ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ CAD/CAM

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων απόκτησης διδακτορικού διπλώματος
υπό τον

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΒΑΣ. ΚΥΡΑΤΣΗ

ΧΑΝΙΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

© Copyright υπό Παναγιώτη Βασ. Κυράτση
Χανιά 2011

Η διατριβή του κ. Παναγιώτη Κυράτση εγκρίνεται:

Όνομα	**Υπογραφή**
Νικόλαος Μπιλάλης	
Νικόλαος Σαπίδης	
Αριστομένης Αντωνιάδης	
Γεώργιος Σταυρουλάκης	
Βασίλειος Μουστάκης	
Σεβαστή Μήτση	
Γεώργιος Βοσνιάκος	

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ 3

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 5

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ 6

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 7

ABSTRACT 7

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 8
1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 8
1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 9

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ 12

2.1. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ 12
2.2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ 16
2.2.1. Μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας του εργαλείου και της διάτρησης 17
2.2.2. Εμπειρικός τρόπος μελέτης της διάτρησης 23
2.2.3. Αναλυτικός τρόπος μελέτης της διάτρησης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) 30
2.2.4. Χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για τη μελέτη της διάτρησης 38
2.3. ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 43

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 46

3.1. ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CAD/CAM ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 46
3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ 47
3.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ 3D ΣΤΕΡΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ 48
3.3.1. Στρατηγική μοντελοποίησης του εργαλείου 48
3.3.2. Δημιουργία στερεού μοντέλου του εργαλείου 49
3.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ 3D ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ 54
3.5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΤΕΜΑΧΙΑ 55
3.6. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ 64
3.7. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ DRILL3D 69

4. ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 73

4.1. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ 73
4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 74
4.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 75

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 80

5.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 80
5.1.1. Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Πειραμάτων 80
5.1.2. Παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων 82
5.1.3 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων 83
5.1.4. Σχεδιασμός πειραμάτων Taguchi 83
5.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RSM (RESPONSE SURFACE METHODOLOGY) 85
5.2.1. Ανάλυση παλινδρόμησης 85

5.2.2. Ανάλυση διασποράς ... 86
5.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RSM ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ 16 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ... 87
5.3.1. Υπολογισμός μαθηματικών μοντέλων ... 87
5.3.2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων και επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων. 89
5.3.3. Χρήση των μαθηματικών μοντέλων στο πλήρες παραγοντικό πείραμα ... 90
5.4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RSM ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ 128 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ... 95
5.4.1. Δημιουργία μαθηματικών μοντέλων από το πλήρες παραγοντικό πείραμα ... 95
5.4.2. Δημιουργία μαθηματικών μοντέλων από το πλήρες παραγοντικό πείραμα μόνο με τους σημαντικότερους στατιστικά παράγοντες ... 99
5.5. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ... 103

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ... 106

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 109

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την προσπάθεια για την εκπόνηση της διδακτορικής αυτής διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Μπιλάλη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ανάθεσή της και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συμπαράσταση και την καθοδήγησή του καθ' όλο το διάστημα της εκπόνησης της διατριβής. Αναμφισβήτητα η βοήθειά του ήταν πολύ σημαντική σε όλο αυτό το διάστημα, ενώ πάντα ανέβαζε τον πήχη, αποδεικνύοντας μου ότι το καλύτερο μας ικανοποιεί και περισσότερο.

Για τα πρώτα μου βήματα στον προγραμματισμό CAD/CAM συστημάτων θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Δημητρίου, Καθηγητή Εφαρμογών του ΤΕΙ Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθειά του, ενώ για την βοήθεια κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ευχαριστώ τον Νικόλαο Ταπόγλου, Διπλ. Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με ενέπνευσαν και μου συμπαραστάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής, τη σύζυγο μου Σταματία, τα παιδιά μου Βασίλη και Ελένη, την αδελφή μου Θεοδώρα και τους γονείς μου Βασίλη και Αρετή.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Παναγιώτης Κυράτσης του Βασιλείου γεννήθηκε στα Ιωάννινα το 1968. Ολοκλήρωσε τις βασικές σπουδές του ως Μηχανολόγος Μηχανικός του ΑΠΘ (1992) και Μηχανικός Οχημάτων ΤΕ του ΤΕΙ Θεσσαλονίκης (1995). Στη συνέχεια ολοκλήρωσε με επιτυχία τρία μεταπτυχιακά διπλώματα ειδίκευσης (M.Sc. in Automotive Product Engineering - Cranfield University – UK - 1997, M.Sc. in CAD/CAM - Cranfield University – UK -1999 και Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης στη Διασφάλιση Ποιότητας – Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο - 2007).

Εργάστηκε για σειρά ετών στη βιομηχανία: στην εταιρία Tickford Engineering ως CAE Engineer στο σχεδιασμό αυτοκινήτων και τα Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. ως Μηχανικός Συντήρησης Διυλιστηρίου στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της Θεσσαλονίκης. Επίσης εργάστηκε στη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Θεσπρωτίας ως Μηχανολόγος Μηχανικός των Τεχνικών Υπηρεσιών, ενώ από το 2004 μέχρι σήμερα είναι Καθηγητής Εφαρμογών στο Τμήμα Βιομηχανικού Σχεδιασμού του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, εκλεγμένος με ειδίκευση στα ‘Συστήματα CAD/CAM’.

Έχει σειρά δημοσιεύσεων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές (6), διεθνή και εθνικά συνέδρια (16 και 10 αντίστοιχα), ενώ συμμετέχει ως δημιουργός στην καταχώρηση οκτώ (8) βιομηχανικών σχεδίων στον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας. Συνεργάζεται με κλαδικά περιοδικά της βιομηχανίας για την συγγραφή άρθρων και έχει συμμετοχή σε τρία προγράμματα του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Από τα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής δημοσιεύτηκαν δύο άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές [1, 2], ενώ έχει γίνει αποδεκτό για δημοσίευση άλλο ένα [3]. Επιπλέον, έχουν γίνει τρεις παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια [1, 2, 4].

Περίληψη Διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μοντέλων που προσομοιώνουν με ακρίβεια την κατεργασία της διάτρησης με τη βοήθεια συστήματος CAD/CAM. Τα τεχνολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας μελετήθηκαν με τη δημιουργία ενός κινηματικού μοντέλου προσομοίωσης, που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό και το οποίο βασίστηκε στον προγραμματισμό ενός γενικής χρήσης συστήματος CAD/CAM.

Οι τέσσερις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν μέχρι τώρα από τους ερευνητές, για την μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης (μαθηματική, εμπειρική, αναλυτική και χρήση στατιστικών εργαλείων ή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης), συνδυάζονται όλες μαζί στην παρούσα διατριβή, ώστε να αξιοποιηθούν τα δυνατά στοιχεία της κάθε μίας. Οι γεωμετρικές περιγραφές τόσο του εργαλείου και των κατεργαζόμενων τεμαχίων, όσο και του απαραμόρφωτου αποβλίττου που προκύπτει, αναλαμβάνονται πλήρως να εκτελεστούν από το σύστημα CAD/CAM, με αποτέλεσμα την αυξημένη ακρίβεια στις διαστάσεις τους. Επιπλέον, δεν απαιτείται η άμεση εμπλοκή του χρήστη στην επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων στις τρεις διαστάσεις (3D), μιας και η επίλυση γίνεται αυτόματα από το ίδιο το σύστημα CAD/CAM που χρησιμοποιείται. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της κατεργασίας με την προτεινόμενη μεθοδολογία, επιβεβαιώθηκαν με ικανό αριθμό πειραμάτων. Τέλος, έγινε χρήση της τεχνικής του σχεδιασμού πειραμάτων σε συνδυασμό με την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Abstract

Twist drills are geometrical complex tools and thus various researchers have adopted different approaches for their simulation. The present thesis acknowledges the increasing use of modern CAD systems and subsequently using the API (Application Programming Interface) of a typical CAD system, drilling simulations are carried out. The developed DRILL3D software routine, creates, via specifying parameters, tool geometries, so that using different cutting conditions, realistic solid models are produced incorporating all the relevant data involved. The 3D solid models of the undeformed chips coming from both cutting areas are segmented into smaller pieces, in order to calculate every primitive thrust force component involved with high accuracy. The resultant thrust force produced, is verified by adequate amount of experiments using a number of different tools, speeds and feed rates. The final data derived, consist of a platform for further direct simulations regarding the determination of tool wear, drilling optimizations etc.

DRILL3D calculates the thrust force of both the cutting areas of the tool (main edges and chisel edge) simultaneously, which means that every simulation can substitute two separate lab experiments. Nevertheless, as the number of parameters involved is increasing, the amount of the necessary simulations becomes substantial. This is the reason that led to the combined use of the DRILL3D and the design of experiments methodology, which reduces to an impressive degree, the amount of the necessary digital experiments.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μοντέλων που προσομοιώνουν με ακρίβεια την κατεργασία της διάτρησης με τη βοήθεια συστήματος CAD/CAM. Τα τεχνολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας μελετήθηκαν με τη δημιουργία ενός κινηματικού μοντέλου προσομοίωσης, που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό και το οποίο βασίστηκε στον προγραμματισμό ενός γενικής χρήσης συστήματος CAD/CAM.

Οι τέσσερις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν μέχρι τώρα από τους ερευνητές, για την μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης (μαθηματική, εμπειρική, αναλυτική και χρήση στατιστικών εργαλείων ή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης), συνδυάζονται όλες μαζί στην παρούσα διατριβή, ώστε να αξιοποιηθούν τα δυνατά στοιχεία της κάθε μίας. Οι γεωμετρικές περιγραφές τόσο του εργαλείου και των κατεργαζόμενων τεμαχίων όσο και του απαραμόρφωτου αποβλίττου που προκύπτει, αναλαμβάνονται πλήρως να εκτελεστούν από το σύστημα CAD/CAM, με αποτέλεσμα την αυξημένη ακρίβεια στις διαστάσεις τους. Επιπλέον, δεν απαιτείται η άμεση εμπλοκή του χρήστη στην επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων στις τρεις διαστάσεις (3D), μιας και η επίλυση γίνεται αυτόματα από το ίδιο το σύστημα CAD/CAM που χρησιμοποιείται.

Αναλυτικά, με τη βοήθεια του μοντέλου προσομοίωσης, προσδιορίστηκε για διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μια σειρά εργαλείων διάτρησης με κωνική κορυφή, ενώ για κάθε εργαλείο και για διαφορετικές παραμέτρους κοπής, υπολογίστηκε η γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Στη συνέχεια αξιοποιώντας το μέγεθος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, με την βοήθεια της εξίσωσης των Kienzle-Victor, έγινε δυνατός ο υπολογισμός της δύναμης της κοπής κατά τη διάτρηση, ξεχωριστά για κάθε κοπτική ακμή που συμμετέχει (κύριες κόψεις και εγκάρσια κόψη). Ο ακριβής υπολογισμός της δύναμης της κοπής είναι πολύ σημαντικός, αφού από το μέγεθος των αναπτυσσόμενων δυνάμεων εξαρτώνται μια σειρά από παράγοντες, όπως η διάρκεια ζωής των εργαλείων, η απαιτούμενη ισχύς κ.λπ.. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της κατεργασίας με την προτεινόμενη μεθοδολογία, επιβεβαιώθηκαν με ικανό αριθμό πειραμάτων.

Επιπλέον, σε συνδυασμό με τη μεθοδολογία αυτή, έγινε χρήση της τεχνικής του σχεδιασμού πειραμάτων. Έτσι το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής για συγκεκριμένο αριθμό, κατάλληλα επιλεγμένων πειραμάτων, ώστε να καταστεί δυνατός ο καθορισμός των αντίστοιχων εμπειρικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν το μέγεθος των συνιστωσών της δύναμης κοπής της διάτρησης, μέσα στο εύρος τιμών των παραμέτρων κοπής που χρησιμοποιήθηκαν.

1.2. Στόχοι της διατριβής

Συνοπτικά, εκτός της βιβλιογραφικής επισκόπησης της μοντελοποίησης της διάτρησης, οι πρωτότυπες ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύχθηκαν και ξεπερνούν την παραδοσιακή χρήση των συστημάτων CAD/CAM, είχαν τους παρακάτω στόχους:

- Τη δημιουργία 3D στερεών μοντέλων προσομοίωσης: α) διαφόρων κοπτικών εργαλείων διάτρησης, β) των χρησιμοποιούμενων τεμαχίων σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, και γ) των απαραμόρφωτων αποβλίττων για διαφορετικές συνθήκες κοπής. Το λογισμικό DRILL3D που δημιουργήθηκε και που αποτελεί την ολοκληρωμένη πλατφόρμα γι' αυτούς τους υπολογισμούς, δέχεται μια σειρά από

δεδομένα όπως είναι: οι σχεδιαστικές και οι κατασκευαστικές παράμετροι του εργαλείου, οι συνθήκες κοπής (πρόωση, ταχύτητα κοπής), τα υλικά του εργαλείου και του χρησιμοποιούμενου τεμαχίου, οι αρχικές συνθήκες συναρμολόγησης και ο καθορισμός του βήματος της προσομοίωσης (βήματα 1-3° μπορούν να καλύψουν με ακρίβεια τους υπολογισμούς για όλες τις κοπτικές ακμές). Αποτέλεσμα της χρήσης του DRILL3D είναι, ο ακριβής υπολογισμός της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλίττου και στη συνέχεια μέσω της εξίσωσης των Kienzle-Victor, ο ακριβής υπολογισμός της δύναμης της κοπής κατά την κατεργασία της διάτρησης, ξεχωριστά για κάθε κοπτική ακμή που συμμετέχει.

- Την επιβεβαίωση με ικανό αριθμό πειραμάτων του μοντέλου προσομοίωσης DRILL3D, που αναπτύχθηκε.
- Την διερεύνηση του τρόπου που επηρεάζουν τις διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίττων, οι αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων του εργαλείου. Αυτές οι τιμές αποτελούν το βασικό στοιχείο για τον υπολογισμών των δυνάμεων κοπής.
- Τη χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε συνδυασμό με την τεχνική του σχεδιασμού πειραμάτων. Έτσι με την εκτέλεση μιας σειράς κατάλληλα επιλεγμένων πειραμάτων με την βοήθεια του DRILL3D και την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν εμπειρικές εξισώσεις που να υπολογίζουν το μέγεθος των συνιστωσών της δύναμης κοπής κατά την κατεργασία της διάτρησης, μέσα στο εύρος τιμών των παραμέτρων κοπής που χρησιμοποιήθηκαν.

1.3. Δομή της διατριβής

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η στάθμη των γνώσεων για τη μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι ερευνητικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν από άλλους ερευνητές και οι οποίες έχουν χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες:

- Αυτές που χρησιμοποιούν μαθηματικές περιγραφές του εργαλείου της διάτρησης, ώστε να μελετήσουν τη κατεργασία της διάτρησης μέσω της επίλυσης πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται είτε σε τρισδιάστατο χώρο, οπότε και η πολυπλοκότητά τους είναι σημαντική, είτε μέσα από απλοποιήσεις και προβολές σε ένα επίπεδο, οπότε απλοποιούνται μεν οι εξισώσεις, αλλά οι υπολογισμοί αυτοί υπολείπονται σε ακρίβεια.
- Αυτές που χρησιμοποιούν εμπειρικούς τρόπους για τη δημιουργία εξισώσεων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, της διαστρωματικής αποκόλλησης, τη φθορά του εργαλείου κ.λπ.. Με τον τρόπο αυτό εκτελούνται σειρές πειραμάτων, μέσα από τα οποία προτείνονται τρόποι υπολογισμού μεγεθών που σχετίζονται με τη διάτρηση (δύναμη κοπής, απαιτούμενη ροπή, διάρκεια ζωής του εργαλείου κ.λπ.), ισχύουν όμως για περιορισμένες εφαρμογές που ταιριάζουν με τα πειράματα που εκτελέστηκαν. Για να γενικευτούν οι τέτοιου είδους προτεινόμενες εξισώσεις, απαιτούνται πολύ περισσότερα πειράματα, με αποτέλεσμα να τίθενται περιορισμοί χρόνου και πόρων.
- Αυτές που χρησιμοποιούν αναλυτικούς τρόπους μελέτης της διάτρησης μέσα από τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ). Με τη μεθοδολογία αυτή επιτυγχάνονται οικονομίες κλίμακας σε εκτέλεση πραγματικών πειραμάτων, αλλά τίθεται θέμα απαιτούμενου χρόνου προσομοίωσης και διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος.

- Αυτές που χρησιμοποιούν στατιστικές μεθοδολογίες, ώστε να μειωθεί, όσο το δυνατόν περισσότερο, η εκτέλεση πειραμάτων. Αυτό συμβαίνει είτε επιλέγοντας από την αρχή συγκεκριμένο αριθμό κατάλληλων πειραμάτων, ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το εύρος και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (π.χ. σχεδιασμός πειραμάτων), είτε με την στατιστική επεξεργασία δεδομένων ή ήδη εκτελεσμένων πειραμάτων, ώστε να προκύψουν ωφέλιμα και αξιόπιστα συμπεράσματα (π.χ. ανάλυση διασποράς). Επιπλέον, σειρά ερευνητών έχει επιλέξει την χρήση μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης, ώστε να χρησιμοποιήσουν πιο αποδοτικά τα πειραματικά δεδομένα που έχουν στη διάθεσή τους και να δημιουργήσουν συστήματα που μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τα μεγέθη που αφορούν τη διάτρηση.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία προσομοίωσης μηχανουργικών κατεργασιών, η οποία βασίστηκε στον προγραμματισμό ενός γενικής χρήσης CAD/CAM συστήματος. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη μελέτη της διάτρησης, ενώ ο τρόπος ανάπτυξής της περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- σύντομη περιγραφή των δυνατοτήτων που δίνονται, μέσω του προγραμματισμού συστημάτων CAD/CAM, για τη προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών.
- περιγραφή της δημιουργίας σειράς 3D στερεών μοντέλων ελικοειδών τρυπανιών με κωνική κορυφή και ευθείες κύριες κόψεις.
- περιγραφή της δημιουργίας των 3D στερεών μοντέλων των τεμαχίων που απαιτούνται για την προσομοίωση, με αυτόματη αναγνώριση των διαστάσεων από το χρησιμοποιούμενο τρυπάνι. Σε κάθε προσομοίωση χρησιμοποιούνται διαφορετικά τεμάχια, ώστε να υπολογίζονται ξεχωριστά οι δυνάμεις που οφείλονται στη δράση των κύριων κόψεων και της εγκάρσιας κόψης.
- προσομοίωση της κινηματικής της διάτρησης, που περιλαμβάνει τόσο την αρχική τοποθέτηση του εργαλείου κοντά στο δοκίμιο, όσο και την μετακίνησή του στο χώρο κατά την κατεργασία, σε σχέση πάντα με τις χρησιμοποιούμενες συνθήκες κοπής.
- εκτέλεση πράξεων Boolean για τον υπολογισμό τόσο των 3D στερεών μοντέλων των ενδιάμεσων κατεργασμένων τεμαχίων, όσο και των 3D στερεών μοντέλων των απαραμόρφωτων αποβλίττων που προκύπτουν κάθε φορά.
- προσομοίωση της κοπής για σειρά εργαλείων με διαφορετικές παραμέτρους και συνθήκες κοπής και περιγραφή του τρόπου που επηρεάζονται οι διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίττων από την αλλαγή των βασικών παραμέτρων των εργαλείων.
- αναλυτική περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των δυνάμεων πάνω στο εργαλείο με τη μέθοδο Kienzle-Victor, που βασίζεται στην εύρεση των διαστάσεων των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Τα απόβλιττα που υπολογίζονται διακριτοποιούνται, ώστε να επιτευχθούν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Οι απαραίτητες ενέργειες είναι πλήρως αυτοματοποιημένες, μέσα από αυτόματη αναγνώριση χαρακτηριστικών απ' ευθείας από τα μοντέλα και έχουν ενσωματωθεί στην εφαρμογή DRILL3D.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η εκτέλεση σειράς πειραμάτων και τα αποτελέσματά τους, που επιβεβαιώνουν την προτεινόμενη μεθοδολογία, για τον υπολογισμό της δύναμης της κοπής κατά τη διάτρηση, μέσω των προσομοιώσεων του DRILL3D. Η επιβεβαίωση έγινε

ξεχωριστά για όλες τις κόψεις που συμμετέχουν (κύριες και εγκάρσια), με τη χρήση κατάλληλα επιλεγμένων ζευγών πειραμάτων και προδιαμορφωμένα δοκίμια. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται συνδυαστική χρήση του DRILL3D και της μεθοδολογίας σχεδιασμού πειραμάτων. Έτσι επιλέγονται μια σειρά από εργαλεία και συνθήκες κοπής, ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχουν οι διάφορες παράμετροι στην τελικώς υπολογιζόμενη δύναμη της κοπής κατά τη διάτρηση. Με την εκτέλεση 16 μόνο κατάλληλα επιλεγμένων πειραμάτων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προτείνονται μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των δυνάμεων της κοπής, ξεχωριστά για τις κύριες κόψεις και την εγκάρσια κόψη, και αποδεικνύεται η ακρίβειά τους συγκρινόμενες με τα αποτελέσματα από το πλήρες παραγοντικό σχέδιο πειραμάτων (128 πειράματα για τις κύριες κόψεις και 128 πειράματα για την εγκάρσια κόψη). Επιπλέον, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού και προτείνονται εξισώσεις μεγαλύτερης ακρίβειας, ενώ ακολουθεί και ανάλυση για τη σημαντικότητα των παραγόντων που συμμετέχουν. Ως αποτέλεσμα των αναλύσεων αυτών δημιουργήθηκαν νομογραφήματα για τον άμεσο υπολογισμό της δύναμης κοπής για σειρά εργαλείων ανάλογα με τις διαστάσεις τους και τις συνθήκες κοπής.

Τέλος, στα **Κεφάλαια 6** και **7** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα συμπεράσματα της διατριβής και η βιβλιογραφία.

2. Στάθμη Γνώσεων

Η μηχανουργική κατεργασία της διάτρησης αποτελεί την πιο διαδεδομένη κατεργασία αφαίρεσης υλικού στη βιομηχανία (30% επί των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού). Η διάτρηση χρησιμοποιείται τόσο για την διάνοιξη νέων οπών, όσο και για την περεταίρω διεύρυνση υφισταμένων. Ανακαλύφθηκε πριν από δύο αιώνες και οι οπές για τις οποίες χρησιμοποιείται συνήθως, έχουν διαμέτρους από πολύ μικρές (0.1 mm) μέχρι αρκετά μεγάλες (ακόμα και πάνω από 100mm). Ειδικά με τη χρήση ελικοειδών εργαλείων με διπλή αυλάκωση, μπορούν να διανοιχτούν μικρές οπές έως και διαμέτρου 50μm.

Συνήθως, λαμβάνει χώρα στα τελευταία στάδια της παραγωγής ενός τεμαχίου και έτσι απαιτείται υψηλή αξιοπιστία, αφού το παραγόμενο προϊόν έχει ήδη υποστεί σειρά κατεργασιών και έχει προστεθεί πάνω του σημαντική αξία. Σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακά γνωστές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (τόρνευση, φραιζάρισμα κ.λπ.) η διάτρηση εμφανίζει απλούστερη κινηματική, αλλά ταυτόχρονα έχει σημαντικές δυσκολίες στη μελέτη της, ιδιαίτερα εάν αναλογιστεί κανείς, τις διαφορετικές κόψεις που εμπλέκονται, το μηχανισμό κοπής σε κάθε μία από αυτές, τη δυναμική που αναπτύσσεται κατά τη κατεργασία, τον έλεγχό της, την απομάκρυνση του δημιουργούμενου αποβλίττου, αλλά και τη παραγόμενη θερμότητα που απαιτείται να απομακρυνθεί. Οι ίδιες οι συνθήκες της δημιουργίας του αποβλίττου είναι αόρατες στο χειριστή, ενώ ο χώρος που διατίθεται για την απομάκρυνσή του είναι ιδιαίτερα μικρός. Η τριβή μεταξύ του εργαλείου, του αποβλίττου και του δοκιμίου αποδεικνύεται σημαντική. Η ροή θερμότητας από τις επιφάνειες που δημιουργούνται κατά τη κατεργασία, προς το περιβάλλον μπορεί να είναι προβληματική, ενώ ταυτόχρονα η ταχύτητα κοπής μεταβάλλεται κατά μήκος της κόψης συνεχώς. Αυτοί είναι οι βασικοί λόγοι που οδηγούν πολλούς ερευνητές στην ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά και τη βιομηχανία, να μελετούν και να προτείνουν πολλές παραλλαγές τρυπανιών και στρατηγικές ελέγχου της διάτρησης.

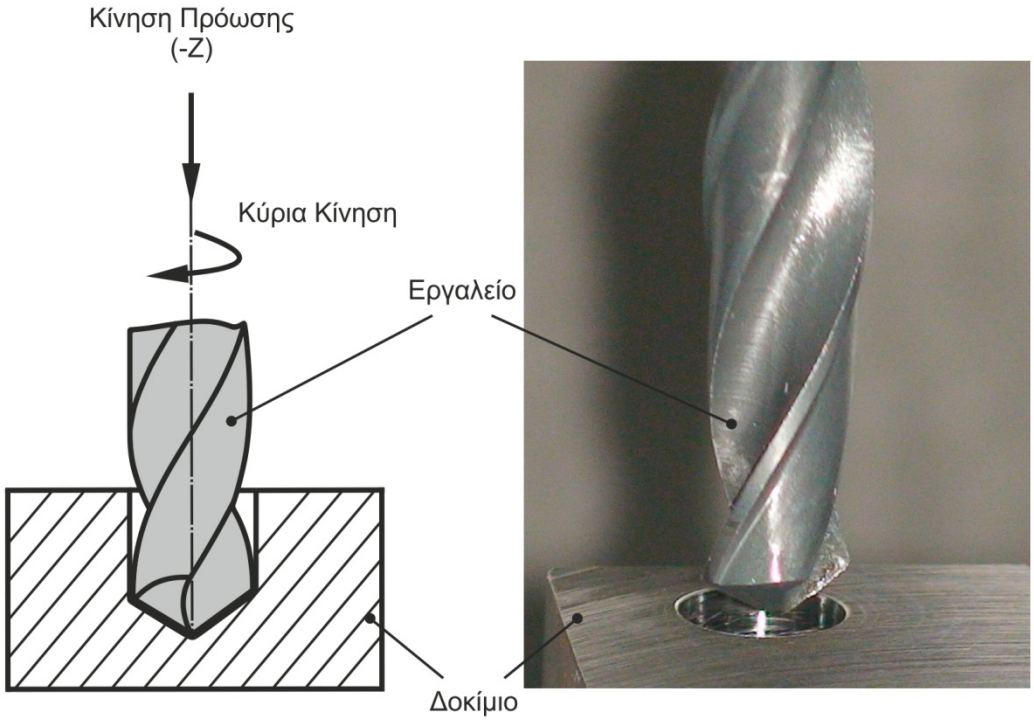
2.1. Συνοπτική παρουσίαση της κατεργασίας και του εργαλείου διάτρησης

Η εργαλειομηχανή όπου λαμβάνει χώρα η διάτρηση, αλλά και μια σειρά από παρεμφερείς εργασίες, ονομάζεται δράπανο. Η λειτουργία του εξασφαλίζει την σωστή κίνηση του εργαλείου (τρυπάνι), που αποτελεί ένα συνδυασμό δύο επιμέρους κινήσεων (σχήμα 2.1):

- πρωτεύουσα κίνηση, που αντιστοιχεί στην περιστροφική κίνηση του γύρω από τον άξονά του.
- δευτερεύουσα κίνηση (-Z), που αντιστοιχεί στη συνεχή αξονική κίνηση πρόωσης του εργαλείου μέσα στο δοκίμιο.

Το ελικοειδές τρυπάνι αποτελεί το πιο συνηθισμένο κοπτικό εργαλείο διάτρησης και χρησιμοποιείται ευρύτατα. Ανακαλύφθηκε από την εταιρεία “Moses Twist Drill and Machine Company” το 1820. Ακόμη και σήμερα αποτελεί το πιο συνηθισμένο εργαλείο για οπές από 2 έως 20mm. Από όλα τα διαθέσιμα εργαλεία, αποτελεί αυτό που έχει παραχθεί περισσότερο από κάθε άλλο.

Αποτελείται από το στέλεχος, το οποίο μπορεί να είναι κωνικό ή κυλινδρικό και συγκρατεί το εργαλείο στην άτρακτο του δραπάνου και το κοπτικό μέρος. Στο σχήμα 2.2 δίνεται η περιγραφή της μορφής ενός ελικοειδούς τρυπανιού κωνικής κορυφής και η αντίστοιχη ορολογία για τα μέρη του.



