglou, N., Bilalis, N., and Antoniadis, A., 2011, "Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface," International Journal of Machining and Machinability of Materials, 10(1), pp. 18-33.
- [99] Fluhner, J., 2004, "DEFORM-3D Version 5.0 user's manual," Scientific Forming Technologies Corporation.
- [100] Altintas, Y., 2012, Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, Cambridge university press.
- [101] Smith, G. T., 2008, "Drilling and Associated Technologies," Cutting Tool Technology: Industrial Handbook, pp. 87-147.

- [102] Hallquist, J. O., 2006, "LS-DYNA theory manual," Livermore Software Technology Corporation, 3.
- [103] Belytschko, T., and Bindeman, L. P., 1993, "Assumed strain stabilization of the eight node hexahedral element," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 105(2), pp. 225-260.
- [104] Johnson, G. R., and Cook, W. H., 1983, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," *Proc. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, pp. 541-547.
- [105] Marquardt, D. W., 1963, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 11(2), pp. 431-441.
- [106] Grüneisen, E., 1912, "Theorie des festen Zustandes einatomiger Elemente," *Annalen der Physik*, 344(12), pp. 257-306.
- [107] Cepeda-Jiménez, C., García-Infanta, J., Ruano, O. A., and Carreño, F., 2011, "High strain rate superplasticity at intermediate temperatures of the Al 7075 alloy severely processed by equal channel angular pressing," *Journal of Alloys and Compounds*, 509(40), pp. 9589-9597.
- [108] Chen, W., and Song, B., 2011, *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*, Springer.
- [109] Abotula, S., and Chalivendra, V., 2010, "An experimental and numerical investigation of the static and dynamic constitutive behaviour of aluminium alloys," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 45(8), pp. 555-565.
- [110] Lang, L., Du, P., Liu, B., Cai, G., and Liu, K., 2013, "Pressure rate controlled unified constitutive equations based on microstructure evolution for warm hydroforming," *Journal of Alloys and Compounds*.
- [111] Lee, W.-S., Sue, W.-C., Lin, C.-F., and Wu, C.-J., 2000, "The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1), pp. 116-122.
- [112] Ng, C. K., 2005, "Experimental study of micro-/nano-scale cutting of aluminum 7075 and P20 mold steel."
- [113] Spradlin, T. J., 2011, "Process Sequencing for Fatigue Life Extension of Large Scale Laser Peened Components," Wright State University.
- [114] Yang, Y., Li, D., Zheng, H., Li, X., and Jiang, F., 2009, "Self-organization behaviors of shear bands in 7075 T73 and annealed aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, 527(1), pp. 344-354.
- [115] Pfeifer, C. T., 2008, "Investigation of Finite Element Method Software to Predict Forces and Residual Stresses in Machine Cutting," Rensselaer Polytechnic Institute.
- [116] Standard, I., 1985, "ISO4291: Methods for the assessment of departure from roundness- Measurement of variations in radius," International Organization for Standardization.
- [117] Astakhov, V. P., 2006, *Tribology of metal cutting*, Access Online via Elsevier.
- [118] Astakhov, V. P., and Outeiro, J. C., 2008, "Metal cutting mechanics, finite element modelling," *Machining*, Springer, pp. 1-27.
- [119] Degner, W., Lutze, H., and Smejkal, E., 2009, *Spanende formung: theorie, berechnung, richtwerte*, Hanser Verlag.
- [120] Astakhov, V. P., and Shvets, S., 2004, "The assessment of plastic deformation in metal cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2), pp. 193-202.
- [121] Cotterell, M., and Byrne, G., 2008, "Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57(1), pp. 93-96.
- [122] Cotterell, M., and Byrne, G., 2008, "Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(2), pp. 81-85.

-
- [123] Ivester, R., Whitenton, E., Heigel, J., Marusich, T., and Arthur, C., 2007, "Measuring chip segmentation by high-speed microvideography and comparison to finite-element modeling simulations," Proc. proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, pp. 37-44.
- [124] Jaspers, S., and Dautzenberg, J., 2002, "Material behaviour in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation," Journal of materials processing technology, 121(1), pp. 123-135.
- [125] Pujana, J., Arrazola, P., and Villar, J., 2008, "In-process high-speed photography applied to orthogonal turning," Journal of materials processing technology, 202(1), pp. 475-485.
- [126] Kienzle, O., 1952, "Prediction of forces and power in machine tools for metal-cutting," VDI-Z, 94, pp. 299-305.
- [127] König, W., and Bouzakis, K., 1977, "Chip formation in gear shaping," Annals of the CIRP, 25(1), pp. 17-20.
- [128] Preger, K. T., 1965, Zerspantechnik, F. Vieweg.
- [129] Arvajah, T., and Ismail, F., 2006, "Machining stability in high speed drilling—Part 2: time domain simulation of a bending–torsional model and experimental validations," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12), pp. 1573-1581.
- [130] Arvajah, T., and Ismail, F., 2006, "Machining stability in high-speed drilling—Part 1: modeling vibration stability in bending," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12), pp. 1563-1572.
- [131] Pirtini, M., and Lazoglu, I., 2005, "Forces and hole quality in drilling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(11), pp. 1271-1281.
- [132] Roukema, J. C., and Altintas, Y., 2006, "Time domain simulation of torsional–axial vibrations in drilling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(15), pp. 2073-2085.
- [133] Roukema, J. C., and Altintas, Y., 2007, "Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(9), pp. 1455-1473.
- [134] Roukema, J. C., and Altintas, Y., 2007, "Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Chatter stability in frequency domain," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(9), pp. 1474-1485.
- [135] Bayly, P. V., Metzler, S. A., Schaut, A. J., and Young, K. A., 2001, "Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test," Journal of manufacturing science and engineering, 123(4), pp. 552-561.
- [136] ANSYS, 2011, "ANSYS Mechanical Linear and Nonlinear Dynamics," ANSYS Lectures.
- [137] Standard, I., 2006, "ISO-1101: Geometrical Product Specifications (GPS)- Geometrical tolerancing-Tolerances of form, orientation, location and run-out," International Organization for Standardization.
- [138] Cioboata, D., Palade, D., Abalaru, A., Stanciu, D., Savu, L., Logofatu, C., and Traistaru, F., "Considerations regarding evaluation of the accuracy assessment of the roundness."
- [139] Standard, I., 2003, "ISO12180-1: Geometrical product specifications (GPS) — Cylindricity Part 1: Terms, definitions and parameters of cylindrical form," International Organization for Standardization.
- [140] Standard, I., 2010, "ISO 286-2:2010 Geometrical product specifications (GPS) -- ISO code system for tolerances on linear sizes -- Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts," international Organization for Standardization.
- [141] Standard, I., 2003, "ISO12180-2 Geometrical Product Specifications (GPS)- Cylindricity - Part 2: Specification operators," International Organization for Standardization.
- [142] Hamade, R., and Ismail, F., 2005, "A case for aggressive drilling of aluminum," Journal of materials processing technology, 166(1), pp. 86-97.

- [143] Gong, Y., Lin, C., and Ehmann, K. F., 2005, "Dynamics of initial penetration in drilling: part 2-motion models for drill skidding and wandering with experimental verification," *Journal of manufacturing science and engineering*, 127(2), pp. 289-297.
- [144] Katz, Z., and Poustie, A., 2001, "On the hole quality and drill wandering relationship," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(4), pp. 233-237.