Σχήμα 2.1. Κινηματική της διάτρησης

Η κοπή συντελείται κατά βάση σε δύο περιοχές κοπής πάνω στο εργαλείο:

- στις κύριες κόψεις (ή χείλη κοπής) των οποίων η κοπή είναι παρόμοια με αυτή που συναντάται στην τόρνευση, με την έννοια ότι κατά μήκος τους υπάρχει μια γεωμετρία που περιλαμβάνει τις γωνίες αποβλίττου, ελευθερίας και σφήνας. Φυσικά, στην περίπτωση της διάτρησης οι γωνίες αυτές αλλάζουν συνεχώς με την αλλαγή της απόστασης από το κέντρο του εργαλείου.
- στην εγκάρσια κόψη, όπου η ίδια δεν ενεργεί ακριβώς ως κόψη, αλλά εξωθεί το υλικό προς τις κύριες κόψεις, μέσω έντονης πλαστικής παραμόρφωσης.

Οι δευτερεύουσες κόψεις συμμετέχουν μερικώς στην αποπεράτωση της οπής και βρίσκονται στα άκρα των αυλακώσεων πλησίον του τοιχώματος της οπής.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ο συμβολισμός των γωνιών των κόψεων ενός ελικοειδούς εργαλείου διάτρησης με κωνική κορυφή. Η τομή ΑΑ αποκαλύπτει ότι σε κάθε τομή των κύριων κόψεων, εμφανίζεται μία στοιχειώδης κόψη του εργαλείου και ξεχωρίζουν η γωνία αποβλίττου (γ), η γωνία σφήνας (β) και η γωνία ελευθερίας (α), όπως και σε κάθε κοπτική ακμή απλού εργαλείου κατεργασίας. Επιπλέον, δίνονται η γωνία ελίκωσης (h), η γωνία κορυφής (2p) και η γωνία εγκάρσιας κόψης (ξ) μαζί με το συμβολισμό τους.

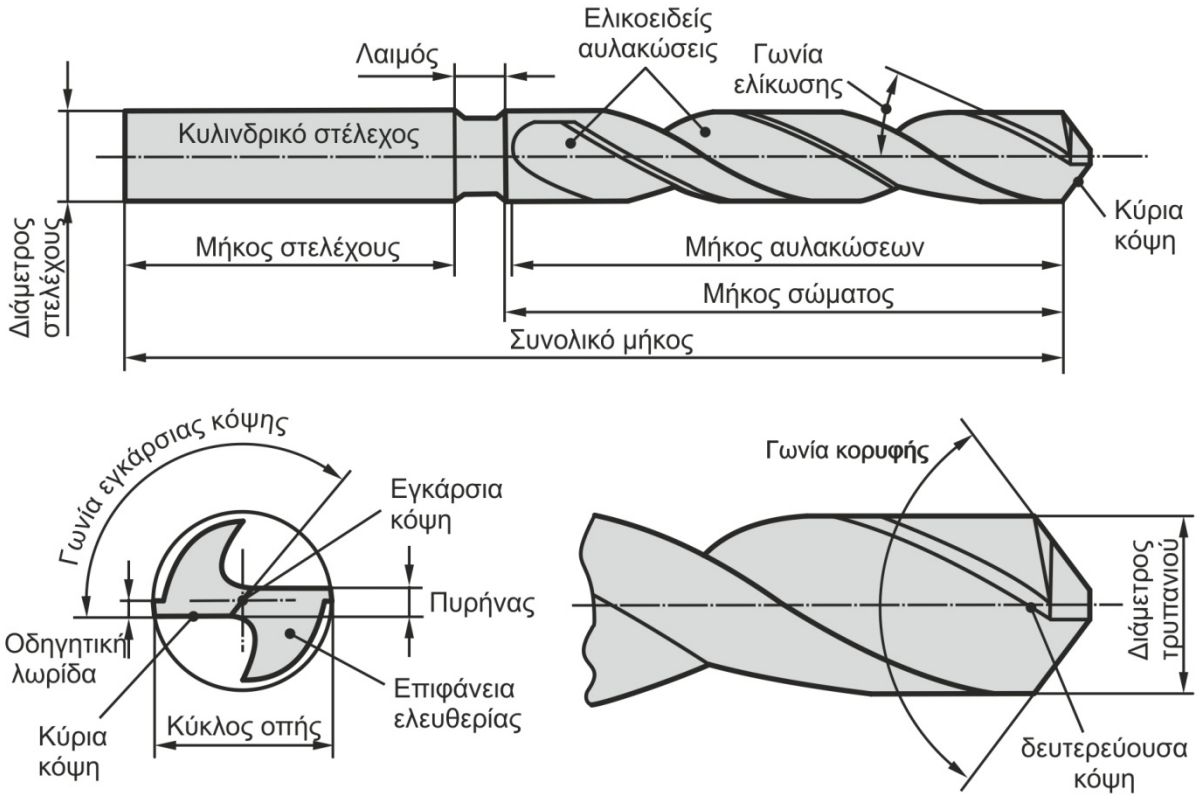
Οι ελικοειδείς αυλακώσεις ενός τρυπανιού έχουν πολλαπλή χρήση (σχήμα 2.4):

- δημιουργούν κατάλληλης γεωμετρίας κόψεις, ενώ ταυτόχρονα μορφοποιούν τις δύο οδηγητικές λωρίδες στη περιφέρειά τους,
- απομακρύνουν τα απόβλιττα που παράγονται κατά την κοπή και
- μεταφέρουν το υγρό κοπής προς το εσωτερικό της διαμορφούμενης οπής, ώστε να ψύχεται η περιοχή των κόψεων.

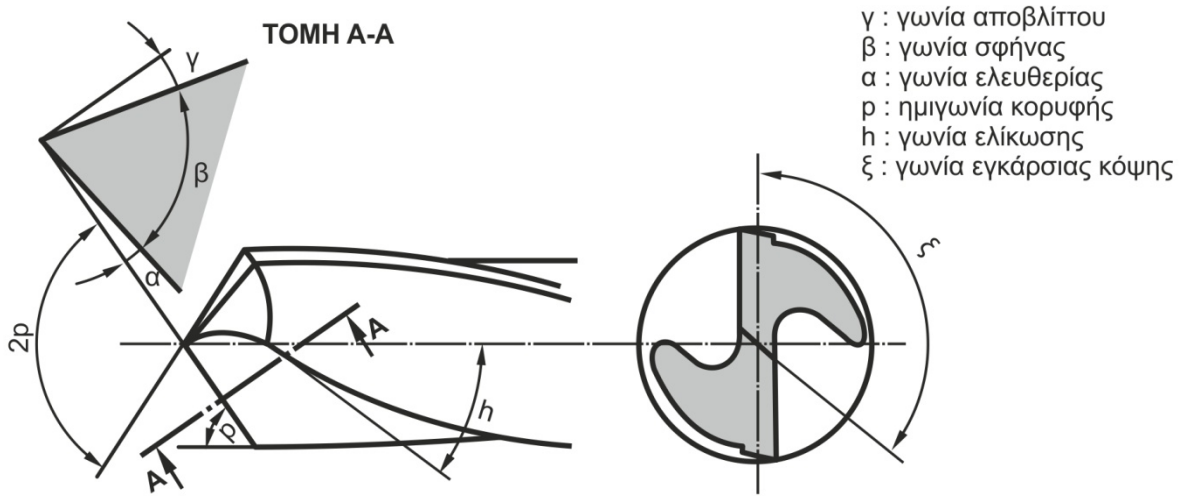
Ενώ από την μία οι αυλακώσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες, ώστε να μπορούν να επιτελέσουν το σκοπό τους, εντούτοις εάν μεγαλώσουν πολύ, τότε το σώμα του εργαλείου θα έχει πολύ μικρότερη αντοχή και στιβαρότητα. Έτσι υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης

έντονων κραδασμών κατά τη λειτουργία του, που μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε θραύση του.

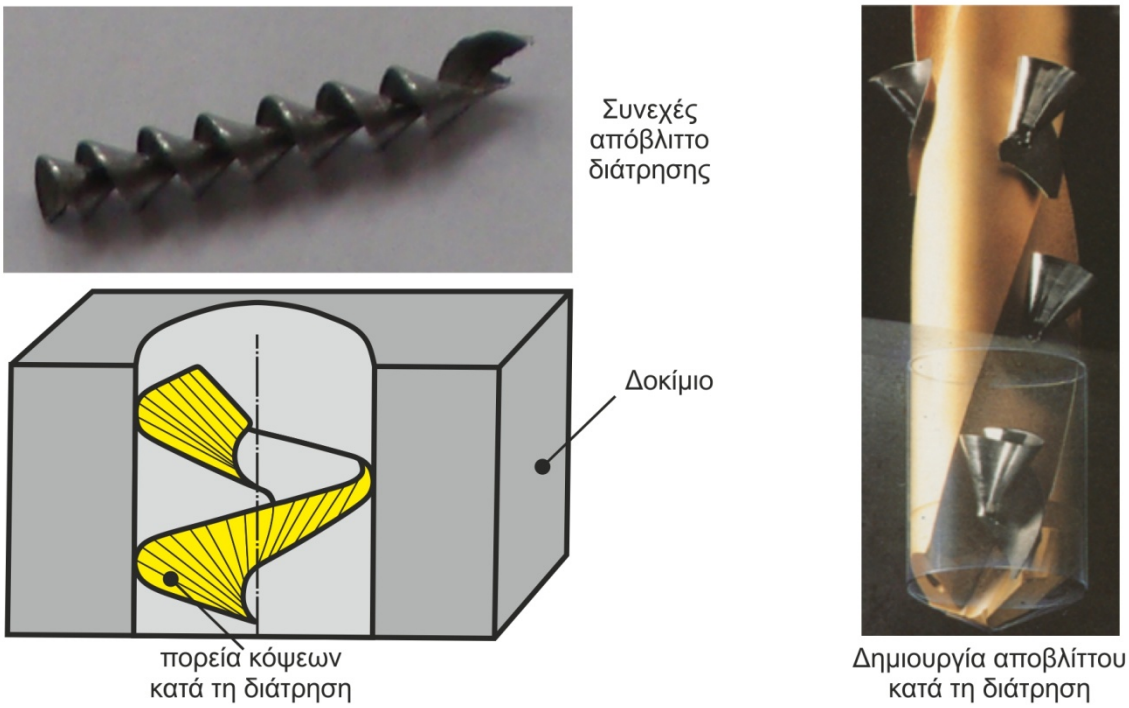
Οι οδηγητικές λωρίδες από την μεριά τους βοηθούν στην καθοδήγηση και στήριξη του εργαλείου κατά τη διάτρηση, ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν σημαντικά τις απώλειες τριβής, αφού ελαττώνεται το μέγεθος της εκτεθειμένης επιφάνειας για τριβή. Ένας επιπλέον μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την μείωση της τριβής κατά τη διάτρηση, είναι και η χρήση μικρής κωνικότητας κατά μήκος του εργαλείου, ώστε η ονομαστική διάμετρος να ελαττώνεται από την κορυφή προς τη βάση του (ενδεικτικά κατά 1/1000).



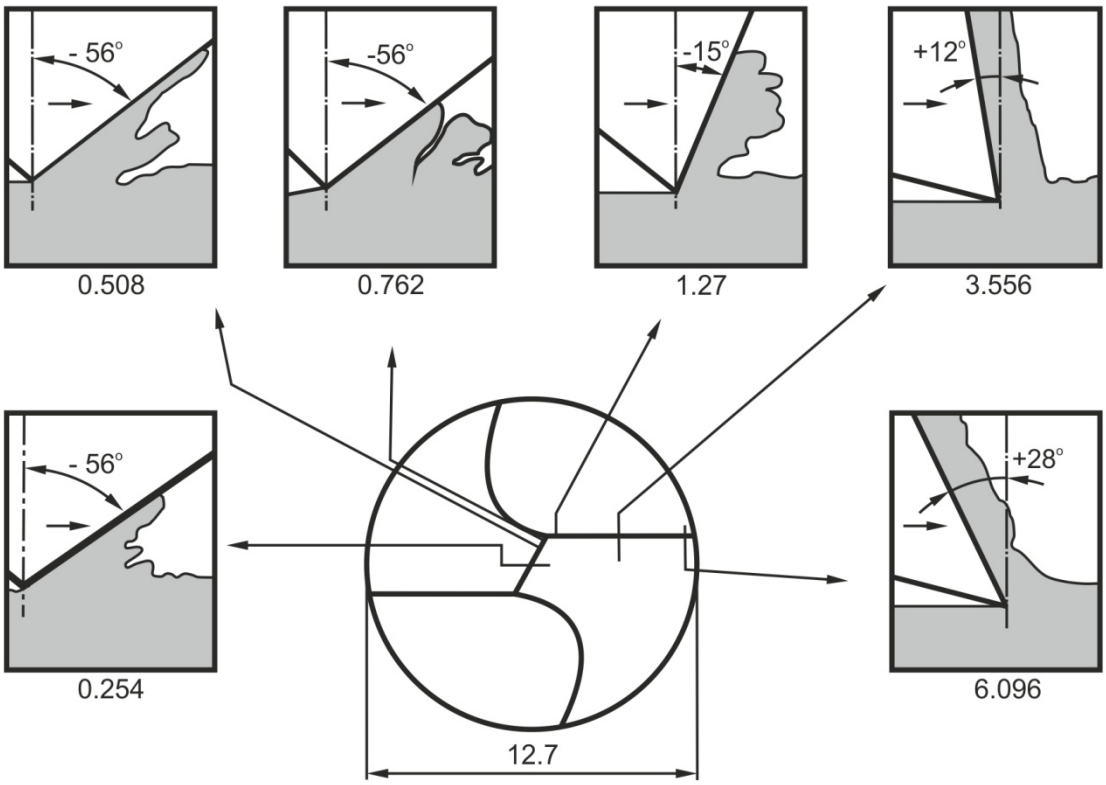
Σχήμα 2.2. Περιγραφή του εργαλείου διάτρησης (τρυπάνι)



Σχήμα 2.3. Γωνίες των κόψεων ενός εργαλείου διάτρησης



Σχήμα 2.4. Δημιουργία αποβλίττου κατά τη κατεργασία της διάτρησης



Σχήμα 2.5. Μεταβολή των γωνιών κοπής του τρυπανιού κατά μήκος των κόψεων

Η γωνία κορυφής επιτρέπει την σταδιακή εισχώρηση του εργαλείου κοπής στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η γωνία ελίκωσης και η γωνία αποβλίττου δεν είναι σταθερές κατά μήκος της ακτίνας του εργαλείου, αλλά μειώνονται καθώς ελαττώνεται η ακτίνα της μελετώμενης περιοχής από τη περιφέρεια προς το κέντρο. Η γωνία ελευθερίας βαίνει αυξανόμενη από την περιφέρεια προς το κέντρο του εργαλείου, ενώ η γωνία αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης είναι έντονα αρνητική. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται παραστατικά η μεταβολή των γωνιών κοπής σε σχέση με την απόστασή τους από το κέντρο του εργαλείο μέχρι την περιφέρειά του [5, 6].

Για το λόγο αυτό, οι γωνίες που δίνονται σε καταλόγους εργαλείων κοπής και αφορούν τις γωνίες ελίκωσης, αποβλίττου και ελευθερίας αναφέρονται συνήθως στην εξωτερική διάμετρο του εργαλείου. Ενδεικτικές τιμές των γωνιών, ανάλογα με το προς κατεργασία υλικό, αλλά και τις απαιτούμενες συνθήκες κοπής, δίνονται σε πολλά εγχειρίδια μηχανουργικών κατεργασιών [7, 8, 9].

2.2. Διεθνής έρευνα στην κατεργασία της διάτρησης

Παρά το γεγονός ότι έχουν προηγηθεί σημαντικές εξελίξεις στην έρευνα για τη διαδικασία της διάτρησης, και αφορούν τη γεωμετρία των εργαλείων, τη διαδικασία της κοπής, την απόδοση των εργαλείων κ.λπ., υπάρχουν πολλές ασάφειες που αφορούν ακόμα και την περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (γωνιών κ.λπ.) των τρυπανιών. Ακόμη και η εξέλιξη των προτύπων που αφορούν τα κοπτικά εργαλεία, δίνει σειρά πληροφοριών για βασικές παραμέτρους όπως π.χ. την ονομαστική διάμετρο, το συνολικό μήκος του εργαλείου, το μήκος των αυλακώσεων, τις διαστάσεις του στελέχους στήριξης, αλλά και τις διαστάσεις της γωνίας κορυφής (π.χ. 118°). Για τις υπόλοιπες διαστάσεις του εργαλείου – που είναι και πολύ περισσότερες - και αφορούν άμεσα την κοπή, δεν γίνεται λόγος ή δεν δίνονται προτεινόμενες τιμές, αφήνοντας έτσι τους κατασκευαστές να τις επιλέξουν οι ίδιοι με βάση την εμπειρία και την τεχνογνωσία τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακριβής γεωμετρία των εργαλείων να εξαρτάται από τους διαφορετικούς τρόπους και τεχνικές κατασκευής του εργαλείου [10, 11, 12, 13]. Από την πλευρά τους, οι ίδιοι οι κατασκευαστές δεν περιγράφουν τον ακριβή τρόπο κατασκευής, και επομένως τις ακριβείς γεωμετρικές διαστάσεις που προκύπτουν, αφού αυτό αποτελεί βιομηχανικό μυστικό και στρατηγικό πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστών τους.

Για τη μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης ακολουθήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις από τους διάφορους ερευνητές, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- οι μαθηματικές περιγραφές της γεωμετρίας του εργαλείου με διάφορους τρόπους και στη συνέχεια η χρήση τους για να αναλυθούν επιμέρους θέματα που αφορούν τη κατεργασία. Πολύ συνηθισμένη πρακτική είναι η χρήση μοντέλων τα οποία στηρίζονται στην προβολή σε ένα επίπεδο (2D), γεωμετρικών χαρακτηριστικών που από τη φύση τους είναι τρισδιάστατα (3D),
- ο εμπειρικός τρόπος μελέτης της διάτρησης, κατά τον οποίο με τη βοήθεια μιας σειράς πειραμάτων, μπορεί κανείς να μελετήσει τη συμπεριφορά της κοπής και τα αποτελέσματά της. Αποτελεί για πολλά χρόνια μια μεθοδολογία η οποία μπορεί να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, με δαπανηρό όμως συνήθως τρόπο,
- ο αναλυτικός τρόπος μελέτης της διάτρησης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος βασίστηκε στην μεγάλη εξέλιξη που υπήρξε τόσο στον τομέα του εξειδικευμένου λογισμικού που αφορά την μηχανική, όσο και στον τομέα της απόδοσης των Η/Υ.

- η χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για τη μελέτη της διάτρησης, αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τους ερευνητές, αφού μεταφέρεται γνώση και εμπειρία από μεθοδολογίες που έχουν εξελιχθεί σε άλλα πεδία έρευνας και εφαρμόζονται στις μηχανουργικές κατεργασίες.

Η παρούσα εργασία καταφέρνει, με τον τρόπο που αναπτύχθηκε, να συνδυάζει όλες αυτές τις διαφορετικές προσεγγίσεις. Ο τρόπος που αυτό επιτυγχάνεται, περιγράφεται για κάθε μια από αυτές ξεχωριστά.

- Η γεωμετρική περιγραφή του εργαλείου λαμβάνει χώρα μέσω της 3D στερεάς μοντελοποίησης του. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν να παραχθούν σειρές διαφορετικών εργαλείων (ανάλογα με τις παραμέτρους που θα επιλεγούν) και ταυτόχρονα αυξάνεται η ακρίβεια των υπολογισμών, αφού η όλη ανάλυση στηρίζεται απ' ευθείας σε 3D στερεά μοντελοποίηση και όχι γεωμετρικές προβολές σε επίπεδα. Επιπλέον, ολόκληρο το φόρτο των γεωμετρικών υπολογισμών τον αναλαμβάνει το σύστημα CAD/CAM κι έτσι αποφεύγεται η άμεση εμπλοκή του χρήστη με πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις.
- Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης επιβεβαιώθηκε πειραματικά και επομένως είναι δυνατή πλέον η μεγάλης ακρίβειας ψηφιακή εκτέλεση πειραμάτων, που υπερέχει σημαντικά, αφού απαιτεί σημαντικά μικρότερους διαθέσιμους πόρους.
- Η υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για την εκτέλεση μεγάλου αριθμού υπολογισμών κατά την δημιουργία των 3D στερεών μοντέλων των κατεργασμένων τεμαχίων και των παραγόμενων αποβλίττων, είναι δραστικά μικρότερη από ότι με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Το λογισμικό προσομοίωσης DRILL3D χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το σχεδιασμό πειραμάτων, ώστε με τη προσομοίωση μικρού αριθμού στοχευμένων πειραμάτων, να είναι δυνατός ο προσδιορισμός μαθηματικών μοντέλων μεγάλης ακρίβειας και για όλα τα υπόλοιπα πειράματα του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού που μπορούν να μην εκτελεστούν.

2.2.1. Μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας του εργαλείου και της διάτρησης

Ο πρώτος που επιχείρησε μια αναλυτική μαθηματική περιγραφή του εργαλείου διάτρησης και ιδίως της κορυφής του, ήταν ο Galloway [14], ο οποίος βασίστηκε στην αρχή της κωνικού τροχίσματος της κορυφής (conical grinding concept), για τη δημιουργία τρυπανιού με ευθείες κύριες κόψεις. Για να είναι αυτό δυνατό, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον μια συγκεκριμένη εγκάρσια μορφή αυλακώσεων βασισμένη στην εξίσωση:

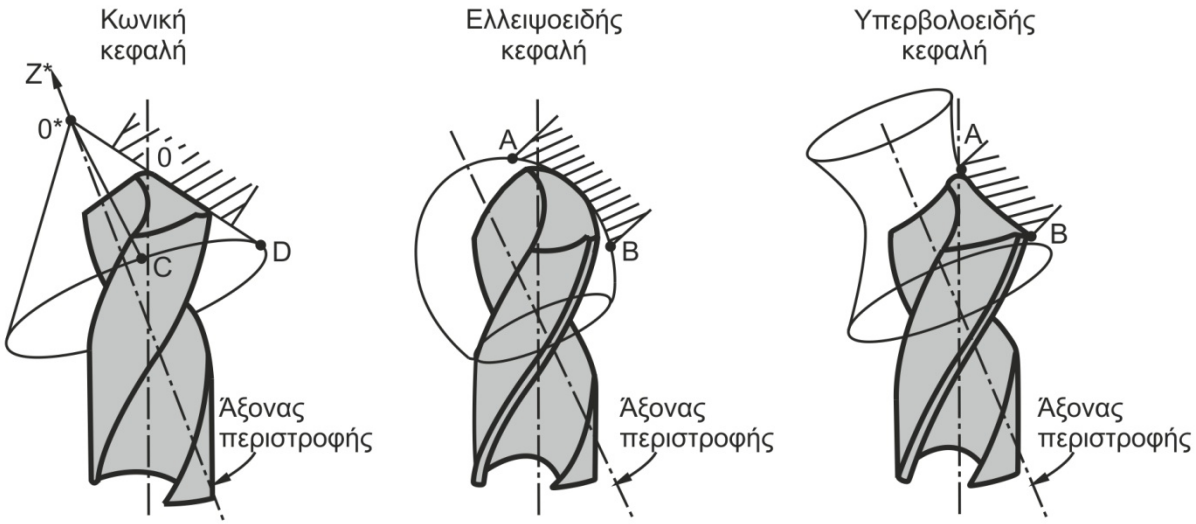
$$v = \arcsin\left(\frac{W/2}{r}\right) + \frac{\sqrt{r^2-(W/2)^2}}{D/2}\frac{\tan(h)}{\tan(p)}$$

όπου:

W: ο πυρήνας του εργαλείου σε mm
D: η διάμετρος του εργαλείου σε mm
h: η γωνία ελίκωσης σε μοίρες
p: η ημιγωνία κορυφής σε μοίρες
(v, r): οι πολικές συντεταγμένες της εγκάρσιας μορφής των αυλακώσεων, που διαφοροποιούνται καθώς το r μεταβάλλεται από W/2 έως D/2.

Τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη φαίνονται στα σχήματα 2.2 και 2.3, ενώ η χρήση των πολικών συντεταγμένων της συνάρτησης εξηγείται στη παράγραφο 3.3.2. Η προτεινόμενη μαθηματική περιγραφή του εργαλείου, οδήγησε στον αναλυτικό γεωμετρικό υπολογισμό μιας σειράς γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κόψεων όπως: των γωνιών αποβλίττου, σφήνας και ελευθερίας για κάθε μια από τις κόψεις συναρτήσει της απόστασης από τον άξονα περιστροφής, της εγκάρσιας γωνίας κορυφής του εργαλείου, της σχέσης των εκάστοτε γωνιών αποβλίττου με τη γωνία ελίκωσης κ.λπ.. Οι σχέσεις αυτές είναι αποτέλεσμα της επίλυσης εξισώσεων στο χώρο και εμπεριέχουν σημαντική πολυπλοκότητα για την επίλυσή τους, αφού συμμετέχουν ταυτόχρονα η ελικοειδής μορφή του εργαλείου, η συνάρτηση της προτεινόμενης μορφής της εγκάρσιας γεωμετρίας του εργαλείου και το έκκεντρο κωνικό τρόχισμα της κεφαλής του εργαλείου. Πέρα όμως από την ανάλυση των υπολογισμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κύριων κόψεων του εργαλείου, η περιγραφή δεν είναι το ίδιο λεπτομερής και για τη γεωμετρία της εγκάρσιας κόψης.

Οι Fuji et al. [15, 16] χρησιμοποίησαν την έρευνα του Galloway με στόχο να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό του τρυπανιού. Στις πρώτες δύο εργασίες τους, ασχολήθηκαν με τη εξεύρεση της γεωμετρίας των επιφανειών αποβλίττου και ελευθερίας, με τη χρήση της μεθόδου των τομών των αντίστοιχων εξισώσεων στο χώρο. Η μέθοδος αυτή είχε ως αποτέλεσμα να υπολογιστούν μια σειρά από ελλειπτικές, παραβολικές και υπερβολικές καμπύλες, ανάλογα με τη γωνία τομής (του εργαλείου) που χρησιμοποιήθηκε και τελικά να υπολογιστεί τόσο η μορφή των δύο επιφανειών (αποβλίττου και ελευθερίας), όσο και η μορφή της εγκάρσια κόψης. Οι υπολογισμοί αυτοί επιβεβαιώθηκαν με σειρά ελέγχων σε πραγματικά εργαλεία. Στη συνέχεια, πάλι με τη μέθοδο των τομών, κατέληξαν σε μια εξίσωση που περιγράφει τη κλίση της εγκάρσιας κόψης, ενώ στην τελευταία εργασία τους προτείνεται η κατασκευή μιας συσκευής για την δημιουργία τρυπανιών με ελεγχόμενες παραμέτρους [17, 18] .



$$\frac{1}{a^2}\left[(x\cos\varphi + z\sin\varphi) + \left(\alpha^2 - \delta\frac{a^2}{c^2}d^2 - S^2\right)^{1/2}\right]^2 + \frac{1}{a^2}(y-S)^2 + \frac{1}{c^2}(z\cos\varphi - x\sin\varphi + d)^2 = 1$$

όπου:
x, y, z: είναι οι συντεταγμένες των σημείων των επιφανειών ελευθερίας στο χώρο,
α, c, d, φ και S: είναι παράμετροι των επιφανειών,

Σχήμα 2.6. Προτεινόμενες αναλύσεις εργαλείων κατά Tsai and Wu

Οι Tsai και Wu [19, 20, 21] επέκτειναν την αναλυτική περιγραφή του τρυπανιού, ώστε να περιλαμβάνονται εργαλεία τόσο με κωνική, όσο και με ελλειψοειδή και υπερβολοειδή κορυφή (σχήμα 2.6). Στις εργασίες τους περιγράφεται αναλυτικά η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας της κορυφής του εργαλείου ανάλογα με την περίπτωση στην οποία αναφέρονται, ενώ γίνεται αναλυτική περιγραφή της επίπτωσης που έχει η κάθε παράμετρος στη τελική μορφή των εργαλείων.

Οι Armarego και Rotenberg [22, 23, 24] διερεύνησαν με αντίστοιχο γεωμετρικό τρόπο τη διαδικασία κωνικής τρόχισης ενός τρυπανιού με ευθείες κύριες κόψεις και την δυνατότητα εξεύρεσης μεγάλης πλειάδας τρόπων τροχίσματος, που μπορούν να δώσουν το επιθυμητό κοπτικό εργαλείο. Αυτό σημαίνει ότι δίνεται η δυνατότητα εκλογής κατάλληλων παραμέτρων, ώστε να κατασκευαστεί ένα εργαλείο που να βελτιστοποιεί κάποιο από τα χαρακτηριστικά της απόδοσής του π.χ. να χρησιμοποιεί την ελάχιστη δυνατή τιμή της γωνίας του κωνικού τροχού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η βελτίωση της δράσης της εγκάρσιας κόψης και επομένως μικρότερες δυνάμεις κοπής. Τέλος, προτείνεται και μια σειρά από γεωμετρίες συσκευών κωνικού τροχίσματος, που θα μπορούσαν να υλοποιήσουν τις αντίστοιχες βελτιώσεις.

Αρκετοί ερευνητές προχώρησαν απευθείας, χωρίς να ασχοληθούν αναλυτικά με τη γεωμετρία του εργαλείου αυτού καθ' αυτού, στη δημιουργία προτάσεων για συσκευές τροχίσματος τρυπανιών. Ο Fugelso [25] στράφηκε στο σχεδιασμό ενός τέτοιου μηχανισμού, ως εναλλακτικό τρόπο κατασκευής τρυπανιών, σε σχέση με το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο, που είναι με χρήση προγραμματιζόμενων εργαλειομηχανών. Αυτό όσο κι εάν φαίνεται παράξενο, μπορεί να δημιουργήσει εργαλεία με μεγάλη ακρίβεια, που δεν θα απαιτούν επιπλέον έλεγχο ποιότητας. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εργαλεία πολύ μικρών διαστάσεων, που ο έλεγχός τους απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια. Οι Vangsness et al. [26] προχώρησαν σε έναν κλειστού τύπου υπολογισμό της κινηματικής αλυσίδας ενός μηχανισμού τροχίσματος ελικοειδών τρυπανιών. Το αποτέλεσμα ήταν να προκύψουν εξισώσεις κίνησης οι οποίες μπορούν να επιλύονται έως 100 φορές γρηγορότερα από τους παραδοσιακά χρησιμοποιούμενους επαναληπτικούς αλγορίθμους. Οι Hsieh και Lin [27, 28, 29, 30] ανέλυσαν την παραγωγή εργαλείων με πολλαπλές αυλακώσεις, με τη χρήση ενός CNC μηχανήματος έξι αξόνων, που μπορεί με μία μόνο αρχική ρύθμιση να παράξει τόσο τις αυλακώσεις, όσο και τις επιφάνειες ελευθερίας του τρυπανιού. Αυτό το γεγονός μπορεί από μόνο του, να αποτελέσει στοιχείο για κατασκευή εργαλείων με σημαντικά αυξημένη ακρίβεια. Τέλος οι Li et al. [31, 32] χρησιμοποιώντας το MSC/ADAMS™ για τον υπολογισμό της κινηματικής αλυσίδας κατά το τρόχισμα με τη βοήθεια του προτεινόμενου μηχανισμού, προχώρησαν στην επιβεβαίωση της αρχής λειτουργίας του και του γεγονότος ότι μπορεί να παράγει τη γεωμετρία του εργαλείου που αναμενόταν.

Οι Zhang et al. [33] ασχολήθηκαν με τον αναλυτικό υπολογισμό της γεωμετρίας ενός παραδοσιακού ελικοειδούς τρυπανιού και μιας παραλλαγής του που μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη κατασκευαστική ακρίβεια, ως προς τις απαιτήσεις του εργαλείου, αλλά και βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης έναντι του παραδοσιακού τρυπανιού. Οι Ren και Ni [34] ασχοληθήκαν με έναν αναλυτικό υπολογισμό όλων των γωνιών που αφορούν το τρυπάνι. Εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί επιφανειών ελευθερίας και αποβλίττου, ενώ παράλληλα δοκιμάστηκαν και διαφορετικές γεωμετρίες εγκάρσιας τομής του εργαλείου.

Οι Chen et al. [35] παρουσίασαν ένα νέο εργαλείο διάτρησης (split-point drill), του οποίου τη γεωμετρία περιέγραψαν αναλυτικά και στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα μοντέλο που υπολόγιζε την απαιτούμενη ροπή και δύναμη της κοπής κατά τη χρήση του. Οι υπολογισμοί βασίζονταν στην ακριβή μαθηματική γεωμετρία του εργαλείου και επαληθεύτηκαν με σειρά

πειραμάτων. Στη συνέχεια προτάθηκαν βέλτιστες γεωμετρικές τιμές, ώστε να επιτευχθούν χαμηλή απαιτούμενη ροπή και δύναμη κοπής από το νέο εργαλείο.

Οι Wang και Zhang [36, 37] πρότειναν ένα εργαλείο με τροποποιημένη κορυφή, με αποτέλεσμα η γωνία αποβλίττου σχεδόν σε όλη την περιοχή της κορυφής να είναι θετική. Αυτό σημαίνει ότι ανακουφίζεται η περιοχή της κορυφής από μεγάλα φορτία και έτσι μειώνεται η δύναμη κοπής (μέχρι και 46.9%) και η ροπή του εργαλείου (κατά μέσο όρο 13.2%), ενώ ταυτόχρονα όταν λαμβάνει χώρα κατεργασία χαλύβων υψηλής αντοχής, μειώνεται η πιθανότητα να σπάσει το εργαλείο. Επίσης προτείνονται μοντέλα υπολογισμού των δυνάμεων που αφορούν το συγκεκριμένο εργαλείο.

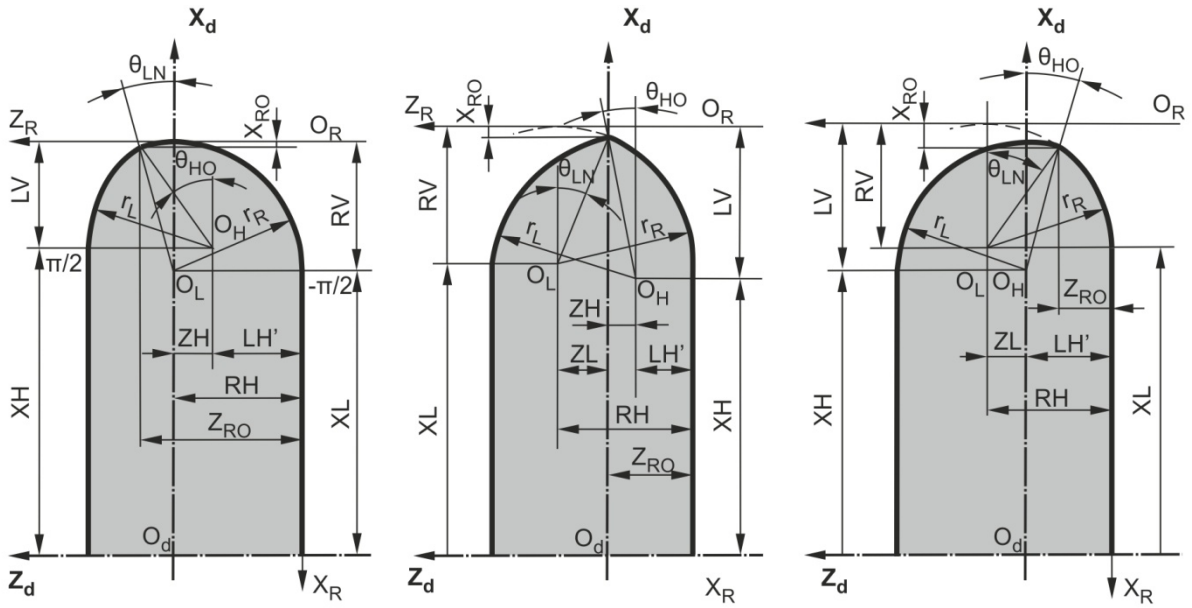
Με το ίδιο σκεπτικό, που βασίζεται στην μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας, ασχολήθηκαν και μια σειρά από άλλους ερευνητές, οι οποίοι έδωσαν έμφαση στη γεωμετρία της εγκάρσιας τομής του εργαλείου. Η γεωμετρία αυτή θεωρείται πολύ σημαντική, τόσο για την στιβαρότητα του εργαλείου, όσο και για τη δυνατότητά του να απομακρύνει με ευκολία τα απόβλιττα. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος χώρος είναι διαθέσιμος για την απομάκρυνση των αποβλίττων, τόσο μικρότερη είναι η διαθέσιμη διατομή του εργαλείου και επομένως μειώνεται η στιβαρότητά του [38, 39, 40]. Οι Thornley et al. [41] ασχολήθηκαν με το μέγεθος της στιβαρότητας που θα πρέπει να έχει το εργαλείο, ανάλογα με το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Εξετάζουν μια σειρά από συμβιβασμούς, που αφορούν την επιλογή των γεωμετρικών παραμέτρων των εργαλείων σε σχέση με την βέλτιστη δυνατή στιβαρότητα που μπορεί να επιτευχθεί. Έτσι πρακτικά προτείνουν εμπειρικές εξισώσεις που υλοποιούν αυτούς τους συμβιβασμούς.

Πρακτικά η γεωμετρία της εγκάρσιας τομής προκύπτει από την επιλογή της γεωμετρίας του τροχού που θα χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν οι αυλακώσεις του τρυπανιού. Κάθε κατασκευαστής όμως, βασίζεται στη τελική γεωμετρία που επιθυμεί και κάνοντας τους αντίστροφους γεωμετρικούς υπολογισμούς, βρίσκει τον επιθυμητό τροχό τροχίσματος των αυλακώσεων. Οι Kang και Armarego [42, 43, 44] ταίριαξαν τη γεωμετρία τριών διαφορετικών ειδών τροχών, με τις αντίστοιχες παραμέτρους της γεωμετρίας των αυλακώσεων που προκύπτουν κατά τη δημιουργία τους (σχήμα 2.7). Οι υπολογισμοί έλαβαν χώρα και προς τις δύο κατευθύνσεις υπολογισμού (ευθύς και ανάστροφος υπολογισμός), δηλαδή για συγκεκριμένη γεωμετρία τροχού προκύπτει η υπολογισμένη γεωμετρία αυλακώσεως και το αντίθετο. Με αντίστοιχο σκεπτικό οι Wenjiang et al. [45] χρησιμοποίησαν δεδομένη γεωμετρία τροχού τροχίσματος των αυλακώσεων και προσομοίωσαν τη γεωμετρία της προκύπτουσας εγκάρσιας τομής του εργαλείου. Η προσομοίωση περιελάμβανε τρεις παραλλαγές (με ένα, δύο και τρία τόξα). Τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστούν εργαλεία τα οποία επιβεβαίωσαν τη μαθηματική ανάλυση που αναπτύχθηκε (σχήμα 2.8).

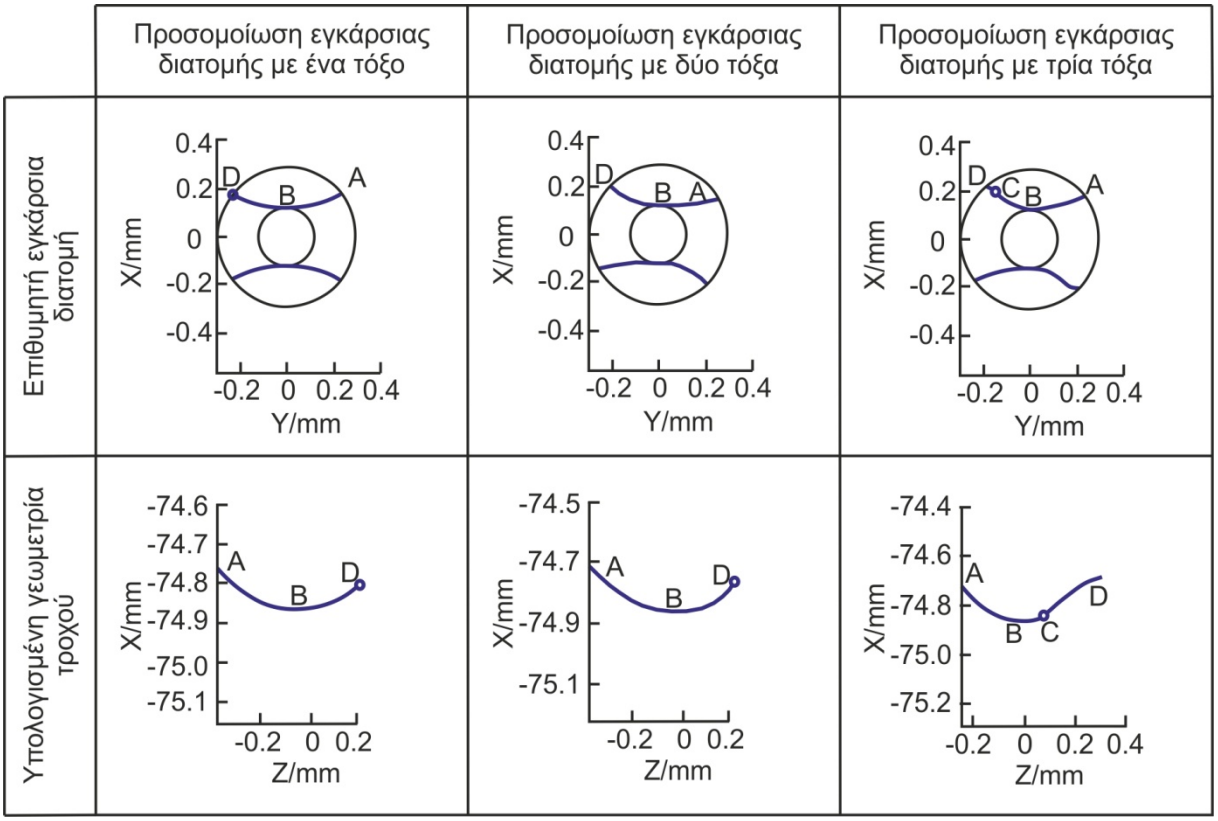
Οι Xiong et al. [46] παρουσίασαν ένα γεωμετρικό μοντέλο δημιουργίας εργαλείου καμπυλωτής κοπτικής ακμής, με επιλογή της κατανομής των γωνιών κοπής κατά μήκος των κόψεων και με τη χρήση 81 μαθηματικών εξισώσεων. Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία αναλύονται τρία διαφορετικά εργαλεία και υπολογίζονται η δύναμη κοπής και η ροπή κατά τη διάτρηση.

Ο Audy [47, 48] αναγνωρίζει τις δυσκολίες που ανακύπτουν από το μαθηματικό υπολογισμό της γεωμετρίας των εργαλείων διάτρησης, ειδικά όσον αφορά τροποποιημένα εργαλεία στην κορυφή τους και εστιάζει στο θέμα της επικάλυψης των εργαλείων, ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητές τους. Προχωρά σε ένα γεωμετρικό μοντέλο, το οποίο συνδέει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κορυφής των εργαλείων, με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής και την

καταναλισκόμενη ισχύ. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για μια σειρά διαφορετικών εργαλείων με επικαλύψεις και υλικών δοκιμίων.



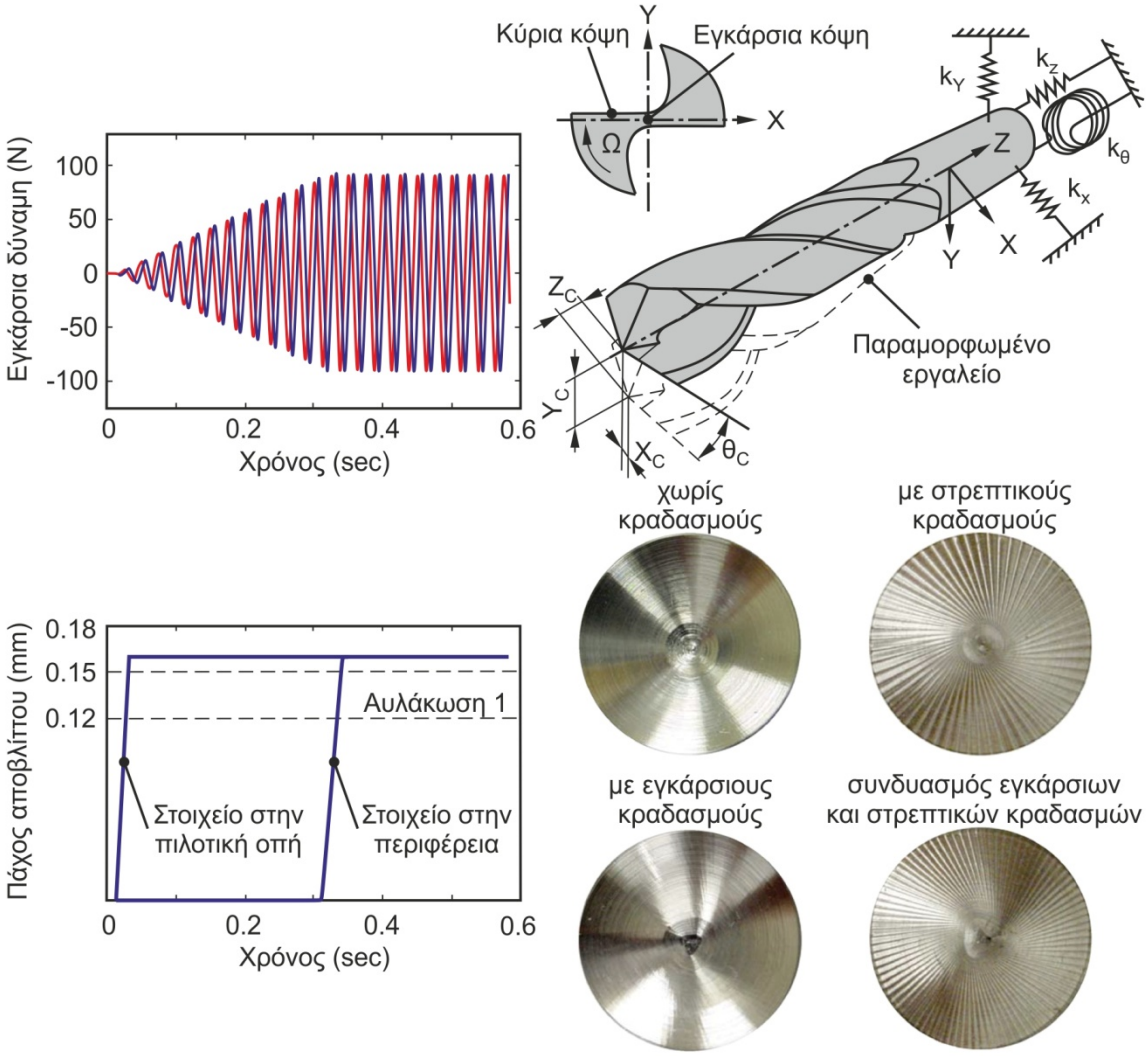
Σχήμα 2.7. Παράμετροι τροχών κοπής των αυλακώσεων τρυπανιών κατά Kang και Armarego



Σχήμα 2.8. Γεωμετρία εγκάρσιας τομής και τροχού τροχίσματος κατά Wenjiang et al.

Οι Puig et al. [49] και Tost et al. [50] αντιμετώπισαν το θέμα της προσομοίωσης των εργαλείων διάτρησης από μια διαφορετική σκοπιά. Μοντελοποίησαν τη διαδικασία κατασκευής του εργαλείου από μια μηχανή CNC 6 αξόνων. Η προσομοίωση βασίζεται σε 2D

γεωμετρίες οι οποίες στο τέλος χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί η τελική γεωμετρία. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή αυτή μπορεί κανείς να μελετήσει το τελικό 3D μοντέλο του εργαλείου και να προσομοιώσει βήμα-βήμα τη διαδικασία της δημιουργίας του. Αντίστοιχη προσομοίωση με σκοπό την κατασκευή του πολύπλοκης κορυφής εργαλείου σε εργαλειομηχανή CNC προτάθηκε και από τους Wang et al. [51].



Σχήμα 2.9. Δυναμικό μοντέλο διάτρησης κατά Roukema και Altintas

Μια σειρά από αναλύσεις που καταγράφηκαν, αφορούν τη προσομοίωση της δυναμικής κατάστασης στην οποία λειτουργούν τα τρυπάνια, κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Οι Rincon et al. [52] και οι Lee et al. [53] περιγράφουν αναλυτικά το φαινόμενο της ύπαρξης κραδασμών κατά τη διάτρηση και πως αυτοί επηρεάζουν τη δημιουργία της οπής. Υπολογίζεται αναλυτικά τόσο η δυναμική συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής, όσο και η γεωμετρική απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο το εργαλείο εισέρχεται μέσα στην οπή. Οι Yang et al. [54] πρότειναν ένα νέο μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων και ροπών κοπής, το οποίο πέρα από τη γεωμετρική ανάλυση περιλαμβάνει και την προσθήκη της δυναμικής συμπεριφοράς του εργαλείου και των κόψεων. Έτσι μπορεί να προβλεφθεί η δυναμική συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής και οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται στο τρυπάνι. Οι Arvajeh και Ismail [55, 56] ασχολήθηκαν με την ταλαντωτική συμπεριφορά του τρυπανιού, τόσο εξετάζοντας την εγκάρσια ταλάντωση που προκύπτει εξαιτίας της κάμψης (εξαρτώμενη από τη γεωμετρία της εγκάρσιας τομής του εργαλείου), όσο και από τις αξονικές στρεπτικές

ταλαντώσεις του, που οφείλονται στην επίδραση της ροπής πάνω του. Μια σημαντική δυσκολία που αντιμετωπίστηκε έχει να κάνει με τον, σε κάθε χρονική στιγμή, υπολογισμό των παραμέτρων κοπής, αφού οι κόψεις ταλαντώνονταν ταυτόχρονα σε κάμψη και στρέψη. Τα αποτελέσματα συνοδεύτηκαν από πειραματική επιβεβαίωση.Οι Roukema και Altintas [57, 58, 59] εξέτασαν τα αποτελέσματα των κραδασμών στα τρυπάνια τόσο με αναλύσεις χρόνου (time domain), όσο και αναλύσεις συχνότητας (frequency domain). Ασχολήθηκαν με την κινηματική του εργαλείου εμπεριέχοντας καμπτικές και στρεπτικές ταλαντώσεις και εξέτασαν την επίδραση που έχουν αυτές στις δυνάμεις κοπής και τη μορφή της οπής (σχήμα 2.9). Παράλληλα αποδείχθηκε ο σημαντικός ρόλος της ύπαρξης αρχικής οπής πιλότου κατά την κατεργασία, ενώ φάνηκε η σημασία που έχει το μέγεθος της.

Οι Gong et al. [60, 61] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να μελετήσουν τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την έναρξη της διάτρησης και που επηρεάζουν τόσο τις ανοχές της οπής, όσο και το σχήμα της. Το μοντέλο είναι δυναμικό και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των σφαλμάτων κατά το τρόχισμα του εργαλείου και τις παραμορφώσεις του, και υπολογίζει την δυναμική τιμή του πάχους του αποβλίττου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον δυναμικό υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Οι Gupta et al. [62, 63] ανέπτυξαν ένα μοντέλο που βασίζεται σε μια δοκό, που στηρίζεται μόνο στο ένα της άκρο και προσομοιώνει την τοποθέτηση του εργαλείου στην κεφαλή της εργαλειομηχανής (δράπανο). Με τον τρόπο αυτό ενσωματώνονται χαρακτηριστικά, όπως σφάλματα ευθυγράμμισης και ταλαντώσεων κατά τη διάτρηση, ενώ καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων δυνάμεων με ακρίβεια 6%. Επιπλέον, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα αποτελέσματα υπολογίζεται και το προφίλ των οπών και συσχετίζεται με τα σφάλματα ευθυγράμμισης.

Τέλος, εξαιτίας της μεγάλης μεταβλητότητας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που εμφανίζεται στην κατασκευή των τρυπανιών, αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μεθοδολογίες για την επιθεώρηση τους. Ο βασικός σκοπός τους είναι η άμεση και ακριβής καταγραφή των γεωμετρικών αυτών χαρακτηριστικών, κυρίως για λόγους ποιοτικού ελέγχου [64, 65, 66, 67].

2.2.2. Εμπειρικός τρόπος μελέτης της διάτρησης

Αποτελεί έναν πολύ συνηθισμένο τρόπο μελέτης των μηχανουργικών κατεργασιών, αφού με αυτόν δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν άμεσα τα αποτελέσματα των υπό εξέταση παραγόντων μιας κατεργασίας. Έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία της ως μεθοδολογία, αφού τα συμπεράσματα που εξάγονται, βασίζονται στην εκτέλεση κατάλληλων πειραμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων δύσκολα μπορούν να αμφισβητηθούν. Το βασικότερο μειονέκτημά της αποτελεί η ανάγκη διάθεσης σημαντικών πόρων για την χρήση της.

Ο Watson [68, 69, 70, 71] σε μια ανάλυση που βασίστηκε στη μηχανική της λοξής κοπής, εξέτασε ξεχωριστά τόσο τη γεωμετρία των κυρίων κόψεων, όσο και τη γεωμετρία της εγκάρσιας κόψης. Βασική θεώρηση της μελέτης ήταν η εκτέλεση υπολογισμών και πειραμάτων σε δοκίμια (K1045) με διαμορφωμένη οπή ίση με την ακτίνα που αντιστοιχεί στην εγκάρσια κόψη. Έτσι έχοντας ξεχωρίσει τη δράση των δύο διαφορετικών περιοχών κοπής (κύριες κόψεις και εγκάρσια κόψη), προχώρησε στη σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά, παρατηρώντας ότι μεγαλύτερη επιτυχία πρόβλεψης επιτυγχάνεται για την περιοχή των κυρίων κόψεων.

Οι Armarego και Cheng [72, 73] μελέτησαν την ύπαρξη γεωμετρικής ομοιότητας στα τρυπάνια που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Ξεκίνησαν από το γεγονός ότι κάθε χρήστης τρυπανιών, για να υπολογίσει τις δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται κατά τη διάτρηση, βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις της μορφής:

$$\text{Thrust Force}=C_1 f^{n1} D^{n2}$$

$Torque=C_2 f^{n3} D^{n4}$

όπου:

D: είναι η διάμετρος του εργαλείου.

f: είναι η πρόωση και

C_1, C_2, n_1, n_2, n_3, n_4: είναι παράμετροι που υπολογίζονται πειραματικά,

Προφανώς η γενικότητα τέτοιων εξισώσεων, δεν μπορεί να οδηγήσει σε τιμές που να ισχύουν για όλα τα διαθέσιμα τρυπάνια, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολυπληθείς σειρές πειραμάτων. Επιπλέον, απαιτείται να διενεργηθούν περισσότερα πειράματα για τρυπάνια διαφορετικών κατασκευαστών. Γίνεται επομένως ξεκάθαρο, ότι ο αριθμός των απαραίτητων πειραμάτων μεγαλώνει τόσο πολύ, που οδήγησε στην εισαγωγή της έννοιας της γεωμετρικής ομοιότητας στα τρυπάνια. Η έννοια αυτή καθοδηγεί και το σχεδιασμό των τρυπανιών, ώστε θεωρητικά, όταν υπάρχουν όμοια γεωμετρικά εργαλεία να απαιτούνται πειράματα μόνο στο ένα από αυτά.

Ο Agapiou [74, 75] αφού πρότεινε δύο νέα εργαλεία (ένα με τέσσερις αυλακώσεις και ένα με τρεις) προχώρησε στην κατασκευή και δοκιμή τους. Ασχολήθηκε με μια σειρά από θέματα που αφορούσαν την βελτιωμένη τους συμπεριφορά, σε σχέση με τα απλά τρυπάνια δύο αυλακώσεων, και αφορούν την ποιότητα των δημιουργούμενων οπών, τους κραδασμούς, τη φθορά των εργαλείων, τη δημιουργία αποβλίττων κ.λπ., ενώ τα συνέκρινε και μεταξύ τους. Το υλικό των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χυτοσίδηρος και χρησιμοποιώντας την ανάλυση παλινδρόμησης, προτάθηκαν εμπειρικές εξισώσεις δυνάμεων και ροπών της μορφής:

$F=K_1 H_B f^{a1} V^{b1} D^{c1}$ (N)

$M=K_2 H_B f^{a2} V^{b2} D^{c2}$ (Ncm)

όπου:

K_1 και K_2: γεωμετρικές σταθερές

H_B: σκληρότητα κατά Brinell

V: ταχύτητα κοπής

f: πρόωση

a_1, a_2, b_1, b_2, c_1 και c_2: παράμετροι πειραματικά καθοριζόμενες

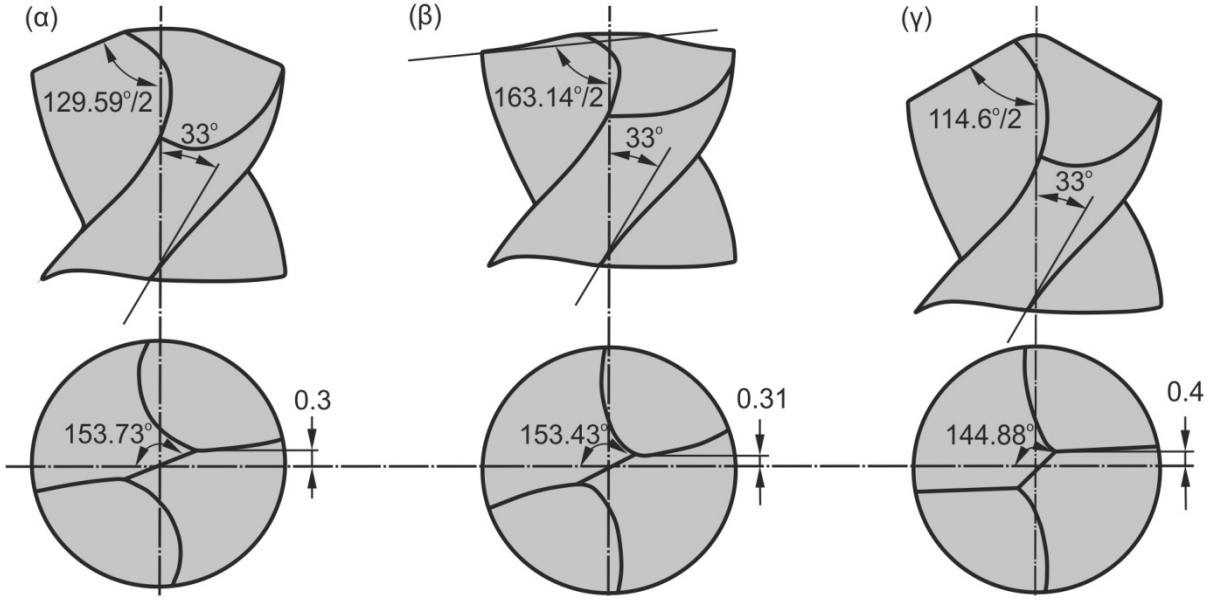
Οι Paul et al. [76] διερεύνησαν τη βελτιστοποίηση τριών διαφορετικών ειδών τρυπανιών (κωνικών, Racon και ελικοειδών) βασισμένη στην ανάλυση των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών κατά Tsai. Έτσι προκύψανε διαφορετικές βελτιστοποιημένες προτεινόμενες γεωμετρίες με βάση τρία διαφορετικά κριτήρια:

α) την ελάχιστη δύναμη κοπής,

β) την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή και

γ) ένα συμβιβασμό και των δύο.

Στο σχήμα 2.10 φαίνονται γραφικά τα αποτελέσματα αυτών των βελτιστοποιήσεων.



Σχήμα 2.10. Γεωμετρίες βελτιστοποιημένων κωνικών τρυπανιών με κριτήριο την ελάχιστη α) δύναμη και ροπή κοπής, β)ροπή κοπής και γ)δύναμη κοπής (κατά Paul et al.)

Οι Hamade και Ismail [77] διεξήγαγαν πειράματα, κατά τα οποία τα δοκίμια (Al 6061) είχαν διαμορφωμένες οπές 2.5, 3.5, 5.5 και 7.5mm, ενώ το χρησιμοποιούμενο εργαλείο (HSS) είχε διάμετρο ίση με 10mm. Η διάμετρος που αντιστοιχούσε στην εγκάρσια κόψη ήταν λίγο μικρότερη από τα 2.5mm και έτσι ήταν δυνατός ο διαχωρισμός της συμβολής της κάθε περιοχής της κύριας κόψης στη συνολική δύναμη και ροπή κοπής. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί συνδυασμοί ταχύτητας κοπής και πρόωσης, ενώ οι προτεινόμενες κατανομές των δυνάμεων (κάθετων - F_n και εφαπτόμενων - F_t) δίνονται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$\frac{F_n}{b}=a_1 f^{b1} V^{c1}(1-\sin(a))^{d1}$$

$$\frac{F_t}{b}=a_2 f^{b2} V^{c2}(1-\sin(a))^{d2}$$

όπου:

V: ταχύτητα κοπής

f: πρόωση

a: γωνία αποβλίτου

b: πλάτος του κοψίματος κατά μήκος της κύριας κόψης

a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1 και d_2: παράμετροι πειραματικά καθοριζόμενες (συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας)

Οι Armarego και Zhao [78] χρησιμοποιούν τρεις διαφορετικούς τύπους τρυπανιών, για τους οποίους προτείνουν εξισώσεις για τη συνολική δύναμη και ροπή κοπής βασισμένοι στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και τη χρήση δοκιμίων S1214. Επίσης επισημαίνουν την αναγκαιότητα για τέτοιου είδους αναλυτικές προσεγγίσεις.

Οι Armarego et al. [79] προχώρησαν στη αναλυτική γεωμετρική ανάλυση δύο ακόμα τρυπανιών, που διέφεραν μεταξύ τους κατά βάση, ως προς τη γεωμετρία της επιφάνειας

ελευθερίας τους. Η ανάλυση συνοδεύτηκε από την εκτέλεση σειράς πειραμάτων και τα δύο εργαλεία δοκιμάστηκαν με τρία διαφορετικά υλικά (Steel 1214, Steel 1020, Aluminium Alloy 65S-T6). Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν μια σειρά από εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των δυνάμεων και ροπών ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.

Οι Sahu et al. [80] και Degenhardt et al. [81] μελέτησαν την ύπαρξη αυλακώσεων στην επιφάνεια αποβλίττου του τρυπανιού, την θέση τους σε σχέση με την κόψη αλλά και την καλύτερη δυνατή γεωμετρία τους (βάθος, απόσταση από την κόψη κ.λπ.). Αποδείχθηκε ότι πέρα από τον καλύτερο έλεγχο του μεγέθους και την αποφυγή στομώματος των αποβλίττων, επιτυγχάνονται ταυτόχρονα χαμηλότερες συνολικές δυνάμεις και ροπές κοπής, αύξηση της ζωής του εργαλείου, μεγαλύτερο κρίσιμο βάθος κοπής κ.λπ.. Οι μελέτες συμπεριέλαβαν και διαφορετικές μορφές της εγκάρσιας γεωμετρίας αυλακώσεως του εργαλείου με αντίστοιχα θετικά αποτελέσματα.

Οι Rubenstein et al. [82, 83] προτείνανε απλές εξισώσεις για την εύρεση της δύναμης κοπής και της απαιτούμενης ροπής για τρυπάνια εντιθέμενων κόψεων. Αρχικά υπέθεσαν ότι η εγκάρσια κόψη είναι σχετικά μικρή, εάν συγκριθεί με τις κύριες κόψεις, ενώ υποθέτουν εργαλεία με σχετικά μεγάλη διάμετρο. Σε αυτά τα εργαλεία μετρήθηκαν η γωνία του αποβλίττου και οι λόγοι μήκους των αποβλίττων και μαζί με τον υπολογισμό των γωνιών αποβλίττου προέκυψαν οι προτεινόμενες εξισώσεις. Στη συνέχεια προτάθηκαν αντίστοιχοι τύποι μόνο για την εγκάρσια και δευτερεύουσα κόψη, ώστε να συμπληρωθούν οι συνολικά αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Αργότερα ο Rubenstein [84, 85] επέκτεινε την μελέτη αυτή και στα ελικοειδή εργαλεία. Εισήγαγε την έννοια του ισοδύναμου ελικοειδούς εργαλείου, με παρόμοιο τρόπο με αυτό των εντιθέμενων κόψεων και προχώρησε σε αντίστοιχους υπολογισμούς.

Οι Claudin et al. [86] ασχολήθηκαν με την ανεύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας του απαιτούμενου τρυπανιού, κατά την διάτρηση μεγάλων μεταλλικών συγκολλητών κατασκευών. Στις κατασκευές αυτές, μεγάλο κομμάτι των εργασιών και του κόστους που απαιτείται, έχει άμεση σχέση με τη διάτρηση. Έτσι προτάθηκαν τα κατάλληλα εύρη παραμέτρων των τρυπανιών, για κάθε φάση της διάτρησης, ενώ όλη η μελέτη συμπεριλάμβανε συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λιπαντικού (MQL-Minimum Quantity Lubrication).

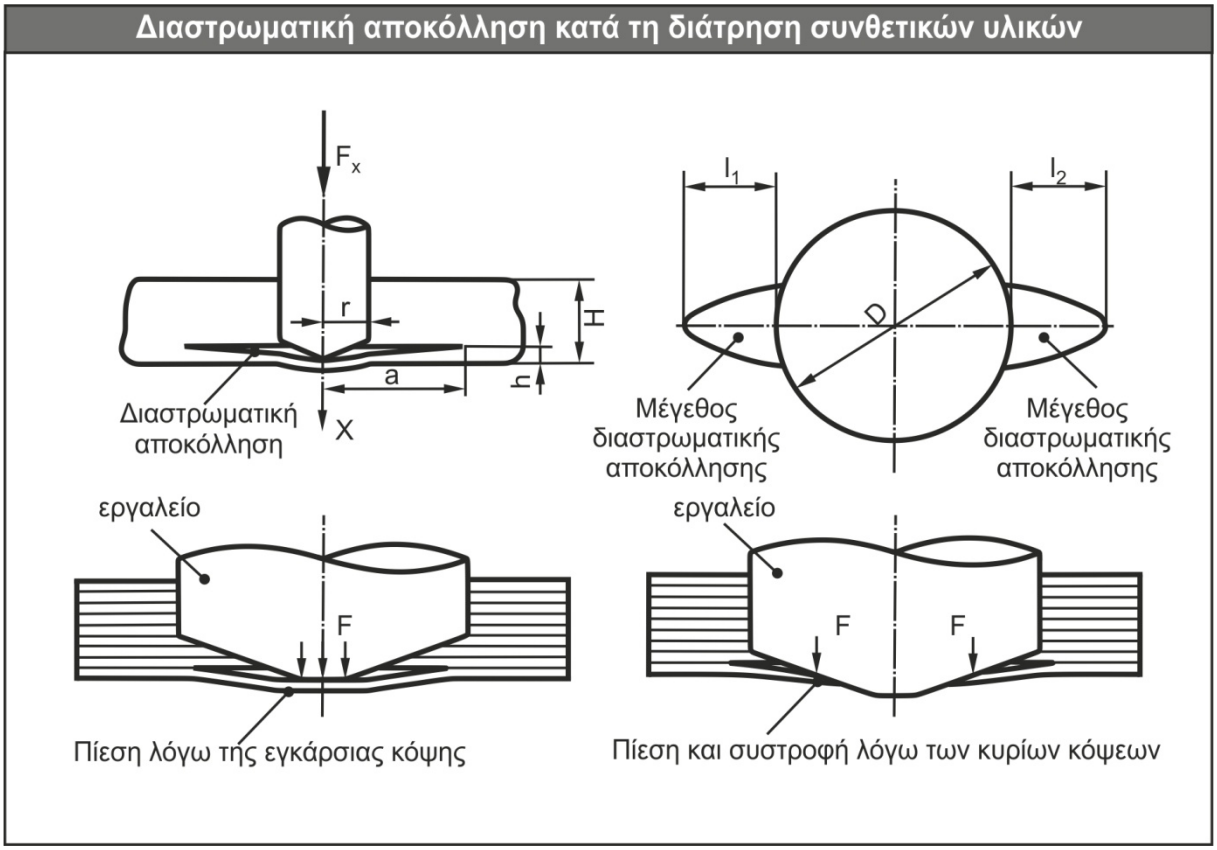
Ο Koehler [87] μέτρησε το φορτίο που αναπτύσσεται στο τρυπάνι κάτω από διαφορετικές συνθήκες διάτρησης υψηλών ταχυτήτων και ανέλυσε το ρόλο που παίζουν στις αναπτυσσόμενες τάσεις των κόψεων, οι παραλλαγές τόσο της γεωμετρίας της κόψης, όσο και της γεωμετρίας της εγκάρσιας τομής του εργαλείου. Προτείνονται αλλαγές στη γεωμετρία των κόψεων και καλύτερες γεωμετρικές συνθήκες μετάβασης από τις κύριες κόψεις προς την εγκάρσια. Έτσι επηρεάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι καταπονήσεις.

Οι DeVries και Crosheck [88] εξετάσανε μια σειρά από πέντε διαφορετικές γεωμετρίες κορυφής τρυπανιών, για να περιγράψουνε το μηχανισμό δημιουργίας αποβλίττου, τόσο για την περιοχή των κυρίων κόψεων, όσο και για την περιοχή του πυρήνα των εργαλείων. Δοκιμάστηκαν δύο υλικά δοκιμίων (AISI 1015 και AISI1045), ενώ τα χρησιμοποιούμενα τρυπάνια ήταν από HSS. Η αναπτυσσόμενη ροπή, η διαμήκης δύναμη της κοπής, η απαιτούμενη ισχύς και η μορφή των αποβλίττων χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να συγκριθούν τα διαφορετικά εργαλεία.

Οι Li et al. [89] εκτελέσανε μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας διαφορετική γεωμετρία και υλικά εργαλείων (HSS 44210 by Greenfield industries , WC-Co Twist by Kennametal, WC-Co Spiral by Kennametal), ταχύτητα κοπής, πρόωση και ποσότητα ψυκτικού υγρού σε

δοκίμια τιτανίου (Ti-6Al-4V). Τα μεγέθη που μελετήθηκαν πέρα από την απαιτούμενη ροπή και δύναμη της κοπής, ήταν η διάρκεια ζωής, η απαιτούμενη ενέργεια, και η ποιότητα των οπών. Αντίστοιχη μεθοδολογία ακολουθήθηκε και από τους Bakkal et al. [90, 91] με υλικό δοκιμίου BMG (bulk metallic glass).

Οι Miller et al. [92] μελετώντας πειραματικά τη διάτρηση τριβής διαφόρων δοκιμίων (χάλυβας, αλουμίνιο κ.λπ.), περιγράφουν τη διαδικασία και σχολιάζουν τις αλλαγές στη μικροδομή του υλικού των δοκιμίων, κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της οπής. Βασικό στοιχείο αποτελεί ο τρόπος απομάκρυνσης της παραγόμενης θερμότητας. Αδυναμία γρήγορης απομάκρυνσης της, οδηγεί στην μείωση της ζωής του εργαλείου αλλά και στη υποβάθμιση της ποιότητας των δημιουργούμενων οπών και των συνδέσεων μορφής για τις οποίες αυτές χρησιμοποιούνται.

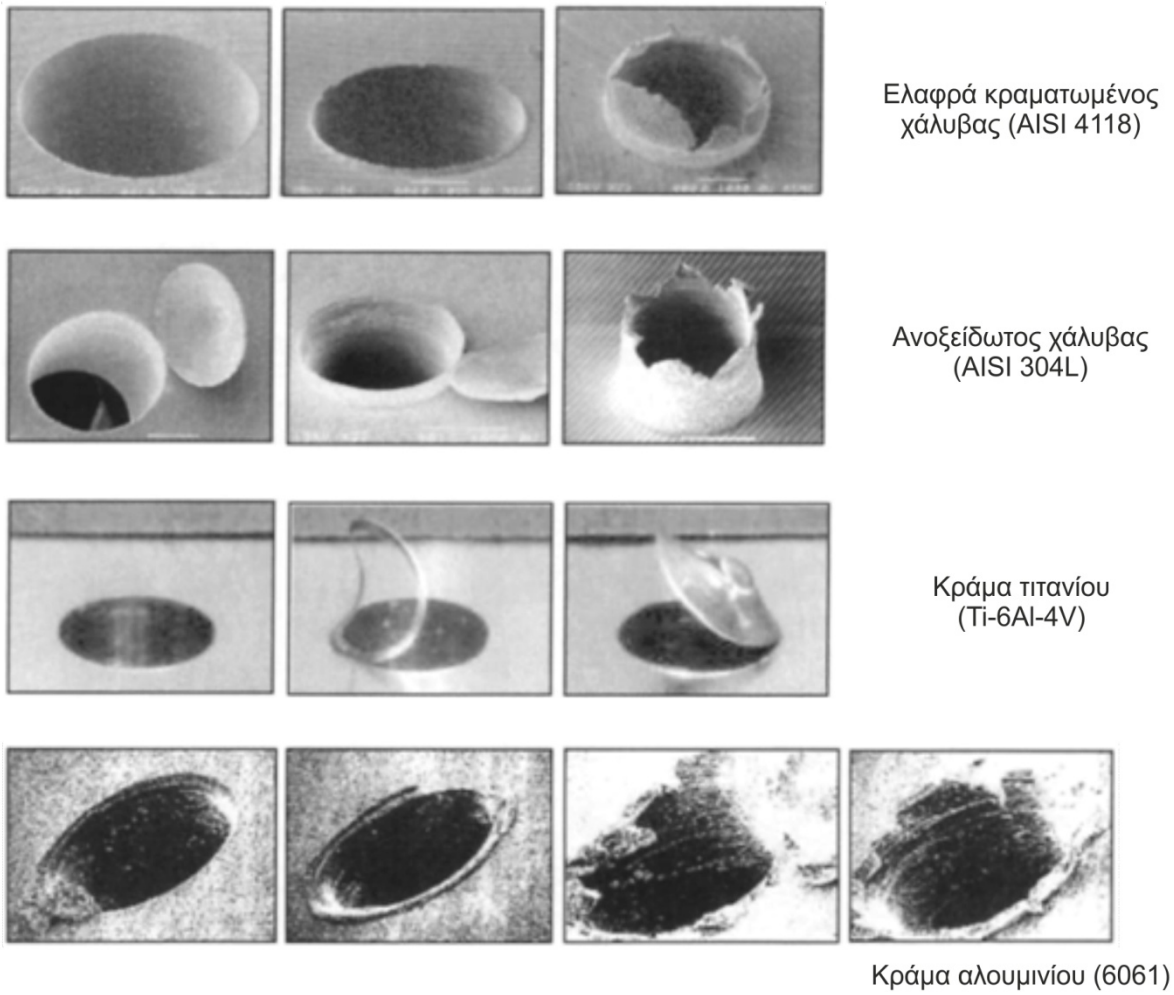


Σχήμα 2.11. Εμφάνιση διαστρωματικής αποκόλλησης κατά τη διάτρηση ενισχυμένων συνθετικών δοκιμίων

Ένα πεδίο που αρκετοί ερευνητές τα τελευταία χρόνια ερευνούν, είναι η επίδραση που έχει η γεωμετρία και το υλικό του εργαλείου, όταν τα δοκίμια είναι από ενισχυμένα συνθετικά πλαστικά. Τα τελικά συμπεράσματα δίνονται κάθε φορά για τα συγκεκριμένα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και αφορούν τόσο την αναπτυσσόμενη δύναμη κοπής, όσο και την διαστρωματική αποκόλληση (delamination) που λαμβάνει χώρα (σχήμα 2.11) [93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101].

Αντίστοιχες έρευνες έχουν εστιάσει και στην ποιότητα των οπών ή την ποιότητα της απόληξης κατεργασίας (burr). Το πρόβλημα της ποιότητας της απόληξης κατεργασίας των οπών, οφείλεται σε πλαστική παραμόρφωση του υλικού του δοκιμίου. Δημιουργείται τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδο της οπής (σχήμα 2.12). Μπορεί να δημιουργήσει πολλά προβλήματα ποιότητας και δυσκολίες κατά τη συναρμολόγηση. Συνήθως η εμφάνισή της

συνοδεύεται από αναγκαίες επιπλέον εργασίες για την απομάκρυνσή τους, με αποτέλεσμα σημαντική αύξηση του κόστους χειρισμού [102, 103, 104, 105].



Σχήμα 2.12. Χαρακτηριστικές απολήξεις κατεργασίας κατά τη διάτρηση διαφορετικών υλικών

Η έρευνα για τις επιδράσεις των τρυπανιών και των συνθηκών κοπής κατά τη διάτρηση συνθετικών υλικών (και όχι μόνο), οδήγησαν αρκετούς ερευνητές προς τη δημιουργία συστημάτων μέτρησης δυνάμεων και ροπών κατά την κατεργασία. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν στη συνέχεια, να ελέγχουν απ' ευθείας τις συνθήκες κοπής και να τις μεταβάλλουν, ώστε να βελτιστοποιούνται χαρακτηριστικά που αφορούν κυρίως τη διάρκεια ζωής των εργαλείων. Ο Jantunen [106] κάνει μια εκτενή αναφορά στη βιβλιογραφία, για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται, ενώ επισημαίνει την περιορισμένη χρήση τέτοιων μεθόδων στη διάτρηση, ώστε να μπορεί να είναι δυνατός ο έλεγχος της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το τρυπάνι. Ο Hong [107] παρουσιάζει ένα σύστημα βασισμένο στη γνώση, που είναι σε θέση να συνεχίζει να μαθαίνει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και να παρακολουθεί με ακρίβεια την κατάσταση του εργαλείου. Το κάθε εργαλείο παρακολουθείται στις συνθήκες κοπής του και όταν αυτό αντικαθίσταται από όμοιο νέο ή επανατροχισμένο το ιστορικό του εμπλουτίζεται. Αυτό παρουσιάζει μεγάλο πλεονέκτημα, καθώς ένα τέτοιο σύστημα από μόνο του, απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφοριών για να λειτουργήσει αποτελεσματικά και έτσι όταν μια επιχείρηση το χρησιμοποιεί και μαθαίνει την συμπεριφορά των εργαλείων της, πολύ γρήγορα η απόδοσή του συστήματος αυξάνεται. Ο Lin [108] προτείνει μια συνάρτηση που θα ρυθμίζει την πρόωση και την ταχύτητα κοπής με τέτοιο τρόπο, ώστε οι δυνάμεις που αναπτύσσονται να κρατούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ η διάρκεια

ζωής των εργαλείων. Οι αναλύσεις του έγιναν με επικαλυμμένα εργαλεία (TiN) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για δοκίμια από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι Oh et al. [109] με αντίστοιχο σκεπτικό, σχεδιάσανε ένα ελεγκτή PID (Proportional–Integral–Derivative), ο οποίος ελέγχει την ροπή που απαιτείται κατά την κατεργασία. Αποτέλεσμα ήταν το χρησιμοποιούμενο κέντρο κατεργασίας, να λειτουργεί με σημαντικά μειωμένους κραδασμούς και τα εργαλεία όχι μόνο να μην σπάνε, αλλά και να μεγαλώνει πολύ η διάρκεια ζωής τους. Όπως αναμενόταν οι τιμές ενίσχυσης του ελεγκτή αποτελεί σημείο κλειδί για την καλύτερη απόδοση του συστήματος. Οι Ertunc και Oysu [110] ακολούθησαν μια στρατηγική παρακολούθησης της διάτρησης μέσα από την απ' ευθείας μέτρηση τόσο της απαιτούμενης ροπής, όσο και της αναπτυσσόμενης δύναμης κοπής. Οι Byrne και O'Donnell [111] κάνουν διαχωρισμό μεταξύ παραδοσιακών και μοντέρνων τρόπων παρακολούθησης, ενώ αναπτύσσουν έναν καινούργιο αισθητήρα που χρησιμοποιεί δύο επιμέρους αισθητήρες δυνάμεων και αποτελούν μια ενιαία μονάδα έτοιμη για λειτουργία. Η προτεινόμενη μονάδα δοκιμάστηκε με επιτυχία σε αντίστοιχες δοκιμές. Οι Franco-Gasca et al. [112] προτείνανε τη χρήση ενός συστήματος παρακολούθησης της κοπής χωρίς χρήση άμεσου αισθητήρα. Η πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η κοπή, δίνονται από την επεξεργασία του σήματος της έντασης του ρεύματος που απορροφά ο ηλεκτροκινητήρας. Αποδεικνύουν ότι αυτό το σήμα σχετίζεται με την κατάσταση του εργαλείου και προτείνουν τη χρήση της μεθοδολογίας για όλων των ειδών τις εργαλειομηχανές. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη βοήθεια Η/Υ ή να ενσωματωθεί σε κύκλωμα, που μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε εργαλειομηχανή που απαιτείται. Οι Jun et al. [113] σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια νέα αισθητήρια μονάδα μέτρησης δυνάμεων τύπου δακτυλίου, ώστε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση κατεργασιών. Η νέα μονάδα περιγράφεται λεπτομερώς, ενώ περιλαμβάνεται ο τρόπος χρήσης της αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με άλλο δυναμόμετρο. Οι Routio και Saynatjoki [114] χρησιμοποιώντας ένα on-line σύστημα παρακολούθησης, μελέτησαν την διάτρηση ανοξείδωτου χάλυβα σε διαφορετικές συνθήκες κοπής, με αλλαγές ψυκτικού υγρού και για δύο διαφορετικά τρυπάνια (HSS με επικάλυψη TiN και χωρίς). Το σύστημα αποδείχτηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιείται για την σύγκριση και βαθμολόγηση της απόδοσης διαφορετικών ψυκτικών υγρών.

Οι Gao και Li [115, 116, 117] περιγράφουν την αρχή λειτουργίας ενός νέου δυναμόμετρου βασισμένο στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και προτείνουν τη χρήση του στην κατεργασία της διάτρησης. Το συγκεκριμένο δυναμόμετρο αναμένεται να αποτελέσει έναν ακριβή τρόπο μέτρησης των σχετιζόμενων δυνάμεων κοπής της διάτρησης, αφού πέρασε με επιτυχία τα αντίστοιχα πρότυπα CIRP-STCC.

Ο Karabay [118] χρησιμοποιεί ένα δυναμόμετρο που κατασκευάστηκε για μετρήσεις σε διάτρηση και σε συνδυασμό με προτεινόμενες από τον ίδιο εμπειρικές εξισώσεις, για την δύναμη κοπής και της απαιτούμενης ροπής, καταλήγει στον υπολογισμό των σταθερών συντελεστών τους για συνδυασμούς υλικών και συνθηκών κοπής. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται ικανοποιητικά με αντίστοιχες εμπειρικές εξισώσεις που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές.

Οι Pena et al. [119] χρησιμοποιούν μια μέθοδο παρακολούθησης της ροπής πάνω στην άτρακτο, ώστε να τη συσχετίσουν με τη δημιουργούμενη ποιότητα απόληξης της κατεργασίας. Αποδεικνύεται ότι το χρησιμοποιούμενο σήμα είναι το πιο ευαίσθητο για τέτοιου είδους πειράματα. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε επεξεργάζεται το σήμα και με επιτυχία πάνω από 90% υπολογίζει, εάν το μέγεθος της ποιότητας απόληξης της κατεργασίας είναι εντός προδιαγραφών ή όχι.

2.2.3. Αναλυτικός τρόπος μελέτης της διάτρησης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ)

Την τελευταία δεκαετία έχει αρχίσει να γίνεται περισσότερο εφικτή η χρήση λογισμικών που μπορούν να προσομοιώσουν κατεργασίες υλικών περιλαμβάνοντας φαινόμενα, όπως δημιουργία αποβλίττου, παραμορφώσεις στην είσοδο και την έξοδο της διαδικασίας κοπής πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, φθορά κοπτικών εργαλείων κ.λπ.. Η χρήση αυτή αρχίζει και γίνεται δυνατή, ενώ οι παραδοσιακοί τρόποι υπολογισμού των δυνάμεων και της γεωμετρίας που εμπλέκονται στις μηχανουργικές κατεργασίες, περιλαμβάνουν πολύπλοκους υπολογισμούς (γεωμετρίας, συνθηκών κ.λπ.) και υποθέσεις που διαφέρουν σημαντικά ανά περίπτωση. Στην περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, παρά το γεγονός ότι απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς, βασίζεται σε συγκεκριμένες αρχές που εφαρμόζονται σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξάρτητα εάν η γεωμετρία ή η κινηματική αλλάζει.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται από την ακαδημαϊκή και τη βιομηχανική κοινότητα, αλλά προσομοιώνουν συγκριμένες μόνο μηχανουργικές κατεργασίες είναι τα DEFORM™ από την Scientific Forming Technologies Corporation και AdvantEdge™ από την Third Wave Systems. Υπάρχουν και πολλά άλλα που χρησιμοποιούνται για γενικότερες εφαρμογές- μεταξύ των οποίων και για μηχανουργικές κατεργασίες- χωρίς να είναι προσαρμοσμένα να χρησιμοποιούνται ειδικά για αυτό το σκοπό - όπως το ABAQUS FEA™ από την Simula Dassault Systemes κ.λπ.. Τα δύο πρώτα εμφανίζουν μεγάλη φιλικότητα ως προς την δημιουργία προσομοιώσεων μηχανουργικών κατεργασιών. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις γεωμετρικές παραμέτρους, τις κινηματικές ρυθμίσεις και άλλες επιπλέον πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες κοπής (τριβή, μοντέλα φθοράς του εργαλείου, επικαλύψεις κ.λπ.). Εάν ο χρήστης έχει τη γεωμετρία του εργαλείου μοντελοποιημένη σε άλλο λογισμικό, μπορεί να την εισάγει στα προαναφερόμενα λογισμικά μέσω του φορμά .stl. Μεγάλη βοήθεια αποτελεί η ύπαρξη ενσωματωμένων βιβλιοθηκών, για μια σειρά από υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται να δαπανηθεί χρόνος για την εξεύρεση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Η διακριτοποίηση στο μεν DEFORM™ δίνει τη δυνατότητα για κάποιες βασικές παρεμβάσεις από το χρήστη (συγκέντρωση πεπερασμένων στοιχείων σε συγκεκριμένες περιοχές, καθορισμός συνολικού αριθμού στοιχείων κ.λπ.), ενώ στο AdvantagEdge™ δεν είναι δυνατή κάποια παρέμβαση. Από την άλλη, λογισμικά όπως το ABAQUS FEA™ χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές με αποτέλεσμα να απαιτείται η προσαρμογή τους, για να προσομοιώσουν μηχανουργικές κατεργασίες. Οι γεωμετρίες πρέπει να εισαχθούν ή να σχεδιαστούν από το χρήστη, ενώ και η διαδικασία διακριτοποίησης μπορεί να προσαρμοστεί σε κάποιο βαθμό με βάση τις ανάγκες του χρήστη. Έχει την δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε υλικού, αλλά θα πρέπει αυτό να δημιουργηθεί από την αρχή με την εισαγωγή των αντίστοιχων παραμέτρων. Επίσης, επιτρέπεται σε μεγάλο βαθμό να ελεγχθεί η ροή της προσομοίωσης και ο τρόπος λειτουργίας του επιλυτή. Στο σχήμα 2.13 αναφέρονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των λογισμικών που αναφέρθηκαν [120].

Οι Selvam και Suiatha [121] χρησιμοποίησαν σειρές από 41 σημεία κάθε φορά, με στόχο να περιγράψουν τη γεωμετρία του εργαλείου και να αξιοποιήσουν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ ο τρόπος υπολογισμού των δίνεται αναλυτικά (σχήμα 2.14). Διεξήγαγαν σειρά πειραμάτων με διαφορετικές παραμέτρους κοπής και γεωμετρίας του εργαλείου και τελικά πρότειναν βέλτιστες τιμές γεωμετρίας (γωνία ελίκωσης, γωνία εγκάρσιας κόψης, γωνία κορυφής). Η κύρια έμφαση σε αυτή τη μελέτη ήταν η γεωμετρία της κορυφής του εργαλείου. Αντίστοιχο σκεπτικό ακολούθησαν και οι Hinds και Treanor [122] χρησιμοποιώντας με τη σειρά τους 11 σημεία, για να περιγράψουν την κορυφή του εργαλείου. Οι εξισώσεις από τις οποίες προκύπτουν οι συντεταγμένες αυτές στο χώρο

δίνονται αναλυτικά και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με το λογισμικό ABAQUS FEA™ επαληθεύονται από πειράματα.

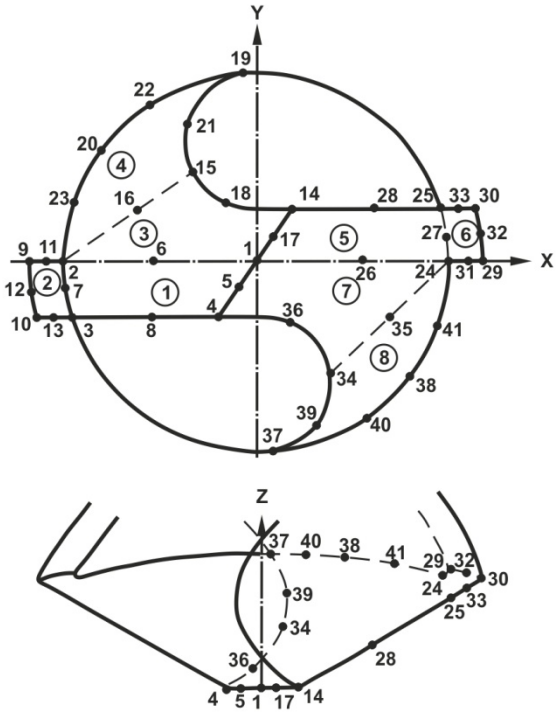
	Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων		
	DEFORM™	**ADVANTEDGE™**	**ABAQUS FEA™**
Ευκολία χρήσης και προετοιμασίας μιας προσομοίωσης	Ενσωματωμένοι οδηγοί για βασικές κατεργασίες. Υπάρχει βιβλιοθήκη εργαλείων και δυνατότητα εισαγωγής επιπλέον γεωμετριών.	Εύκολη ανάπτυξη μιας προσομοίωσης. Υπάρχει βιβλιοθήκη εργαλείων.	Απαιτείται σχεδιασμός κοπτικού και αρχικού τεμαχίου. Κάθε διαδικασία πρέπει να καθοριστεί από την αρχή με κάθε λεπτομέρεια (διακριτοποίηση, οριακές συνθήκες κ.λπ.)
Μοντελοποίηση υλικών	Υπάρχει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών.	Υπάρχει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών.	Δεν υπάρχει έτοιμο υλικό. Δυνατότητα ορισμού τους με μεγάλη λεπτομέρεια.
Προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση	Χρησιμοποιείται προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση, με μερικό έλεγχο από το χρήστη.	Χρησιμοποιείται προσαρμόσιμη πλεγματοποίηση, χωρίς να μπορεί ο χρήστης να επέμβει.	Χωρίς ιδιαίτερο έλεγχο της προσαρμόσιμης πλεγματοποίησης.
Συνολικός έλεγχος της προσομοίωσης	Υπάρχει κάποιος βαθμός ελέγχου.	Πολύ λίγες αλλαγές επιτρέπονται.	Μεγάλος βαθμός ελέγχου όλων των παραμέτρων και του τρόπου λειτουργίας του επιλυτή.

Σχήμα 2.13. Χαρακτηριστικά λογισμικών για προσομοίωση μηχανουργικών κατεργασιών

Οι Guo και Dornfeld [123, 124, 125] χρησιμοποίησαν το λογισμικό ABAQUS FEA™ με σκοπό να προσομοιώσουν τη διάτρηση ενός τεμαχίου από SS304 με εργαλείο διαμέτρου 15mm και σταθερές συνθήκες κοπής. Κατά την προσομοίωση εξετάστηκαν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, οι αντίστοιχες ροπές, καθώς και η ποιότητα απόληξης της κατεργασίας στις οπές (σχήμα 2.15). Χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο με αρχικά διαμορφωμένη οπή, ενώ το εργαλείο προσομοιώθηκε μόνο μερικώς. Αντίστοιχη ερευνητική εργασία έχει διενεργηθεί και από τους Min et al. [126].

Οι Choi et al. [127] προσομοίωσαν στο λογισμικό ABAQUS FEA™ δύο πλάκες 1.5mm η κάθε μία, από υλικό SS304L, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με συντελεστή τριβής 0.3 και στηριγμένες σε 4 σημεία κοντά στις γωνίες. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαμέτρου 6mm και οι συνθήκες κοπής 0.7mm/sec και 1000rpm (σχήμα 2.16). Ο στόχος της έρευνας ήταν πέρα από τον υπολογισμό των δυνάμεων και ροπών της κοπής, να μελετηθεί η ποιότητα της απόληξης της κατεργασίας των οπών.

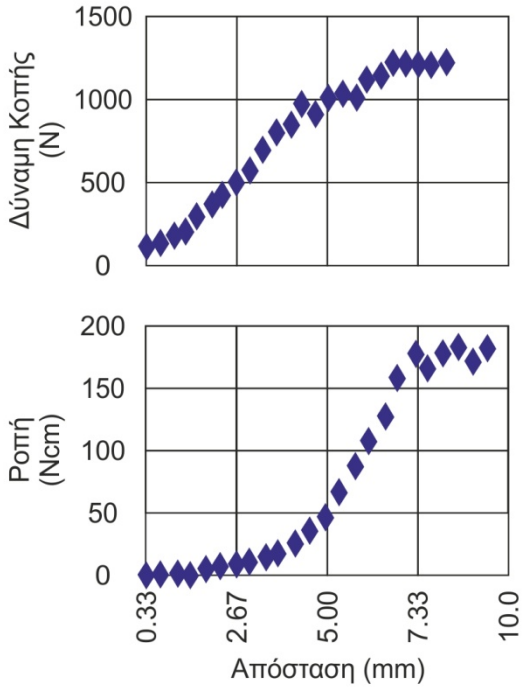
Μοντελοποίηση διάτρησης με τη ΜΠΣ κατά Selvam και Suiatha

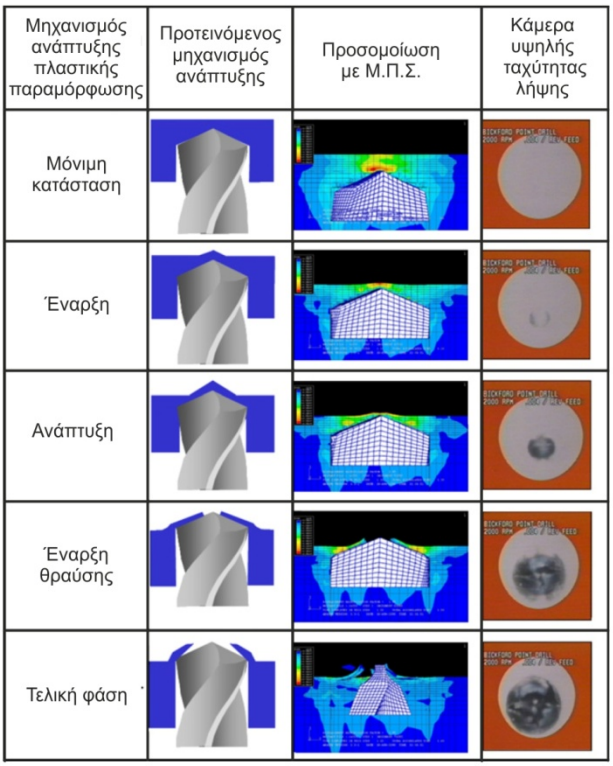


	X	Y	Z
1	0	0	0
2	$-0.5D_1$	0	$-0.5\frac{D_1}{tan\varphi}$
3	$-0.5\sqrt{D_1^2-d^2}$	$-0.5d$	$0.5\frac{(D_1-\frac{d}{tan\psi})}{tan\varphi}$
4	$-0{,}5\frac{d}{tan\psi}$	$-0.5d$	0
5	$0.5(X_1+X_4)$	$0.5(Y_1+Y_4)$	0
6	$0.5(X_1+X_2)$	0	$0.5(Z_1+Z_2)$
7	$0.5(X_2+X_3)$	$0.5(Y_2+Y_3)$	$0.5(Z_2+Z_3)$
8	$0.5(X_3+X_4)$	$0.5(Y_3+Y_4)$	$0.5(Z_3+Z_4)$
9	$-0.5D$	0	$0.5\frac{D}{tan\varphi}$
10	$-0.5\sqrt{D^2-d^2}$	$-0.5d$	$0.5\frac{(D-d/tan\psi)}{tan\varphi}$
…	…	…	…

Σχήμα 2.14. Ορισμός της κορυφής του τρυπανιού κατά Selvam και Suiatha

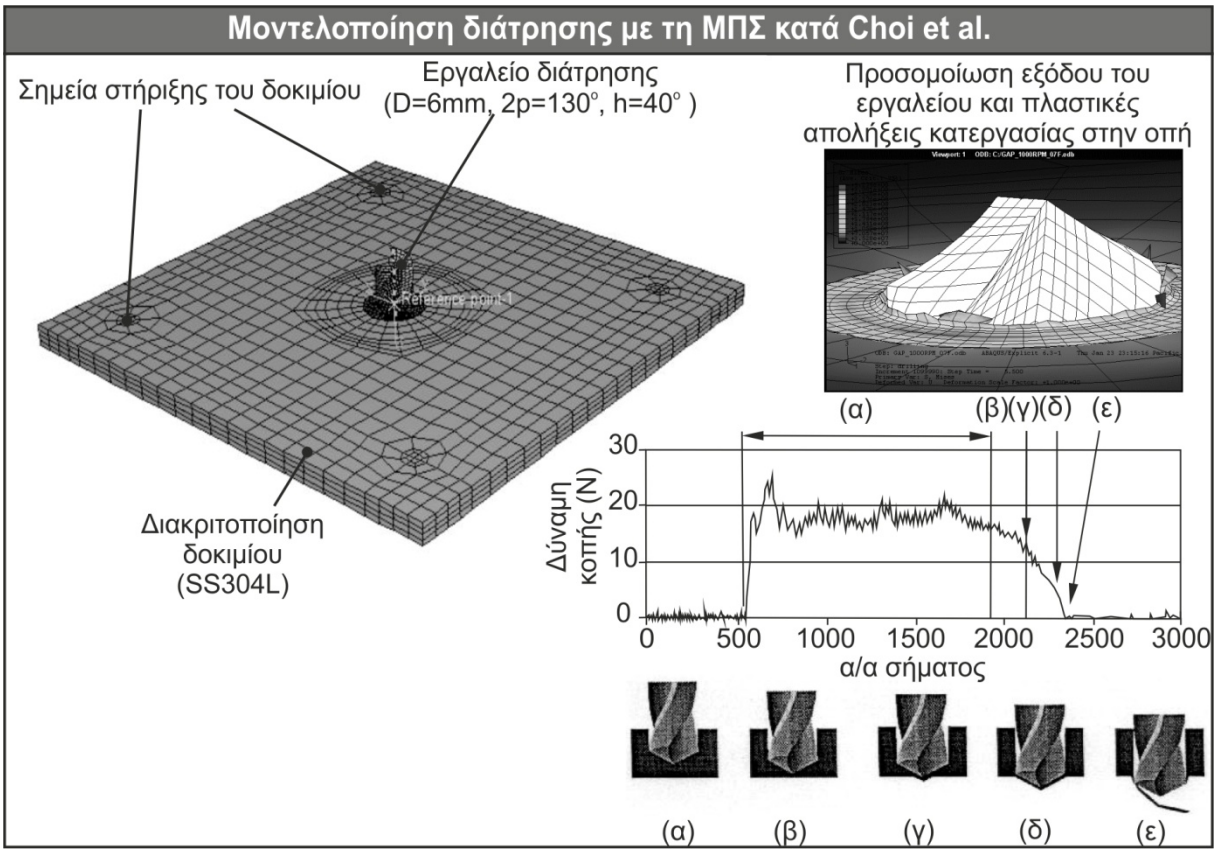
Μοντελοποίηση διάτρησης με τη ΜΠΣ κατά Guo και Dornfeld





Σχήμα 2.15. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Guo και Dornfeld

Ο Chen [128] προσομοίωσε τρυπάνια με καμπύλη κύρια κόψη και δοκίμασε αρκετές παραλλαγές που οφείλονταν στη διαφορετική εγκάρσια γεωμετρία του κορμού του τρυπανιού. Με τις διαφορετικές αυτές γεωμετρίες δεν άλλαζε μόνο η γεωμετρία των κυρίων κόψεων, αλλά ταυτόχρονα και η μορφή των αντίστοιχων επιφανειών ελευθερίας των εργαλείων. Η τελευταία αλλαγή δημιουργούσε σημαντικές διαφοροποιήσεις στη στιβαρότητα του εργαλείου. Έτσι δημιουργήθηκαν μια σειρά από εργαλεία, τα οποία μελετήθηκαν ως προς τη δύναμη και ροπή της κοπής που αναπτύσσουν, αλλά και ως προς την διάρκεια ζωής που αναμένονταν να έχουν.

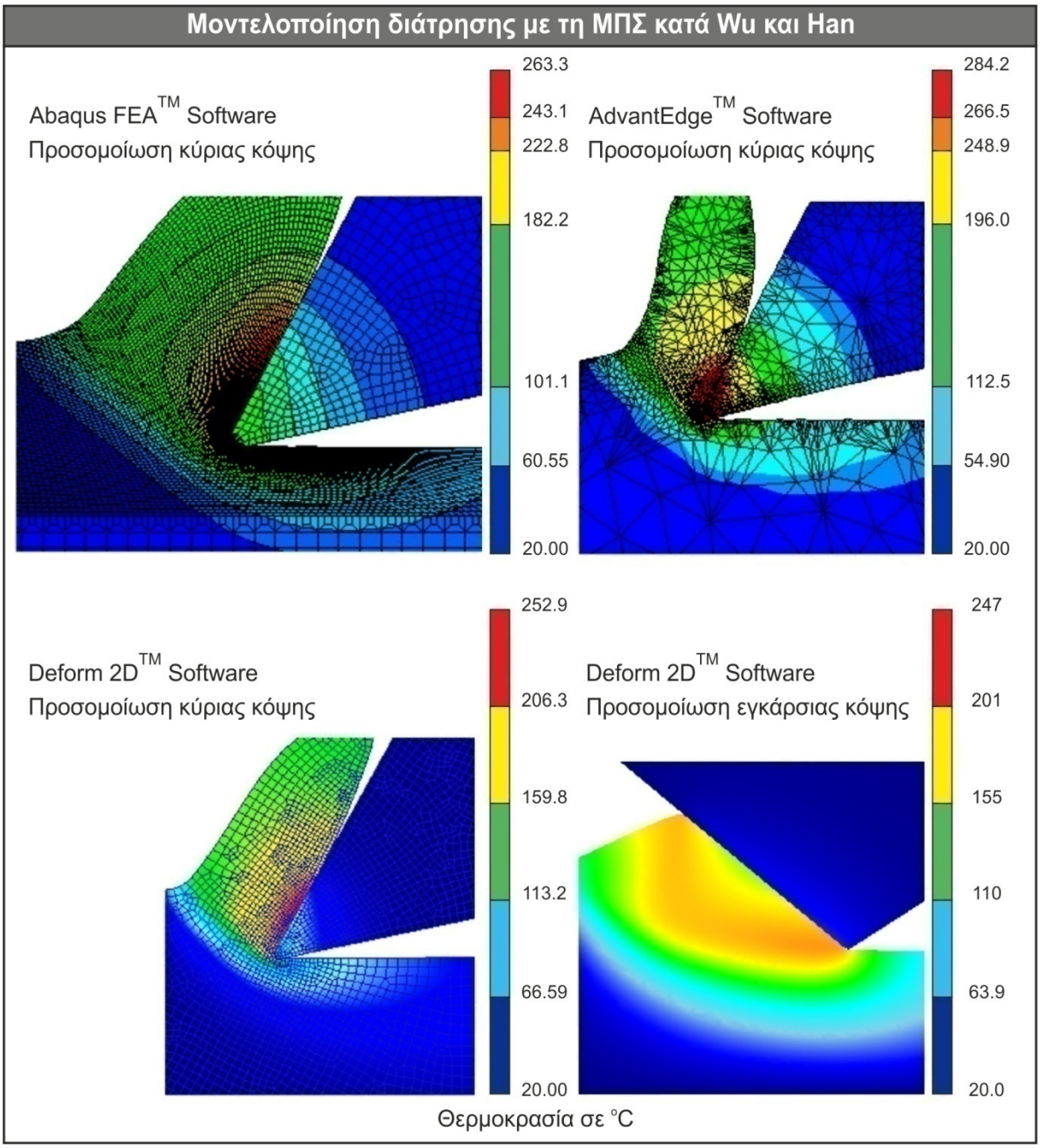


Σχήμα 2.16. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Choi et al.

Οι Strenkowski et al. [129] παρουσίασαν ένα μοντέλο υπολογισμού της ροπής και της δύναμης κοπής σε απλά ελικοειδή τρυπάνια, βασισμένοι στο διαμελισμό των κόψεων σε μικρότερα επιμέρους κομμάτια (πέντε για τις κύριες κόψεις και τέσσερα για την εγκάρσια). Αυτά υπολογίστηκαν με 2D υπολογισμούς, το καθένα ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία της λοξής κοπής. Έτσι ο χρόνος που απαιτήθηκε για τους υπολογισμούς αυτούς ήταν σημαντικά μικρότερος από το να χρησιμοποιούνταν άμεσα 3D υπολογισμοί. Τελικά όλες οι επιμέρους δυνάμεις που υπολογίστηκαν, αθροίστηκαν για να αποτελέσουν τις συνολικές δυνάμεις κοπής. Το υλικό των τεμαχίων ήταν AISI1020, ενώ εξετάστηκαν μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες κοπής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν επιτυχώς με αντίστοιχα πειραματικά.

Μία αντίστοιχη μεθοδολογία προτάθηκε από τους Wu και Han [130] οι οποίοι βασισμένοι σε σειρά ισοδύναμων 2D προσομοιώσεων με τη χρήση τριών διαφορετικών λογισμικών (ABAQUS FEA™, Deform2D™, AdvantEdge™) μοντελοποίησαν την διάτρηση. Ο στόχος τους ήταν να υπολογίσουν τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή και δοκιμάστηκαν για αυτό το λόγο διαφορετικές συνθήκες κοπής και σειρά υλικών τεμαχίων

(σχήμα 2.17). Τα αποτελέσματα βρέθηκαν να αποκλίνουν λιγότερο από 15% σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά.



Σχήμα 2.17. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Wu και Han

Οι Zitoune και Colombet [131] μελετήσανε το φαινόμενο της διαστρωματικής αποκόλλησης κατά την έξοδο του τρυπανιού από το τεμάχιο, κατά τη διάτρηση συνθετικών υλικών. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που εξετάζονται, αφορούν τη γεωμετρία της κορυφής του. Τόσο στις προσομοιώσεις, όσο και στα πειράματα που έλαβαν χώρα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά υλικά της Hexcel, ενώ τα αποτελέσματα συσχετίζονται μεταξύ τους. Για την επίλυση των μοντέλων με τη ΜΠΣ χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας SAMCEF™.

Οι Singh et al. [132] χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Μελέτησαν μια σειρά

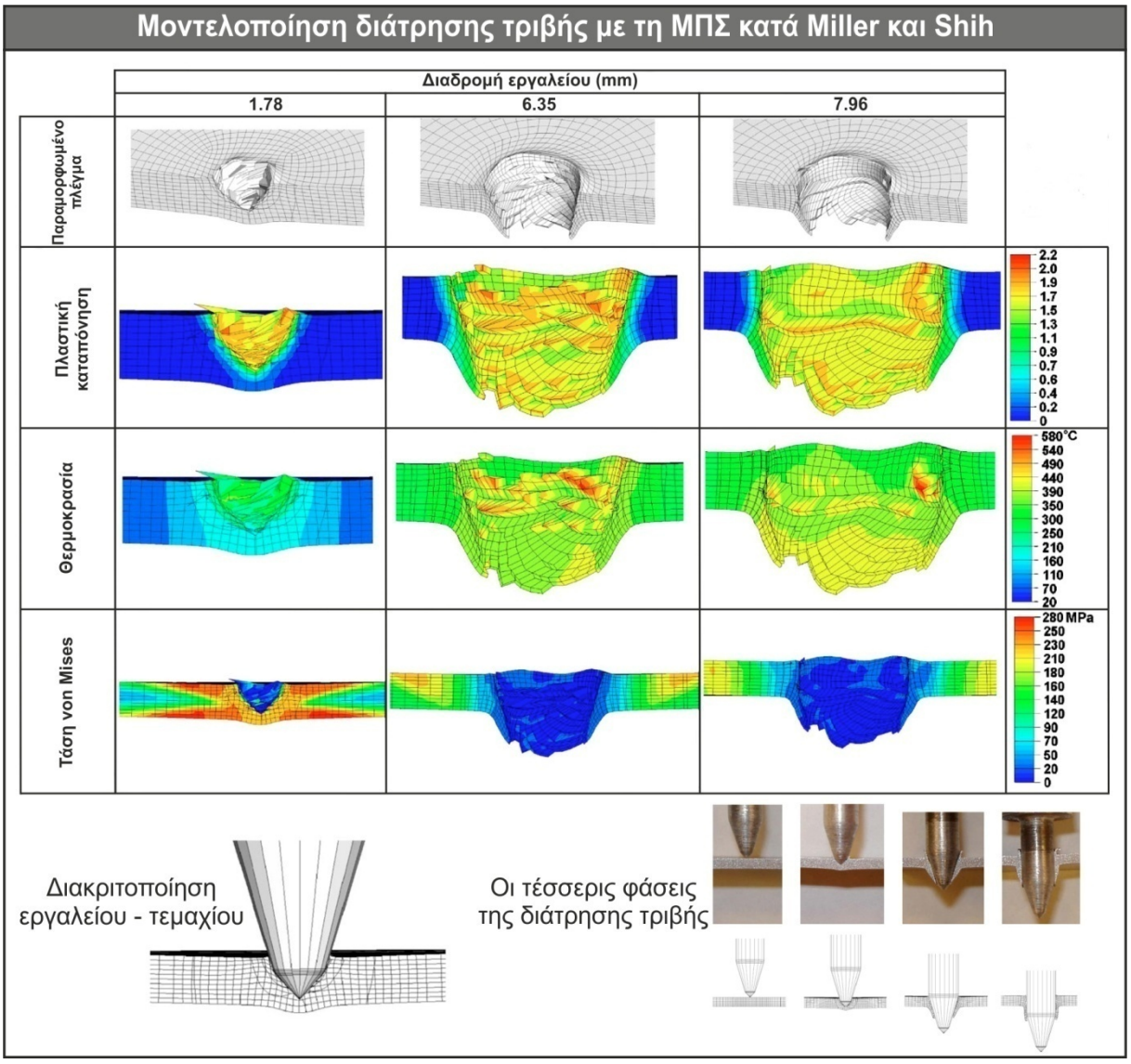
από ενισχυμένα πλαστικά συνθετικά υλικά χρησιμοποιώντας τρυπάνια με τρεις διαφορετικές γωνίες κορυφής. Οι συνθήκες κοπής περιελάμβαναν τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής και επίσης τρεις προώσεις. Εκτελέστηκαν τα είκοσι επτά ($=3^3$) πειράματα και υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της ανάλυσης παλινδρόμησης, εξισώσεις υπολογισμού της απαιτούμενης ροπής και της δύναμης κοπής. Τα αντίστοιχα πειράματα που προσομοιώθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έδειξαν μεγάλο βαθμό συσχέτισης με τα αποτελέσματα των εξισώσεων που υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα.

Οι Miller και Shih [133] μελετήσανε τη διάτρηση με τριβή (friction drilling process), κατά την οποία ένα κωνικής μορφής εργαλείο περιστρέφεται και δημιουργεί μια οπή χωρίς τη δημιουργία αποβλίττου (σχήμα 2.18). Χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια Al 6061-T6 και εργαλείο από σκληρυμένο A2 χάλυβα. Τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα ως προς την απαιτούμενη δύναμη κοπής και ροπή, αλλά και ως προς την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κατά τη διάτρηση, ενώ η ακρίβειά τους κρίθηκε ικανοποιητική. Αντίστοιχη μελέτη παρουσίασαν οι Miller et al. [134] για AISI1020, όπου ένα μοντέλο υπολογίζει με πεπερασμένα στοιχεία την κατανομή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται και ένα δεύτερο χρησιμοποιεί αυτά τα αποτελέσματα μαζί με τις ιδιότητες των υλικών και την εκτιμώμενη επιφάνεια επαφής, ώστε να υπολογίσει την δύναμη της κοπής και την απαιτούμενη ροπή.

Οι Li και Shih [135, 136] αναλύσανε τη διάτρηση τεμαχίων τιτανίου με τρυπάνια Kennametal grade K715 (σχήμα 2.19). Οι κύριες κόψεις και η εγκάρσια κόψη μελετηθήκαν ως μια σειρά από στοιχειώδη εργαλεία, στα οποία ισχύουν οι αρχές της λοξής κοπής. Η γεωμετρία της εγκάρσιας κόψης είναι σιγμοειδής, ενώ κατά την ανάλυση υπολογίζονται η δύναμη της κοπής και η απαιτούμενη ροπή της κοπής αλλά και η θερμοκρασιακή κατανομή πάνω στο εργαλείο. Η θερμοκρασία πειραματικά μετρήθηκε με την τοποθέτηση θερμοστοιχείων στην επιφάνεια ελευθερίας του εργαλείου. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί της μετάδοσης θερμότητας γίνονται με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ κατά τη μελέτη λήφθηκαν υπόψη διαφορετικές ταχύτητες κοπής και προώσεις.

Οι Kolidas et al. [137, 138] αναπτύξανε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να υπολογίσουν τη ροή θερμότητας που αναπτύσσεται κατά την κατεργασία της διάτρησης μέσα στο εργαλείο. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ροές τόσο στις κόψεις (κύριες και εγκάρσια) όσο και στο σώμα του εργαλείου. Οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν περιπτώσεις ξηρής και υγρής κοπής όσο και εργαλεία με επικαλύψεις ή χωρίς. Οι υπολογισμοί προέβλεψαν τις θερμοκρασίες με διαφορά έως 20% από τις μετρούμενες. Οι μετρούμενες αυτές ροές θερμότητας έχουν ως αποτέλεσμα προβλήματα ποιότητας των οπών που ανοίγονται. Το μοντέλο καταφέρνει να επιτύχει προβλέψεις για τα προφίλ των οπών με σφάλματα μικρότερα του 10%.

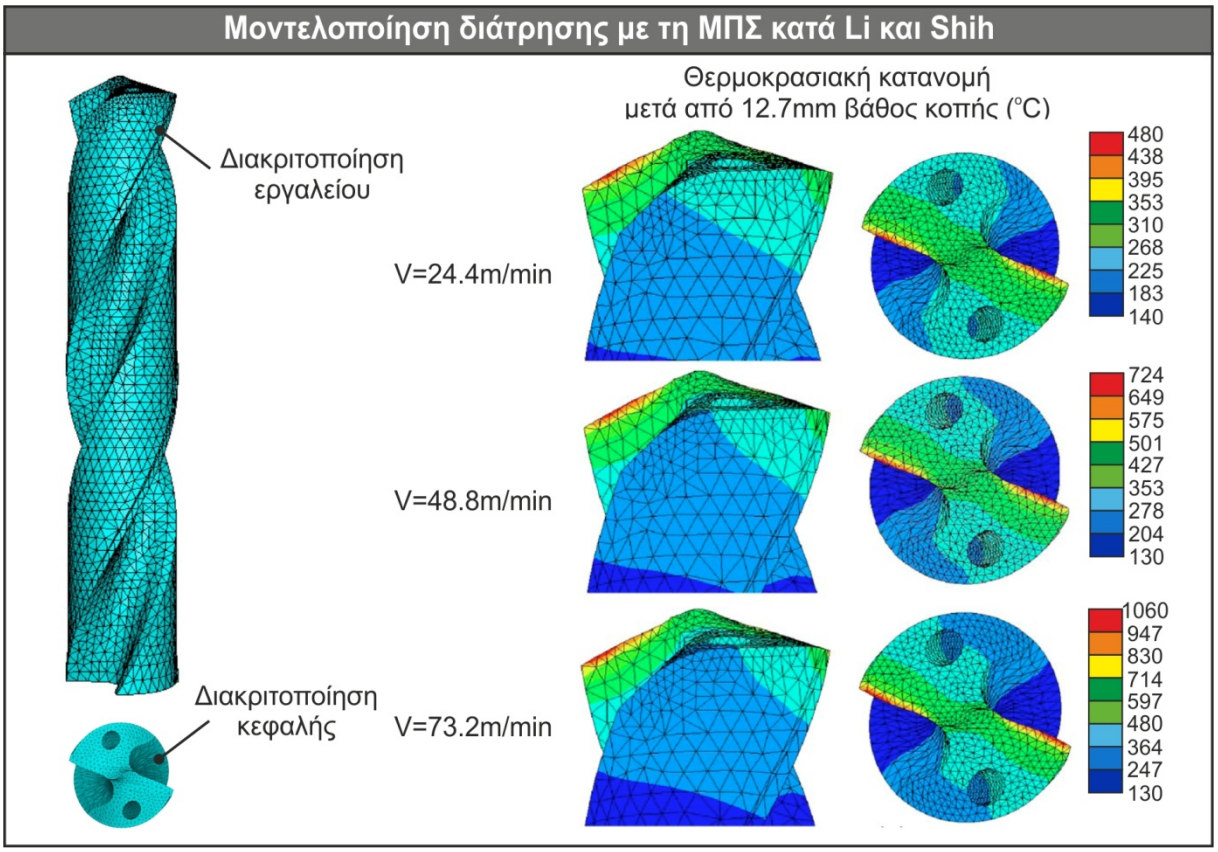
Οι Ozcelik και Bagci [139, 140] χρησιμοποίησαν διαφορετικές ταχύτητες κοπής και προώσεις για να μελετήσουν την θερμοκρασία που αναπτύσεται στο τρυπάνι κατά τη διάτρηση, Χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια AISI1040 & Al 7075-T651 και εργαλεία με επικάλυψη TiAlN και εσωτερικές οπές για την κυκλοφορία ψυκτικού υγρού. Με την βοήθεια αυτών των διόδων μέσα από τον κορμό των εργαλείων μετρήθηκε η θερμοκρασία των τρυπανιών και στη συνέχεια προσομοιώθηκε με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό AdvantEdge™. Επιπλέον για την αποφυγή μεγάλου αριθμού πειραμάτων έγινε χρήση του πίνακα L_9 της θεωρίας Taguchi. Τα προσομοιωμένα και τα πραγματικά πειράματα βρέθηκαν σε αρκετά καλή συμφωνία. Με το ίδιο λογισμικό οι Han και Wu [141] προσομοίωσαν με επιτυχία τη δημιουργία αποβλίττου, την ανάπτυξη των δυνάμεων και τη θερμοκρασιακή κατανομή σε δοκίμια AISI1045 και Ti6Al4V.



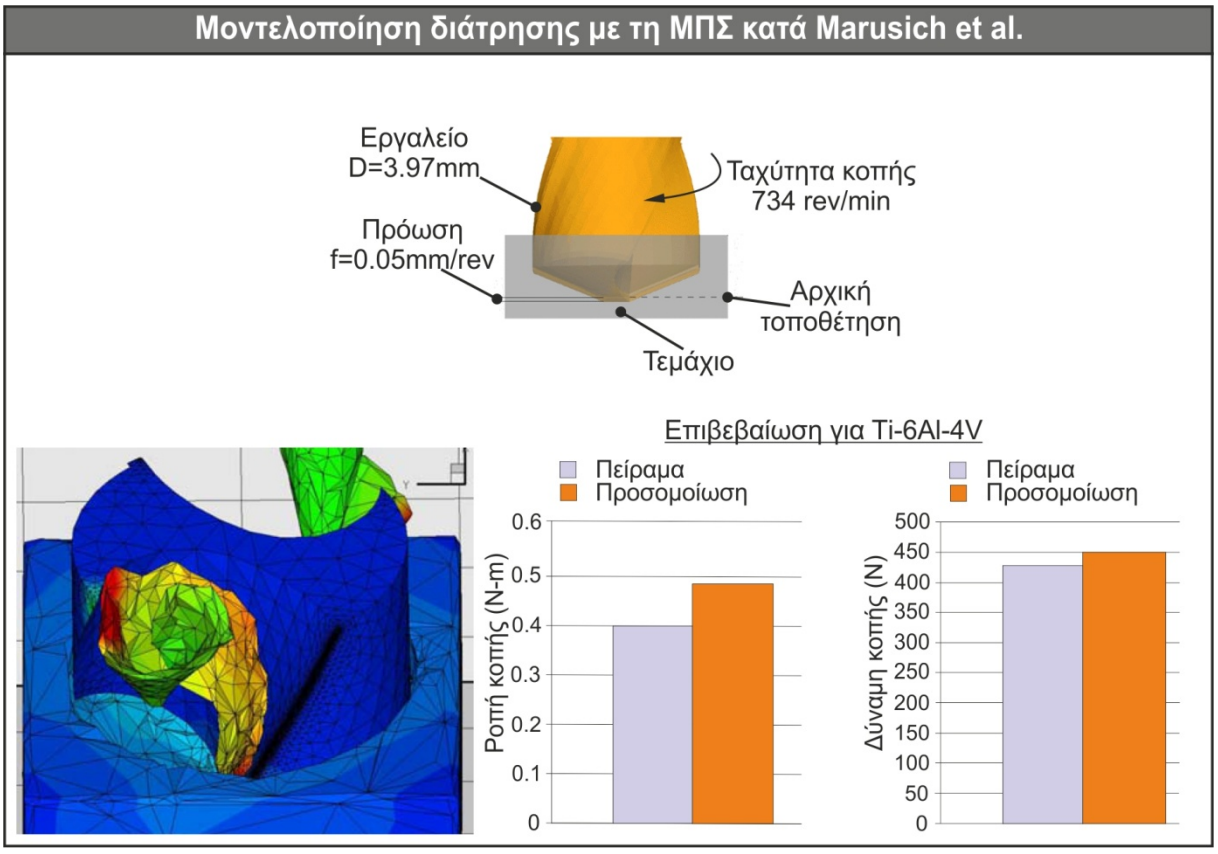
Σχήμα 2.18. Προσομοίωση της διάτρηση τριβής κατά Miller και Shih

Οι Marusich et al. [142] χρησιμοποίησαν το AdvantEdge™ για διάτρηση τεμαχίων της αυτοκινητοβιομηχανίας. Στην εργασία τους προσομοίωσαν τόσο παραδοσιακά εργαλεία διάτρησης, όσο και τρυπάνια με ένθετα πλακίδια. Τα τεμάχια ήταν εξ' αρχής διαμορφωμένα, ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες καθυστερήσεις υπολογισμών, μέχρι το κοπτικό εργαλείο να εισέλθει πλήρως σε φάση πλήρους κοπής (σχήμα 2.20). Τα αποτελέσματά τους επιβεβαιώθηκαν από πειραματικά δεδομένα.

Οι Li και Liang [143] χρησιμοποίησαν το λογισμικό DEFORM™ για να μελετήσουν τη διάτρηση τεμαχίου ZGMn13 με τρυπάνι 6mm (YG8). Χρησιμοποιήθηκε σειρά από παραλλαγές προώσεων και ταχυτήτων κοπής για να μελετηθούν τόσο η μορφή των συνεχών αποβλίττων που παράγονται, όσο και το μέγεθος της δύναμης κοπής (σχήμα 2.21). Όλα τα προσομοιωμένα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με αντίστοιχα πειράματα. Παρόμοιες προσομοιώσεις έκαναν και οι Klocke et al. [144] για δοκίμια AISI 1045.

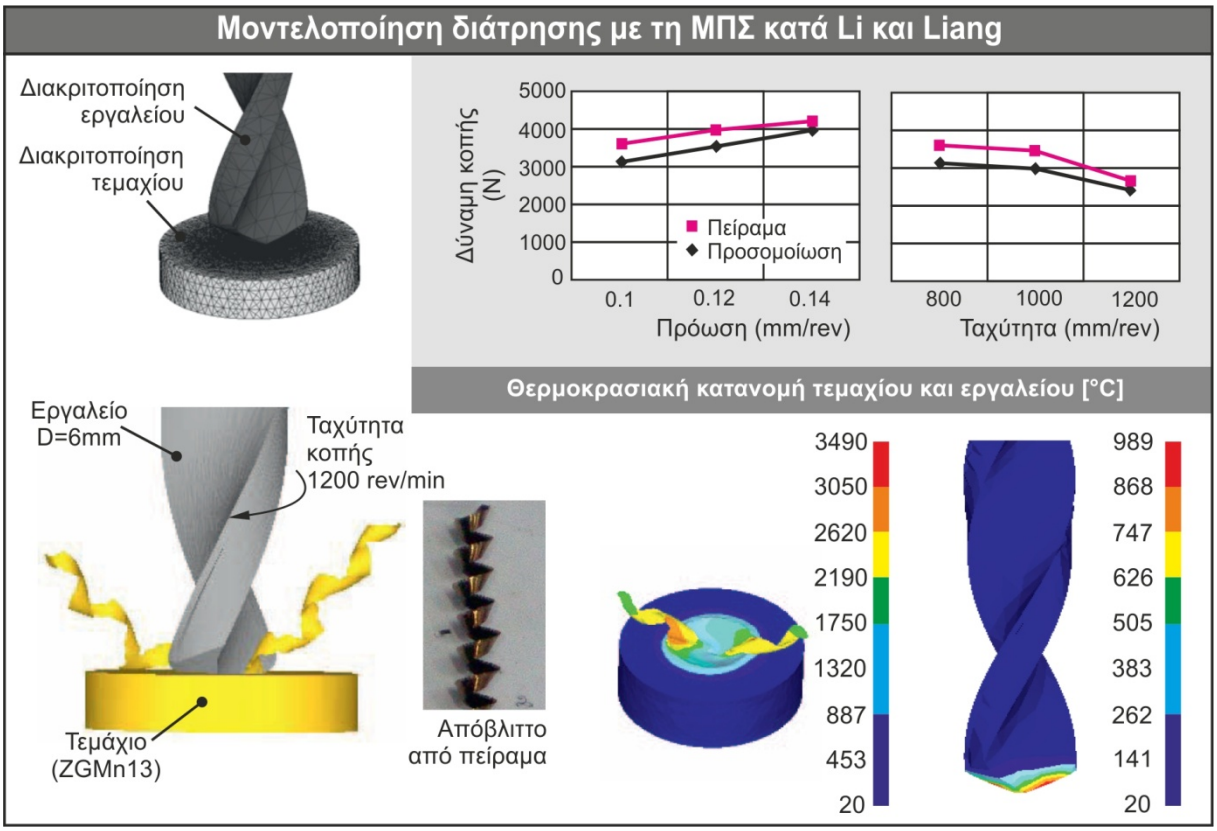


Σχήμα 2.19. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Li και Shih



Σχήμα 2.20. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Marusich et al.

Οι Gong et al. [145] προσομοίωσαν τα εργαλεία που συμμετέχουν σε κατεργασίες διάτρησης σε δοκούς. Έτσι μοντελοποιήθηκαν αρκετά εργαλεία με διαφορετικές γεωμετρίες εγκάρσιας τομής. Στη συνέχεια αναλύονται με λεπτομέρεια η επίδραση που έχουν κάθε φορά η γεωμετρία του εργαλείου, οι οριακές συνθήκες, η ταχύτητα περιστροφής και η γεωμετρία της εγκάρσιας τομής στα φορτία λυγισμού και τις κρίσιμες ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμα 2.21. Προσομοίωση της διάτρησης κατά Li και Liang

2.2.4. Χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για τη μελέτη της διάτρησης

Μια σειρά ερευνητών χρησιμοποίησαν την ανάλυση διασποράς (ANOVA – Analysis of Variance) με στόχο να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία της διάτρησης με διάφορα κριτήρια. Οι Haq et al. [146] χρησιμοποίησαν ένα πίνακα Taguchi L_9, ώστε να εκτελέσουν μια σειρά πειραμάτων. Τα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα από ενισχυμένο κράμα αλουμινίου LM25, τα εργαλεία ήταν διαμέτρου 10mm από επικαλυμμένο με TiN HSS και η χρήση των έγινε σε συνθήκες ξηράς κοπής. Παράμετροι όπως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και η γωνία κορυφής βελτιστοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις αποκρίσεις των πειραμάτων, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η δύναμη και η ροπή της κοπής. Τέλος διενεργήθηκαν οι πειραματικοί έλεγχοι των προτεινόμενων βελτιστοποιήσεων, ενώ με τη βοήθεια της ANOVA προέκυψε η στατιστική σημαντικότητα των παραμέτρων που συμμετείχαν.

Οι Davim et al. [147] επέλεξαν τον πίνακα L_{18} που προτείνεται από τη μεθοδολογία Taguchi και μελέτησαν την επίδραση που έχουν οι παράμετροι κοπής (ταχύτητα και πρόωση) στην διαστρωματική αποκόλληση υλικού MDF (medium density fibreboard) κατά τη διάτρηση. Υπολογίζονται μέσω της μεθόδου RSM (response surface methodology) συναρτήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των συντελεστών διαστρωματικής αποκόλλησης (F_d) τόσο κατά την είσοδο του εργαλείου, όσο και κατά την έξοδο (σχήμα

2.22). Η ανάλυση ANOVA χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση της επάρκειας των μαθηματικών μοντέλων. Αντίστοιχη έρευνα πραγματοποιήθηκε και από τους Gaitonde et al. [148] οι οποίοι παρουσιάζουν μια πλήρη σειρά πειραμάτων (πλήρες παραγοντικό) και αφορούν την διαστρωματική αποκόλληση που συμβαίνει για διαφορετικές ταχύτητες, προώσεις και γωνίες κορυφής σε ενισχυμένα πλαστικά συνθετικά υλικά. Κάθε παράγοντας έχει τρία επίπεδα και εκτελούνται όλα τα δυνατά πειράματα. Για τα ίδια υλικά οι Palanikumar et al. [149, 150] εκτέλεσαν άλλη σειρά πλήρους παραγοντικών πειραμάτων με δύο επίπεδα ανά παράγοντα (ταχύτητα, πρόωση και γωνία κορυφής) και αντίστοιχα αποτελέσματα.

Ο Tsao [151, 152] χρησιμοποίησε τον πίνακα Taguchi L_{27} για να ερευνήσει την επίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου και των συνθηκών κοπής, στην αναπτυσσόμενη δύναμη της κοπής και την ταχύτητα των οπών. Αναλύθηκε η σημαντικότητα των παραμέτρων που συμμετέχουν, υπολογίστηκαν οι προτεινόμενες εξισώσεις για την δύναμη κοπής και την ταχύτητα των οπών, εφαρμόστηκε η ανάλυση ANOVA για την επάρκεια των μοντέλων και έγιναν τα απαιτούμενα πειράματα επιβεβαίωσης. Με αντίστοιχο τρόπο οι Zhang και Chen [153] μελέτησαν την ταχύτητα των οπών, ενώ οι Kurt et al. [154] μελέτησαν την ταχύτητα των οπών και την ακρίβεια της διαμέτρου που προκύπτει.

Οι Tsao και Hocheng [155] παρουσίασαν μια μεθοδολογία συσχέτισης των παραμέτρων που συμμετέχουν στη διάτρηση (πρόωση, ταχύτητα κοπής και διάμετρο εργαλείου) με την αναπτυσσόμενη δύναμη κοπής και ταχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Αυτό επιτεύχθηκε τόσο με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης, όσο και νευρωνικού δικτύου. Για την εξοικονόμηση πόρων κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας Taguchi L_{27}. Με τον ίδιο πίνακα ο Kilickap [156, 157] ερεύνησε τη διάτρηση του Al-7075 για διαφορετικές συνθήκες πρόωσης, ταχύτητας κοπής και γωνίας κορυφής και πρότεινε βέλτιστες τιμές για την επίτευξη τόσο της καλύτερης ποιότητας απόληξης κατεργασίας στην οπή, όσο και της ελάχιστης ταχύτητας της επιφάνειας κατεργασίας. Έγινε χρήση της μεθοδολογίας RSM και τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με ανάλυση διασποράς. Στη συνέχεια ο ίδιος με τη χρήση πίνακα L_{16}, ερεύνησε την διαστρωματική αποκόλληση συνθετικών ενισχυμένων υλικών για διαφορετικές προώσεις, ταχύτητες κοπής και γωνίες κορυφής. Εξετάστηκαν τόσο οι αποκολλήσεις κατά την είσοδο, όσο και κατά την έξοδο, ενώ με την βοήθεια της ανάλυσης διασποράς προτείνονται βέλτιστες τιμές για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου.

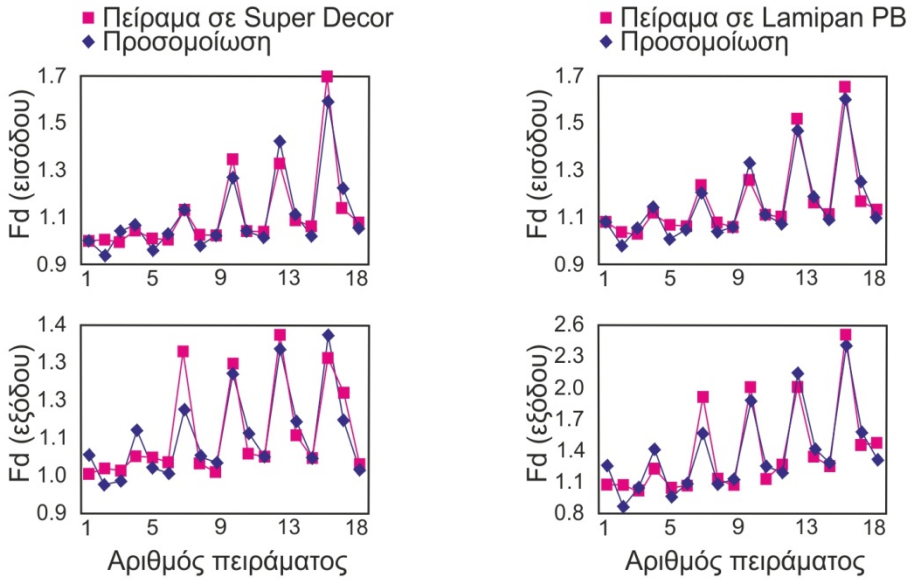
Οι Azmir et al. [158] μελέτησαν την επίδραση που έχουν οι συνθήκες κοπής και το είδος του εργαλείου κοπής στην ανάπτυξη της δύναμης κοπής και την διαστρωματική αποκόλληση συνθετικών υλικών. Χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διασποράς, ενώ τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν παρείχαν απόκλιση έως 2.3% για την αναπτυσσόμενη δύναμη και έως 5.6% για την διαστρωματική αποκόλληση.

Οι Al-Sulaiman et al. [159] παρουσίασαν μια μέθοδο παρακολούθησης της κατάστασης φθοράς του εργαλείου με την βοήθεια της μέτρησης της καθαρής ισχύος, που χρησιμοποιείται από την κεφαλή ενός κέντρου κατεργασίας κατά την διάτρηση. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σχεδιασμού πειραμάτων με τη χρήση του πίνακα L_{27} και δοκιμάστηκε για σειρά διαφορετικών δοκιμίων (χάλυβας και συνθετικά υλικά). Με την προτεινόμενη μεθοδολογία αποδείχθηκε, ότι ο υπολογισμός της φθοράς του εργαλείου με βάση τη μέτρηση της ισχύος στην κεφαλή της εργαλειομηχανής είναι καλύτερος και πιο αξιόπιστος δείκτης, σε σχέση με τη κλασσική μέτρηση μέσω αντίστοιχων μηχανολογικών συσκευών. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί, τόσο για μεγάλους, όσο και για μικρότερους κινητήρες κίνησης, αφού δεν προσμετρά την ισχύ που καταναλώνει ένας κινητήρας, όταν δεν παράγεται έργο κοπής.

Μοντελοποίηση διάτρησης κατά Davim et al.

Υλικό	Συντ. διαστρωματικής αποκόλλησης εισόδου F_d(entry)
Superpan Décor	$1.06+0.110f-0.00514V-0.00124fV+0.00523f^2+000044V^2$
Lamipan PB	$1.15+0.113f-0.00532V-0.00101fV+0.00127f^2+0.000041V^2$

Υλικό	Συντ. διαστρωματικής αποκόλλησης εξόδου F_d(exit)
Superpan Décor	$1.1+0.118f-0.00346V-0.000624fV-0.00857f^2+0.000022V^2$
Lamipan PB	$1.52+0.29f-0.019V-0.00185fV-0.0055f^2+0.000133V^2$



Σχήμα 2.22. Ανάλυση της διάτρησης με πίνακα L_{18} κατά Devim et al

Οι Shyha et al. [160] εκτέλεσαν πειράματα διάτρησης μικρών οπών πάνω σε ενισχυμένα πλαστικά υλικά, με εργαλεία από σκληρομέταλλα με διαφορετικές γωνίες κορυφής και ελίκωσης, ενώ μελέτησαν την διάρκεια ζωής των εργαλείων και την ποιότητα των δημιουργούμενων οπών. Χρησιμοποιήθηκε σχεδιασμός κλασματικών παραγοντικών πειραμάτων και αποδείχθηκε ότι οι γεωμετρία του εργαλείου και η πρόωση αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν, τόσο την ποιότητα των οπών, όσο και τη διάρκεια ζωής των εργαλείων.

Οι Bagci και Ozcelik [161] ανέλυσαν τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πάνω σε ένα συμβατικό τρυπάνι για διαφορετικές συνθήκες κοπής, χρησιμοποιώντας πίνακες Taguchi, ώστε να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος πειραμάτων. Με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης υπολογίζονται οι προτεινόμενες εξισώσεις για την αναπτυσσόμενη δύναμη κοπής και την εμφανιζόμενη θερμοκρασία για διαφορετικά υλικά. Τέλος, η ανάλυση ANOVA επιβεβαιώνει την ορθότητα των μαθηματικών μοντέλων.

Οι Khashaba et al. [162] ανέλυσαν την επίδραση που έχει η ταχύτητα κοπής (τρεις παραλλαγές) και η πρόωση (πέντε παραλλαγές) στη διάτρηση διαφορετικών συνθετικών υλικών (πέντε παραλλαγές). Έτσι εξετάστηκαν οι σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ των μεταβλητών, όταν μετρώνται η απαιτούμενη ροπή και η δύναμη κοπής κατά τη διάτρηση.

Χρησιμοποιώντας γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης, δίδονται εξισώσεις που υπολογίζουν τις μετρημένες ροπή και δύναμη και επιβεβαιώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οι Williams και McGilchrist [163] με τη βοήθεια της ανάλυσης παλινδρόμησης μελέτησαν την μεταβλητότητα της μέσης διάρκειας ζωής εργαλείων με διαφορετικές γωνίες και συνθήκες κοπής, ενώ στη μελέτη τους χρησιμοποιήθηκε υλικό K1045 για τα δοκίμια. Αντίστοιχη ανάλυση παρουσίασαν και οι Jalali και Kolarik [164], όταν μελέτησαν τη διάτρηση δοκιμίων χάλυβα με εργαλεία HSS. Αναπτύχθηκαν μοντέλα για τη διάρκεια ζωής, τη δύναμη κοπής, την απαιτούμενη ροπή και την τραχύτητα των οπών. Η ανάλυση βασίστηκε σε μεταβολές των συνθηκών κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής), της διαμέτρου των εργαλείων και την σκληρότητα των δοκιμίων.

Οι Stone και Krishnamurthy [165] χρησιμοποίησαν ένα νευρωνικό δίκτυο για να μοντελοποιήσουν τη σχέση μεταξύ πρόωσης και δύναμης κοπής κατά την διάτρηση συνθετικών υλικών με τρυπάνι διαμαντένιας κορυφής. Ο ελεγκτής που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του νευρωνικού δικτύου, είχε σαν σκοπό την ελαχιστοποίηση τόσο της διαστρωματικής αποκόλλησης όσο και της ανάπτυξης ρωγμών κατά τη διαδικασία της διάτρησης. Έγιναν συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα και βρέθηκε ότι, όταν το νευρωνικό δίκτυο ελέγχει το μέγεθος της αναπτυσσόμενης δύναμης της κοπής (ελέγχοντας την πρόωση, αντί η διάτρηση να προχωρά με σταθερή πρόωση) αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση τόσο ως προς την διαστρωματική αποκόλληση, όσο και ως προς την ανάπτυξη ρωγμών. Το ίδιο πρόβλημα μελέτησαν και οι Chung και Tomizuka [166] οι οποίοι χρησιμοποίησαν μεθοδολογία στηριγμένη στις αρχές της ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Προτείνανε η στρατηγική ελέγχου της συνολικής δύναμης κοπής, να γίνεται μέσω του ελέγχου της πρόωσης, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση στη κοπή.

Ο Kari [167] εκπαίδευσε ένα νευρωνικό δίκτυο, ώστε να προβλέπει την δύναμη κοπής και την απαιτούμενη ροπή των εργαλείων διάτρησης. Μια σειρά διαφορετικών γεωμετριών εργαλείων και συνθηκών λειτουργίας αποτέλεσε το υλικό για την εκπαίδευσή του δικτύου, ενώ η εκτεταμένη χρήση του οδήγησε σε αποκλίσεις των προβλέψεων από τις πραγματικές τιμές κατά 10%.

Οι Lee et al. [168] ανέπτυξαν ένα νευρωνικό δίκτυο, ώστε να προβλέπουν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του εργαλείου, το ρυθμό απομάκρυνσης του υλικού και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και ροπές κοπής. Η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και η διάμετρος του εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing algorithm) για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής, ώστε να ληφθούν υπόψη το κόστος και η παραγωγικότητα των εργαλείων.

Οι Sheng και Tomizuka [169] ανέπτυξαν ένα έξυπνο ελεγκτή χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα και ασαφή λογική μαζί, ώστε να ελεγχθεί το μέγεθος της συνολικής δύναμης κοπής κατά τη διάτρηση. Πληροφορίες για τη θέση της κεφαλής τροφοδοτούν το νευρωνικό δίκτυο, ενώ το μέρος της ασαφούς λογικής, ασχολείται με την μεταβολή των συντελεστών ενίσχυσης εξαιτίας της φθοράς του εργαλείου. Η μέθοδος αποδείχθηκε ότι λειτουργεί για μεγάλο εύρος τιμών, αφού τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Οι Panta et al. [170] χρησιμοποιούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων, με στόχο να προβλεφθεί η φθορά στην επιφάνεια ελευθερίας της κορυφής του εργαλείου διάτρησης. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών αρχιτεκτονικών συγκρίνονται, ενώ αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της χρήσης δυναμόμετρου δύναμης και ροπής κοπής ταυτόχρονα με αισθητήρα μέτρησης κραδασμών.

Ο Fayad [171] ανέπτυξε ένα συνδυαστικό μοντέλο παρακολούθησης της διαδικασίας της διάτρησης στηριζόμενο σε γενετικούς αλγορίθμους (που βελτιστοποιούν τις παραμέτρους του διαγνωστικού συστήματος) και σε νευρωνικά δίκτυα (που παρακολουθούν την λειτουργία του συστήματος). Ο στόχος που επιτυγχάνεται είναι η μείωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος λήψης απόφασης με χαμηλό κόστος, αλλά και δημιουργία προειδοποιητικού σήματος πριν την ύπαρξη κάποιας αστοχίας.

Οι Kawaji et al. [172] ανέπτυξαν έναν ελεγκτή δύο σταδίων, ώστε να μπορέσουν να ελέγξουν τη δύναμη κοπής που αναπτύσσεται κατά την κατεργασία. Αρχικά ένα νευρωνικό δίκτυο αναπτύσσεται εκτός γραμμής (off-line) και τα δεδομένα του χρησιμοποιούνται σε δεύτερη φάση από ένα ελεγκτή, ο οποίος φροντίζει να ακολουθεί η πραγματική δύναμη κοπής, αυτήν που έχει υπολογιστεί αρχικά εκτός γραμμής. Τα πειραματικά αποτελέσματα που ακολούθησαν επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, αφού ο εξοπλισμός ωθείται να ακολουθεί προϋπολογισμένες δυνάμεις.

Οι Brophy et al. [173] αναφέρονται στην διαφορετικότητα της ανάπτυξης μεθοδολογιών παρακολούθησης της κατεργασίας της διάτρησης, όταν αυτές μετρούνται σε πραγματικές συνθήκες εργοστασίου και όταν αυτές χρησιμοποιούνται σε χώρους εργαστηριακούς. Έτσι δίνουν έμφαση στη ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα τα οποία προειδοποιούν τον χειριστή, για την περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας του εργαλείου, μετρώντας απευθείας την ισχύ που απαιτείται από την κεφαλή του κέντρο κατεργασίας.

Οι Sanjay και Jyothi [174] μελέτησαν την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη διάτρηση, με βάση τη διάμετρο του εργαλείου, την ταχύτητα κοπής, την πρόωση και το χρόνο κατεργασίας. Τα νευρωνικά δίκτυα που εκπαιδεύτηκαν, αποδείχθηκε ότι μπορούν να προβλέψουν με επιτυχία την ποιότητα της επιφάνειας μετά από διάτρηση.

Οι Hashmi et al. [175] ανέπτυξαν ένα μοντέλο ασαφούς λογικής για την επιλογή της ταχύτητας κοπής, όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά. Οι προβλέψεις του μοντέλου αποδείχθηκαν να συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με στοιχεία από εγχειρίδια κατεργασιών.

Οι Karnik et al. [176] μελέτησαν το μέγεθος της ποιότητας απόληξης της κατεργασίας με ένα συνδυασμό μεθοδολογιών. Χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο πλήρους παραγοντικών πειραμάτων με τρεις παράγοντες (ταχύτητα, πρόωση, γωνία κορυφής) και τρία επίπεδα τιμών για τον καθένα. Χρησιμοποίησαν την RSM μεθοδολογία για να υπολογίσουν, μέσω ανάλυση παλινδρόμησης, μια εξίσωση για τις διαστάσεις της ποιότητας απόληξης της κατεργασίας, αλλά και ένα σύστημα βασισμένο σε νευρωνικό δίκτυο το οποίο εκπαιδεύτηκε κατάλληλα. Το νευρωνικό δίκτυο τελικά αποδεικνύεται πως έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη μεθοδολογία RSM, αφού μπορεί να αφομοιώνει καλύτερα τις μη γραμμικότητες που υπάρχουν.

Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τέσσερεις προσεγγίσεις προσομοίωσης της διάτρησης μαζί με την λίστα των δημοσιεύσεων που τις αφορούν.

Βασικές προσεγγίσεις προσομοίωσης της διάτρησης	Περιγραφή	Βιβλιογραφία
Μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας του εργαλείου και της διάτρησης	Η γεωμετρία του εργαλείου περιγράφεται με μαθηματικό τρόπο και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν αναλυτικά επιμέρους παράμετροι που αφορούν τη κατεργασία. Πολύ συνηθισμένη πρακτική είναι η χρήση μοντέλων τα οποία στηρίζονται στην προβολή σε ένα επίπεδο (2D), γεωμετρικών χαρακτηριστικών που από τη φύση τους είναι τρισδιάστατα (3D)	[14] – [67]
Εμπειρικός τρόπος μελέτης	Με τη βοήθεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από σειρές πειραμάτων, μπορεί κανείς να μελετήσει τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάτρηση. Αποτελεί για πολλά χρόνια μια μεθοδολογία η οποία μπορεί να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, με δαπανηρό όμως συνήθως τρόπο.	[68] – [119]
Αναλυτικός τρόπος μελέτης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	Ο αναλυτικός τρόπος μελέτης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, βασίστηκε στην μεγάλη εξέλιξη που υπήρξε τόσο στον τομέα του εξειδικευμένου λογισμικού που αφορά την μηχανική, όσο και στον τομέα της απόδοσης των Η/Υ.	[120] – [145]
Χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης	Η χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης μεταφέρει γνώση και εμπειρία από μεθοδολογίες που έχουν εξελιχθεί σε άλλα πεδία έρευνας στις μηχανουργικές κατεργασίες.	[146] – [176]

Σχήμα 2.23. Συνοπτικός πίνακας βασικών προσεγγίσεων της προσομοίωσης της διάτρησης

2.3. Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής

Το **πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας** πραγματεύεται την αναλυτική μελέτη της κατεργασίας της διάτρησης με ελικοειδές εργαλείο κωνικής κορυφής και ευθείες κύριες κόψεις. Η **βασική συμβολή** της εργασίας αυτής στην προσομοίωση της διάτρησης προκύπτει από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται ένα 3D στερεό CAD μοντέλο του κοπτικού εργαλείου και έτσι το εργαλείο καθορίζεται πλήρως και με μεγάλη ακρίβεια στο 3D χώρο. Ταυτόχρονα η υλοποίηση της γεωμετρίας αυτής αναλαμβάνεται πλήρως από το σύστημα CAD/CAM και δεν απαιτείται η αναλυτική ανάπτυξη μαθηματικών εξισώσεων. Επιπλέον μέσα από την αλληλεπίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου με τις αντίστοιχες γεωμετρίες των κατεργαζόμενων τεμαχίων προκύπτουν 3D στερεά μοντέλα των απαραμόρφωτων

αποβλίττων. Αυτή η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης της διάτρησης βασισμένη στον προγραμματισμό ενός συστήματος CAD/CAM, που καταλήγει στην 3D στερεά μοντελοποίηση των απαραμόρφωτων αποβλίττων, μέσω μια πλήρους αυτοματοποιημένης εφαρμογής, αποτελεί σημαντική καινοτομία της παρούσας εργασίας.

Η επακριβής μοντελοποίηση της κατεργασίας διαχωρίζεται σε επιμέρους φάσεις, καθώς απαιτείται:

- ο παραμετρικός σχεδιασμός του 3D στερεού μοντέλου του κοπτικού εργαλείου,
- ο αυτόματος σχεδιασμός μέσω αναγνώρισης χαρακτηριστικών των 3D στερεών μοντέλων των απαραίτητων κατεργαζόμενων τεμαχίων (ξεχωριστά για τη δράση των κύριων κόψεων και της εγκάρσιας κόψης),
- η εκτέλεση της κινηματικής της διάτρησης, μέσω κατάλληλων συναρμολογήσεων του κοπτικού εργαλείου και του εκάστοτε κατεργαζόμενου τεμαχίου,
- η δημιουργία των 3D στερεών μοντέλων των απαραμόρφωτων αποβλίττων (ξεχωριστά για τη δράση των κύριων κόψεων και της εγκάρσιας κόψης) και η περαιτέρω διακριτοποίησή τους για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας υπολογισμών,
- η καταγραφή του τρόπου που επηρεάζουν οι τιμές των παραμέτρων του εργαλείου, το μέγεθος των απαραμόρφωτων αποβλίτων,
- ο υπολογισμός των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής και πρόωση) αλλά και τα υλικά των εργαλείων και κατεργαζόμενων τεμαχίων που επιλέγονται,
- ο υπολογισμός της συνολικής δύναμης κοπής και της δύναμης κοπής λόγω της δράσης της εγκάρσιας κόψης για διάφορες συνθήκες κοπής και υλικά που χρησιμοποιούνται.

Το αποτέλεσμα της αναπτυχθείσας διαδικασίας μοντελοποίησης, είναι ο επακριβής υπολογισμός των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά τη διάτρηση, τόσο στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης, όσο και στις κύριες κόψεις του εργαλείου. Ο έλεγχος επιβεβαίωσης της μεθοδολογίας έγινε με την εκτέλεση ικανού αριθμού πειραμάτων, τα οποία επιβεβαίωσαν την μεγάλη ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας για διαφορετικά εργαλεία και συνθήκες κοπής.

Η γεωμετρία του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στην αναλυτική μαθηματική περιγραφή που έκανε ο Galloway [14]. Ο ίδιος βασίστηκε στην μαθηματική ανάλυση των απαιτήσεων που έχει η κατασκευή ενός τρυπανιού και αυτές οι κατασκευαστικές αρχές μεταφέρθηκαν, ώστε να μπορούν να εκτελεστούν αυτόματα από ένα σύστημα CAD/CAM και να παραχθεί ένα 3D στερεό μοντέλο του. Η μεγάλη αδυναμία της προηγούμενης μεθοδολογίας ήταν το γεγονός, ότι για κάθε γεωμετρική παράμετρο του εργαλείου, θα έπρεπε να βρεθεί αναλυτικά ένας μαθηματικός τύπος που να την εκφράζει στο τρισδιάστατο χώρο. Αντίθετα, με την προτεινόμενη μεθοδολογία, όλες οι διαστάσεις του εργαλείου που απαιτούνται για τους υπολογισμούς των δυνάμεων, έχουν ενσωματωθεί στο 3D στερεό μοντέλο του και χρησιμοποιούνται άμεσα με την βοήθεια μεθοδολογιών αυτόματης αναγνώρισης χαρακτηριστικών.

Η διαδοχική χρήση του DRILL3D για σειρά διαφορετικών γεωμετρικών παραμέτρων του εργαλείου, δίνει τη δυνατότητα να καταγραφεί, πώς επηρεάζεται το μέγεθος των απαραμόρφωτων αποβλίττων με την αλλαγή των παραμέτρων αυτών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στο διαχωρισμό της συνεισφοράς στη δημιουργία της δύναμης κοπής,

ανάμεσα σε αυτή που οφείλεται στις κύριες κόψεις και αυτή που οφείλεται στην εγκάρσια κόψη. Οι συνθήκες κοπής για τις δύο αυτές περιοχές είναι σημαντικά διαφορετικές, με αποτέλεσμα ο διαχωρισμός της επίδρασής τους να είναι αναπόφευκτος. Με βάση αυτό το σκεπτικό η εφαρμογή DRILL3D μπορεί να υπολογίζει ξεχωριστά τις συνεισφορές την κόψεων.

Στο **δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας** επιτυγχάνεται η συνδυασμένη χρήση του DRILL3D και της μεθοδολογίας σχεδιασμού πειραμάτων, ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός μαθηματικών εξισώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Αυτό επιτυγχάνεται για μια σειρά εργαλείων, διαφόρων διαμέτρων από 10 έως 16mm, σε διαφορετικές συνθήκες κοπής και με το διαχωρισμό της συνεισφοράς των κόψεων του εργαλείου. Χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που προτάθηκε από τον Taguchi και με την εκτέλεση μόνο 16 κατάλληλα επιλεγμένων πειραμάτων, προτείνονται γενικευμένα μαθηματικά μοντέλα, για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Η ακρίβεια αυτών των μοντέλων ελέγχεται με τα στοιχεία που προκύπτουν από το πλήρες παραγοντικό σχεδιασμό.

Επιπλέον, γίνεται ανάλυση της σημαντικότητας της συνεισφοράς των παραγόντων που συμμετέχουν στην προσομοίωση και τέλος έχουν κατασκευαστεί νομογραφήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη ευκολία για το γρήγορο υπολογισμό της συνολικής δύναμης της κοπής για σειρά εργαλείων διάτρησης και συνθηκών κοπής. Τόσο η εφαρμογή DRILL3D, όσο και τα προτεινόμενα μαθηματικά μοντέλα και νομογραφήματα, μπορούν να αποδειχθούν εξαιρετικά χρήσιμα και χρηστικά για υπολογισμούς δυνάμεων κοπής κατά τη διάτρηση, από χρήστες και ερευνητές της συγκεκριμένης κατεργασίας.

3. Μοντέλο προσομοίωσης

3.1. Χρήση συστήματος CAD/CAM για προγραμματισμό

Η στρατηγική που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν να χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα προγραμματισμού ενός γενικής χρήσης συστήματος CAD/CAM. Το σύστημα που επιλέχθηκε ήταν το Autodesk Inventor™ 2008, που διαθέτει περιβάλλον API (Application Programming Interface) βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic for Application (VBA). Με τη βοήθειά του υλοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες εντολές για την προσομοίωση της μηχανουργικής κατεργασίας της διάτρησης.

Η ύπαρξη ενός περιβάλλοντος API δίνει τη δυνατότητα σε όποιον το επιθυμεί, να χρησιμοποιήσει ένα γενικής χρήσεως σύστημα CAD/CAM, ώστε να δημιουργήσει τη δική του εφαρμογή στην περιοχή του ενδιαφέροντός του [177]. Ενδεικτικά αναφέρονται μια σειρά από ευκολίες που παρέχονται από τη χρήση ενός τέτοιου περιβάλλοντος:

- Εργασίες οι οποίες απαιτείται να επαναληφθούν αρκετές φορές ή λειτουργικότητα που απαιτεί συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου, μπορούν με σχετική ευκολία να αυτοματοποιηθούν, ώστε να γίνονται χωρίς την παρέμβαση του χρήστη.
- Υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας φορμών εισαγωγής δεδομένων ή αναφορών που μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν (φιλικό περιβάλλον).
- Όλες οι εντολές, οι Boolean πράξεις και η δυνατότητες αναγνώρισης χαρακτηριστικών που διαθέτει το σύστημα CAD/CAM, είναι διαθέσιμες σε επίπεδο προγραμματιστικών εντολών.
- Δίνεται δυνατότητα ολοκλήρωσης του συστήματος CAD/CAM με άλλα αντίστοιχα προγράμματα που χρησιμοποιούνται, όπως διαχείρισης προϊόντων, δημιουργίας κώδικα NC, εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων κ.λπ..
- Υπάρχει δυνατότητα να σωθούν αρχεία με διαφορετικό κάθε φορά τρόπο, ανάλογα με τη χρήση που απαιτείται π.χ. έξοδος σε αρχείο .stl για να χρησιμοποιηθεί από εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι τα παραγόμενα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πολλές πλατφόρμες λογισμικών.
- Το Autodesk Inventor™ χρησιμοποιεί την τεχνολογία “Automation” της Microsoft™. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιεί τεχνολογία όμοια με αυτή που χρησιμοποιεί η Microsoft™ στα προϊόντα της (π.χ MS Office™), επομένως τα διαθέσιμα δεδομένα μπορούν να εισάγονται σε αυτά και να επιδέχονται επεξεργασίας, χρησιμοποιώντας αντίστοιχες εντολές VBA.

Στην παρούσα εργασία με τη χρήση των διαθέσιμων εργαλείων επιτυγχάνεται:

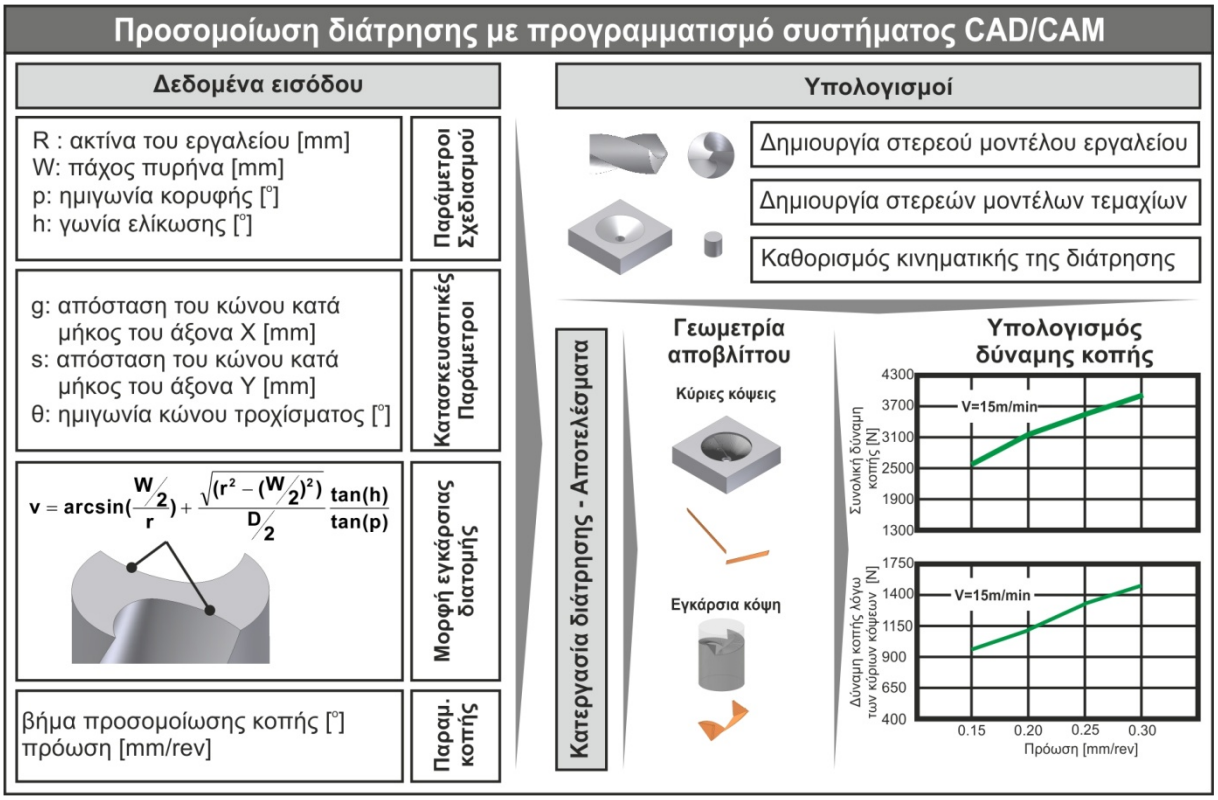
- η δημιουργία ενός φιλικού περιβάλλοντος δεδομένων εισόδου,
- η χρησιμοποίηση της δυνατότητας 3D στερεάς μοντελοποίησης τόσο για το χρησιμοποιούμενο εργαλείο, όσο και για τα τεμάχια που κατεργάζονται,
- η εφαρμογή πράξεων Boolean, ώστε στη συνέχεια να υπολογιστούν τα 3D στερεά μοντέλα των κατεργαζόμενων τεμαχίων και των απαραμόρφωτων αποβλίττων στις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές της κοπής (ψηφιακή κοπή).
- η αυτόματη αναγνώριση των απαιτούμενων διαστάσεων των υπολογιζόμενων αποβλίττων,

- ο υπολογισμός των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής και η σύνθεσή τους για να υπολογιστεί η συνολική δύναμη κοπής ανά κοπτική ακμή,
- η συνεργασία της εφαρμογής με το Microsoft Excel, ώστε να αποθηκεύονται εκεί αναλυτικά δεδομένα που απαιτούνται είτε για ενδιάμεσους υπολογισμούς, είτε για την καταγραφή των τελικών αποτελεσμάτων.
- η δημιουργία μιας αυτόνομης εφαρμογής (εκτελέσιμο αρχείο), που θα χρησιμοποιεί το σύστημα CAD/CAM, ώστε να προσομοιώνει την μηχανουργική κατεργασία της διάτρησης. Η εφαρμογή αυτή θα περιλαμβάνει πέρα από την προσομοίωση αυτή καθ' αυτή, και επιπλέον δυνατότητα να εμφανίζει αποτελέσματα προσομοιώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί, διαβάζοντας τα αναλυτικά αποτελέσματα από τα επιμέρους αρχεία που δημιουργούνται.

3.2. Περιγραφή των σταδίων για την προσομοίωση της διάτρησης

Η προσομοίωση της διάτρησης με την προτεινόμενη μεθοδολογία, βασίστηκε σε μια σειρά από προγραμματιστικές ενέργειες, που είναι απαραίτητες προκειμένου να παρασταθούν και να επεξεργαστούν μέσω του συστήματος CAD/CAM οι απαιτούμενες γεωμετρίες (σχήμα 3.1). Συνοπτικά τα στάδια που απαιτούνται και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, περιλαμβάνουν:

- τη δημιουργία του 3D στερεού μοντέλου του τρυπανιού, μέσα από την επιλογή των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων του εργαλείου. Το εργαλείο που προκύπτει είναι ένα ελικοειδές τρυπάνι με κωνική κορυφή. Επίσης απαιτείται η κατάλληλη επιλογή της εγκάρσιας μορφής του κοπτικού εργαλείου, προκειμένου να επιτευχθούν γεωμετρικά οι ευθείες κύριες κόψεις.



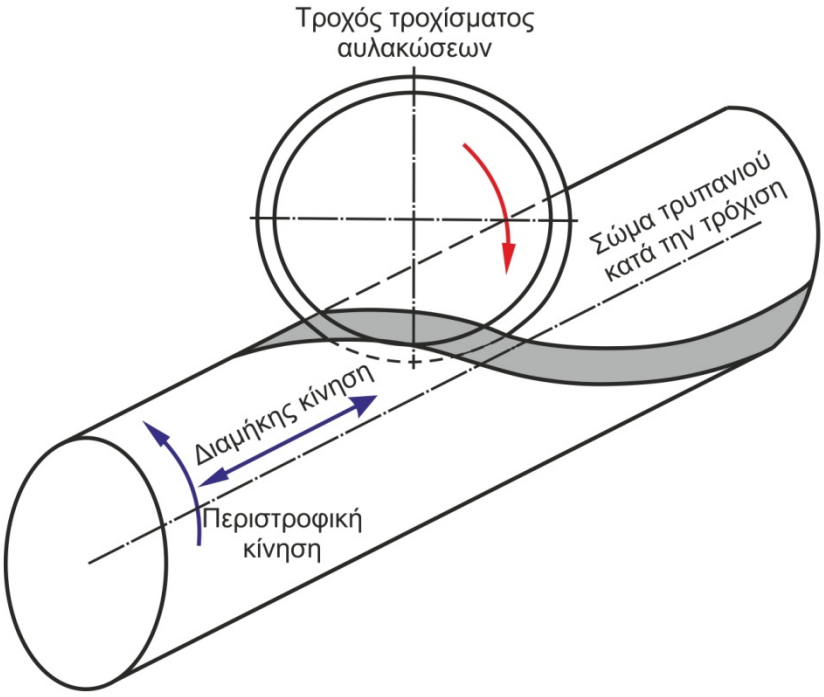
Σχήμα 3.1. Περιγραφή των σταδίων που ακολουθούνται για την προσομοίωση της διάτρησης

- τη δημιουργία των 3D στερεών μοντέλων των επιμέρους κατεργαζόμενων τεμαχίων που αντιστοιχούν στις διαφορετικές κόψεις (κύριες κόψεις και εγκάρσια κόψη). Αυτό καθίσταται δυνατό να αυτοματοποιηθεί ανάλογα με το εργαλείο που χρησιμοποιείται, με τη χρήση αυτόματης αναγνώρισης των απαιτούμενων διαστάσεων, απ' ευθείας από αυτό.
- τη συναρμολόγηση του εργαλείου που έχει προηγουμένως μοντελοποιηθεί και με τα δύο κατεργασμένα τεμάχια ξεχωριστά, ώστε να ακολουθήσουν οι υπολογισμοί στη συνέχεια.
- τη περιστροφή του εργαλείου γύρω από το άξονα Z (φορά κοπής), με ταυτόχρονη μετακίνηση κατά μήκος του –Z (πρόωση), ώστε να προσομοιωθεί η κινηματική της διάτρησης.
- την εκτέλεση Boolean αφαιρέσεων (subtractions) μεταξύ των μοντέλων (εργαλείο και εκάστοτε τεμάχιο) σε κάθε βήμα που κάνει το εργαλείο, ώστε να προκύψουν οι διαδοχικές μορφές των κατεργασμένων τεμαχίων. Επίσης, εκτελούνται και Boolean πράξεις τομής (intersection) μεταξύ των ίδιων μοντέλων, ώστε να προκύψουν οι διαδοχικές μορφές των απαραμόρφωτων αποβλίττων.
- τη συνέχιση των πράξεων Boolean μέχρι να προκύψουν δύο συνεχόμενα απαραμόρφωτα απόβλιττα, τα οποία να έχουν ακριβώς τις ίδιες γεωμετρικές ιδιότητες και ως εκ τούτου έχει επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση της προσομοίωσης (steady state).
- την αυτόματη αναγνώριση των διαστάσεων των απαραμόρφωτων αποβλίττων.
- τον υπολογισμό της δύναμης της κοπής μέσω:
    - της διακριτοποίησης των αποβλίττων σε μικρότερα κομμάτια, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών.
    - του υπολογισμού των δυνάμεων κοπής ξεχωριστά για κάθε στοιχειώδες απόβλιττο, την διανυσματική σύνθεση των δυνάμεων σε κάθε στοιχειώδες απόβλιττο και την τελική άθροιση της δύναμης της κοπής, ξεχωριστά για κάθε κόψη που συμμετέχει στην κοπή.

3.3. Δημιουργία 3D στερεού μοντέλου του εργαλείου

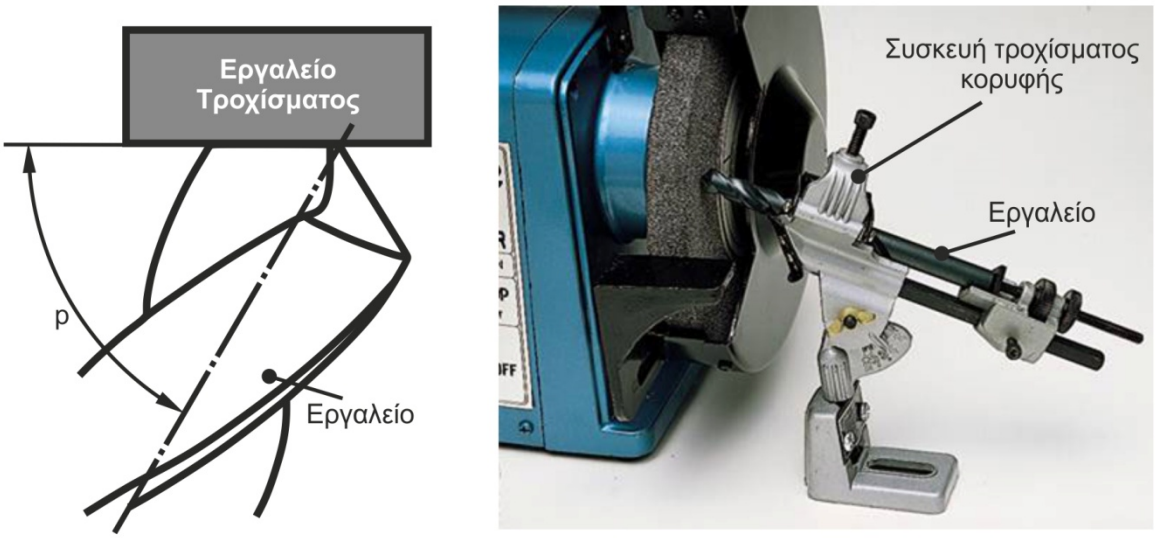
3.3.1. Στρατηγική μοντελοποίησης του εργαλείου

Η στρατηγική που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του ελικοειδούς κωνικής κορυφής εργαλείου, ουσιαστικά αναπαράγει τον τρόπο με τον οποίο ο κατασκευαστής φτιάχνει το εργαλείο (σχήμα 3.2). Αρχικά χρησιμοποιείται μια κυλινδρική μπάρα διαμέτρου ίση με αυτή του τρυπανιού που απαιτείται να κατασκευαστεί. Κατά τη διάρκεια της τρόχισης των αυλακώσεων, ο άξονας περιστροφής του τροχού βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση και γωνία από τον άξονα του εργαλείου. Ενώ ο τροχός παραμένει περιστρεφόμενος στη ίδια θέση, το σώμα του εργαλείου περιστρέφεται και ταυτόχρονα μετακινείται μπρος και πίσω αργά, ώστε να δημιουργηθεί η αυλάκωση. Η διπλή αυτή κίνηση του υπό δημιουργία εργαλείου, ελέγχει τη γωνία ελίκωσης των αυλακώσεων, ενώ η θέση και το προφίλ των τροχών καθορίζει τη μορφή της εγκάρσιας διατομής του εργαλείου. Κατά την κατασκευή ενός εργαλείου με δύο αυλακώσεις, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για την κατεργασία της δεύτερης αυλάκωσης.



Σχήμα 3.2. Κινηματική της τρόχισης των αυλακώσεων σε ένα τρυπάνι

Στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλης συσκευής τροχίσματος επιτυγχάνεται η τρόχιση της κορυφής του εργαλείου, διαμορφώνοντας έτσι την επιφάνεια ελευθερίας των κύριων κόψεων και τη γεωμετρία τόσο των κύριων κόψεων (ευθείες), όσο και της εγκάρσιας κόψης (γωνία εγκάρσια κόψης). Ενδεικτικά η λειτουργία μιας τέτοια συσκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Τρόχισμα κωνικής κορυφής ελικοειδούς τρυπανιού

3.3.2. Δημιουργία στερεού μοντέλου του εργαλείου

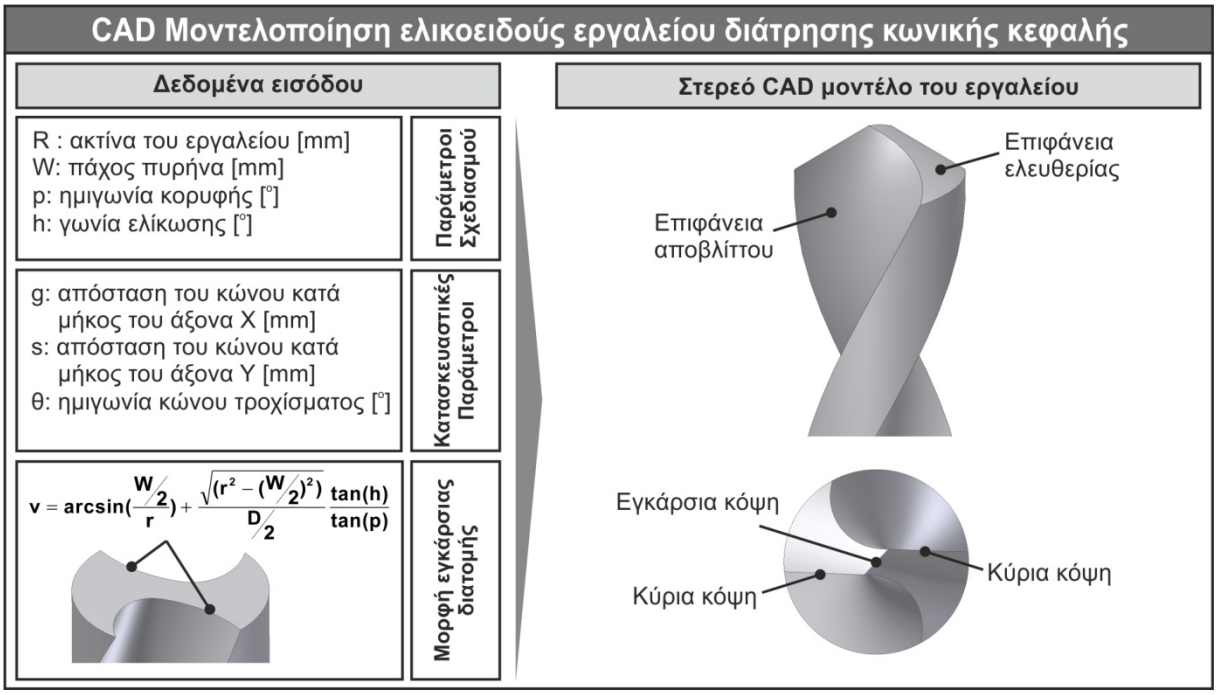
Για την δημιουργία του 3D στερεού μοντέλου ενός ελικοειδούς τρυπανιού κωνικής κορυφής, χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρικές και κατασκευαστικές αρχές που ισχύουν κατά τη κατασκευή των ελικοειδών τρυπανιών κωνικής κορυφής με ευθείες κύριες κόψεις, όπως

αυτές περιγράφηκαν από τον Galloway. Οι αρχές αυτές υλοποιήθηκαν με τον παραμετρικό σχεδιασμό του τρυπανιού στο σύστημα CAD/CAM.

Για να καθοριστεί πλήρως η γεωμετρία του εργαλείου θα πρέπει να οριστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσομοιώνεται ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται:

- η επιφάνεια ελευθερίας, προέρχεται από την τρόχιση της κορυφής του εργαλείου και
- η επιφάνεια αποβλίττου, προέρχεται από την τρόχιση του σώματος του εργαλείου, από κατάλληλης διατομής και ορθής τοποθέτησης στο χώρο τροχό (δημιουργία των αυλακώσεων).

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται, τόσο για την επιφάνεια ελευθερίας, όσο και για την επιφάνεια αποβλίττου τροφοδοτούνται με τη χρήση κατάλληλων εντολών στο σύστημα CAD/CAM και παράγεται ένα 3D στερεό μοντέλο του ελικοειδούς τρυπανιού με δύο ευθείες κύριες κόψεις (σχήμα 3.4).

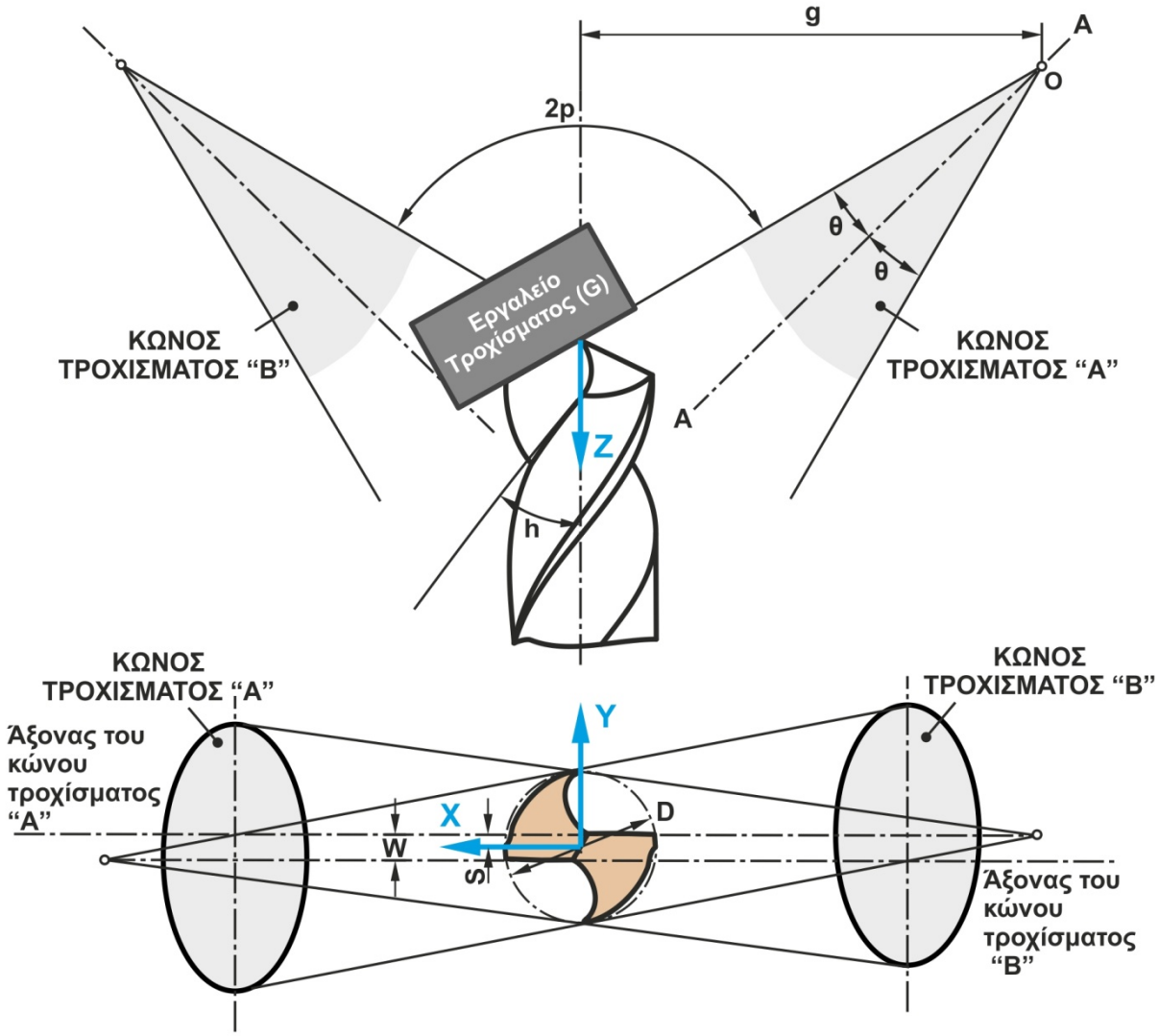


Σχήμα 3.4. Περιγραφή των σταδίων μοντελοποίησης του εργαλείου διάτρησης

Η μεθοδολογία τροχίσματος των επιφανειών ελευθερίας της κορυφής του τρυπανιού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Το τρυπάνι περιστρέφεται γύρω από τον άξονα AA, ο οποίος είναι σταθερός στο χώρο και η επιφάνεια ελευθερίας τροχίζεται από την επίπεδη επιφάνεια τροχίσματος του τροχού G. Ο άξονας AA και το επίπεδο της επιφάνειας τροχίσματος τέμνονται στο σημείο O. Η κίνηση της επιφάνειας τροχίσματος, σε σχέση με την κορυφή του τρυπανιού, μπορεί εναλλακτικά να συναχθεί, εάν κανείς θεωρήσει την κορυφή του εργαλείου σταθερή και την επιφάνεια τροχίσματος να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα AA. Έτσι η εικονική αυτή κίνηση του τροχού είναι ακριβώς ίση και αντίθετη με την κίνηση που κάνει στην πράξη το τρυπάνι.

Όταν μια επίπεδη επιφάνεια περιστρέφεται γύρω από ένα σταθερό άξονα, δημιουργεί ένα κώνο, και επομένως η επιφάνεια τροχίσματος δημιουργεί μια τέτοια κωνική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της κίνησης της. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης είναι η επιφάνεια ελευθερίας της κορυφής του τρυπανιού να αποτελεί ένα μέρος της κωνικής αυτής επιφάνειας. Η κορυφή του κώνου είναι το σημείο O και η ημιγωνία του κώνου συμβολίζεται με θ και είναι αυτή που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα AA και της επιφάνειας τροχίσματος του τροχού G. Ο κώνος

ονομάζεται κώνος τροχίσματος και η μεθοδολογία παραγωγής τέτοιων εργαλείων ονομάζεται μέθοδος κωνικού τροχίσματος της κορυφής. Στο σύστημα συντεταγμένων το οποίο χρησιμοποιήθηκε, ο άξονας Z βρίσκεται κατά μήκος του άξονα περιστροφής του εργαλείου, ο άξονας Y είναι κατά μήκος της κοινής καθέτου, η οποία τέμνει της προεκτάσεις των δύο κύριων κόψεων και ο άξονας X είναι κάθετος στους άλλους δύο (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5. Ελικοειδές τρυπάνι κωνικής κορυφής κατά Galloway

Σύμφωνα με το μοντέλο που περιγράφηκε για να καθοριστεί πλήρως το εργαλείο, θα πρέπει να καθοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται. Αυτές οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τις γεωμετρικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για να διαμορφωθεί η βασική μορφή του εργαλείου, όπως:
    - D: η διάμετρος του εργαλείου σε mm,
    - W: το πάχος του πυρήνα του εργαλείου σε mm,
    - p: η ημιγωνία κορυφής σε μοίρες π.χ. 2p=118°,
    - h: η γωνία ελίκωσης σε μοίρες
- Τις κατασκευαστικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη λεπτομερή διαμόρφωση της μορφής του εργαλείου, με βάση τις αρχές του κωνικού τροχίσματος της κορυφής:

- g: η απόσταση της κορυφής του κώνου από την αρχή των αξόνων κατά μήκος του άξονα X σε mm,
- s: η απόσταση της κορυφής του κώνου από την αρχή των αξόνων κατά μήκος του άξονα Y σε mm,
- θ: η ημιγωνία του κώνου σε μοίρες.

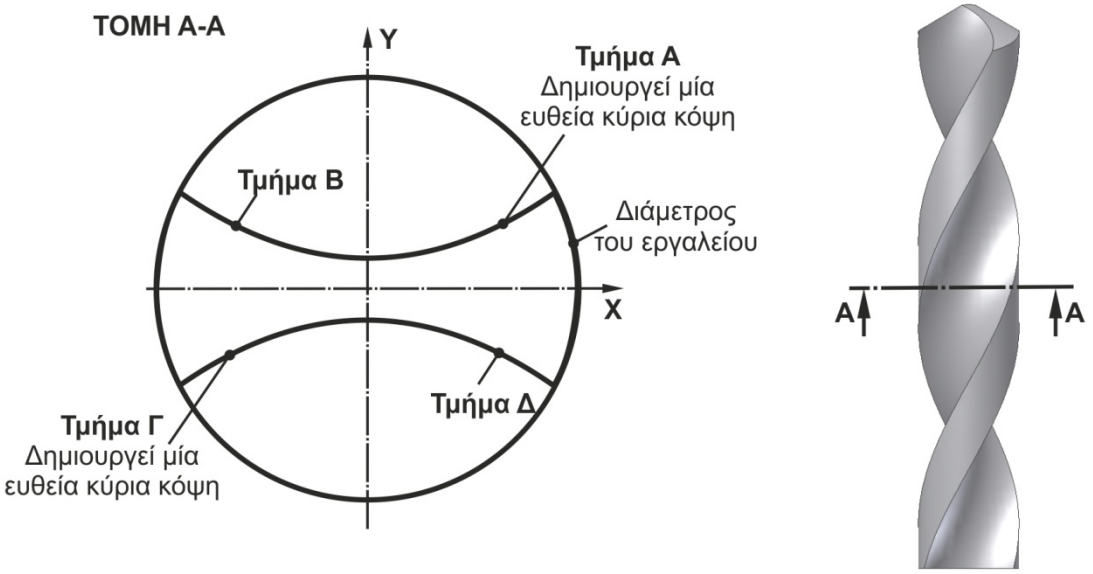
Η μορφή της εγκάρσιας διατομής του εργαλείου εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρία των τροχών που χρησιμοποιούνται για το τρόχισμα των αυλακώσεων. Στα πρότυπα που ισχύουν, δεν αναφέρονται συγκεκριμένα πώς πρέπει να κατασκευάζονται τα εργαλεία, αλλά δίνονται οι τελικές βασικές διαστάσεις του εργαλείου, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις διάφορες εργαλειομηχανές και όχι οι αναλυτικές διαστάσεις που έχουν να κάνουν με τις κόψεις. Μερικές φορές δίνεται και η γωνία αποβλίττου στην περιοχή της εξωτερικής διαμέτρου του εργαλείου. Επειδή το εργαλείο που μελετάται έχει ευθείες κύριες κόψεις, θα πρέπει και η εγκάρσια διατομή του να έχει κατάλληλη γεωμετρία, ώστε μετά την ολοκλήρωση του τροχίσματος της κορυφής, να προκύψουν ευθείες κύριες κόψεις. Επειδή η ακριβής γεωμετρία των τροχών τροχίσματος των αυλακώσεων είναι αρκετά πολύπλοκο να βρεθεί, γιατί εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του κάθε εργαλείου, προτιμήθηκε η χρήση της μορφής της εγκάρσιας διατομής του εργαλείου, όπως αυτή προτάθηκε από τον Galloway. Η μορφή αυτή εμπεριέχει μια σειρά από γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε εργαλείου, χρησιμοποιώντας τη διάμετρό του, το μέγεθος του πυρήνα του, τη γωνία ελίκωσης και τη γωνία κορυφής του, ώστε να δημιουργήσει την κάθε φορά κατάλληλη διατομή και μετά την ολοκλήρωση του τροχίσματος της κορυφής να προκύψουν ευθείες κύριες κόψεις. Η εξίσωση που περιγράφει τη γεωμετρία της εγκάρσιας διατομής του κοπτικού εργαλείου με τις προαναφερόμενες ιδιότητες είναι:

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

όπου:

W: ο πυρήνας εργαλείου σε mm
D: η διάμετρος εργαλείου σε mm
h: η γωνία ελίκωσης σε μοίρες
p: η ημιγωνία κορυφής σε μοίρες
(v, r): οι πολικές συντεταγμένες της εγκάρσιας μορφής των αυλακώσεων, που διαφοροποιούνται καθώς το r μεταβάλλεται από W/2 έως D/2.

Η χρησιμοποιούμενη μορφή της εγκάρσιας διατομής φαίνεται στο σχήμα 3.6. Τα τμήματα Α και Γ είναι αυτά που πρέπει οπωσδήποτε να ακολουθούν την προηγούμενη εξίσωση, ώστε να δημιουργηθούν τελικά ευθείες κύριες κόψεις. Στην πράξη οι γεωμετρίες των τμημάτων Β και Δ επιλέγονται, ώστε να παραχθεί εργαλείο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη στιβαρότητα. Κατά την παρούσα μελέτη, δεν παίζει ρόλο η γεωμετρία αυτών των δύο τμημάτων, αφού πρόκειται να υπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στις κόψεις. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η ίδια συνάρτηση για όλα τα επιμέρους τμήματα της εγκάρσιας τομής, χωρίς να εισάγεται οποιοδήποτε σφάλμα για τη συνέχεια.



Σχήμα 3.6. Μορφή της εγκάρσιας διατομής του εργαλείου κατά Galloway

Η συγκεκριμένη διατομή στη συνέχεια μετατοπίζεται στο χώρο κατά τον άξονα Z σε μια απόσταση ίση με:

$$l=\frac{2\pi R}{\tanh}$$

όπου:

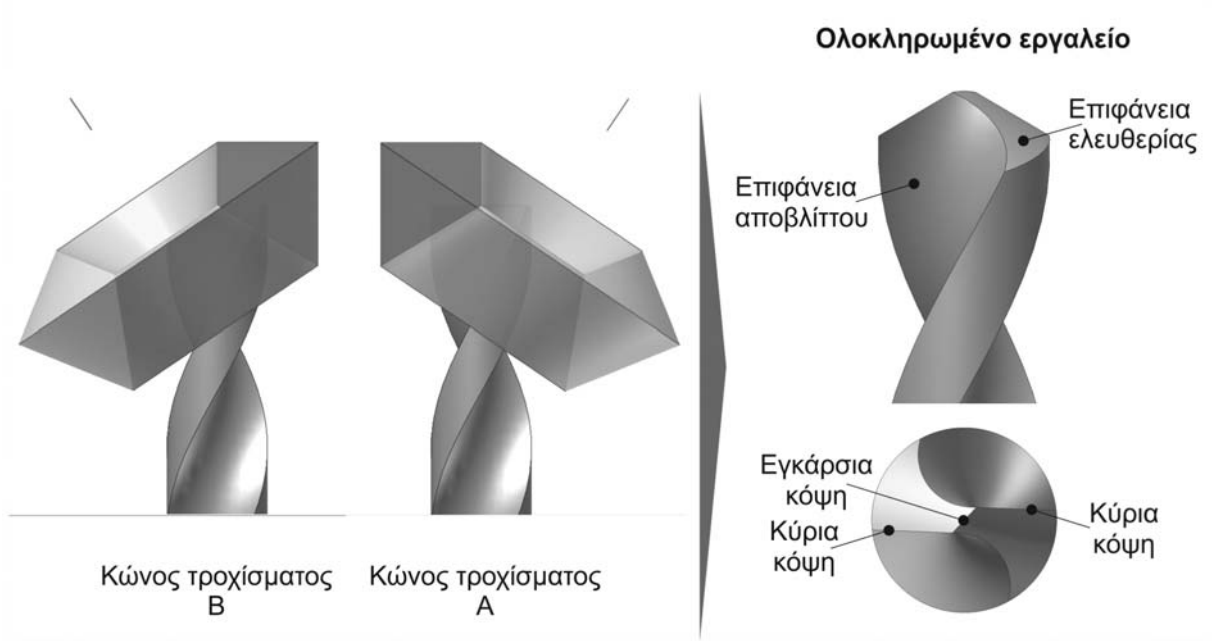
R: η ακτίνα του εργαλείου,
h: η γωνία ελίκωσης

και ταυτόχρονα περιστρέφεται κατά 360°. Το στερεό που δημιουργείται αποτελεί το σώμα του εργαλείου πριν τροχιστεί η κορυφή του (σχήμα 3.7). Η εντολή του Autodesk Inventor™ που πραγματοποιεί αυτήν την διαδικασία είναι η Coil.

Σχήμα 3.7. Γεωμετρία του σώματος του εργαλείου πριν τροχιστεί η κορυφή του

Στην συνέχεια καθορίζονται οι διαστάσεις που αφορούν τους δύο κώνους και χρησιμοποιώντας την εντολή Revolve με ενεργοποιημένη την επιλογή kCutOperation, που σημαίνει Boolean αφαίρεση υλικού, επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση του εργαλείου. Στο σχήμα

3.8 παρουσιάζεται η μορφή του ολοκληρωμένου εργαλείου και φαίνονται καθαρά οι δύο κύριες κόψεις (με ευθεία μορφή) και η εγκάρσια κόψη στην κορυφή του πυρήνα.



Σχήμα 3.8. Ολοκληρωμένο στερεό μοντέλο ελικοειδούς εργαλείου κωνικής κορυφής

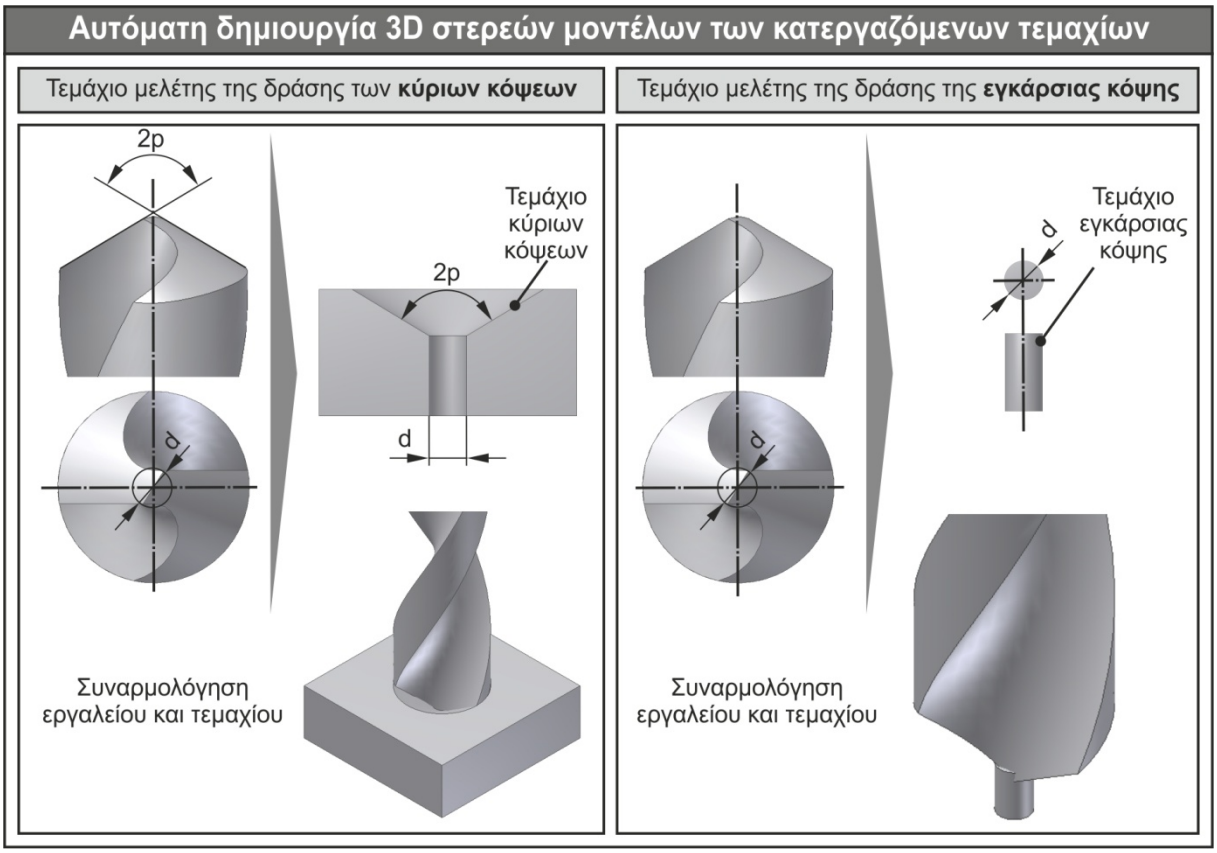
3.4. Δημιουργία 3D στερεών μοντέλων των κατεργαζόμενων τεμαχίων

Στο σημείο αυτό επιλέχθηκε, να διαχωριστεί η δράση των κύριων κόψεων και αυτή της εγκάρσιας κόψης. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μεγαλύτερος έλεγχος του φόρτου των υπολογισμών που αναλαμβάνει το σύστημα CAD/CAM, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπεται ο υπολογισμός των δυνάμεων που αντιστοιχούν στις κόψεις ξεχωριστά. Αυτό αποδείχθηκε στη συνέχεια μεγάλο πλεονέκτημα, αφού κατά την εκτέλεση των πειραμάτων απαιτείται η εκτέλεση ζευγών πειραμάτων, ώστε να γίνει δυνατός ο υπολογισμός των δυνάμεων. Επίσης, με την εκτέλεση μιας μόνο φοράς της προσομοίωσης, είναι δυνατόν να παραχθούν όλα τα στερεά μοντέλα των απαραμόρφωτων αποβλίττων, ταυτόχρονα για κάθε κόψη ξεχωριστά και επομένως να υπολογιστούν ταυτόχρονα, η δράση όλων των κόψεων που συμμετέχουν.

Όσον αφορά το δοκίμιο που συσχετίζεται με τις κύριες κόψεις, επιλέχθηκε να έχει διαμορφωμένη την κοιλότητα που φαίνεται στο σχήμα 3.9, ώστε να προσεγγίζεται γρηγορότερα η μόνιμη κατάσταση της προσομοίωσης. Η διάμετρος του πυρήνα του εργαλείου διαβάζεται αυτόματα και έτσι δημιουργείται η διαμόρφωση της κεντρικής οπής στο τεμάχιο. Επίσης με την αναγνώριση της γωνίας κορυφής σε συνδυασμό με τη διάμετρο του πυρήνα, διαμορφώνεται ο κώνος που απαιτείται να αφαιρεθεί. Στο πάνω μέρος του κατεργαζόμενου τεμαχίου η διάμετρος που προκύπτει είναι ίση με τη διάμετρο του εργαλείου.

Στην περίπτωση που το εργαλείο τοποθετείται στην κορυφή του χωρίς διαμόρφωση τεμαχίου, απαιτείται μεγάλος αριθμός βημάτων προσομοίωσης, ώστε το εργαλείο να εισχωρήσει μέσα σε αυτό και να παραχθεί απόβλιττο μόνιμης κατάστασης. Αυτό θα μπορούσε όχι μόνο να καθυστερήσει σε υπερβολικό βαθμό την παρούσα προσομοίωση, αλλά και να δημιουργήσει προβλήματα υπολογισμού των αποβλίττων, εξαιτίας υπερβολικά μεγάλης πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των μοντέλων των κατεργασμένων τεμαχίων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όσο περισσότερα βήματα προχωρά η προσομοίωση, τόσο ο χρόνος

που απαιτείται για την εκτέλεση των Boolean πράξεων αυξάνεται σημαντικά για την εκτέλεση του καθενός ξεχωριστά.



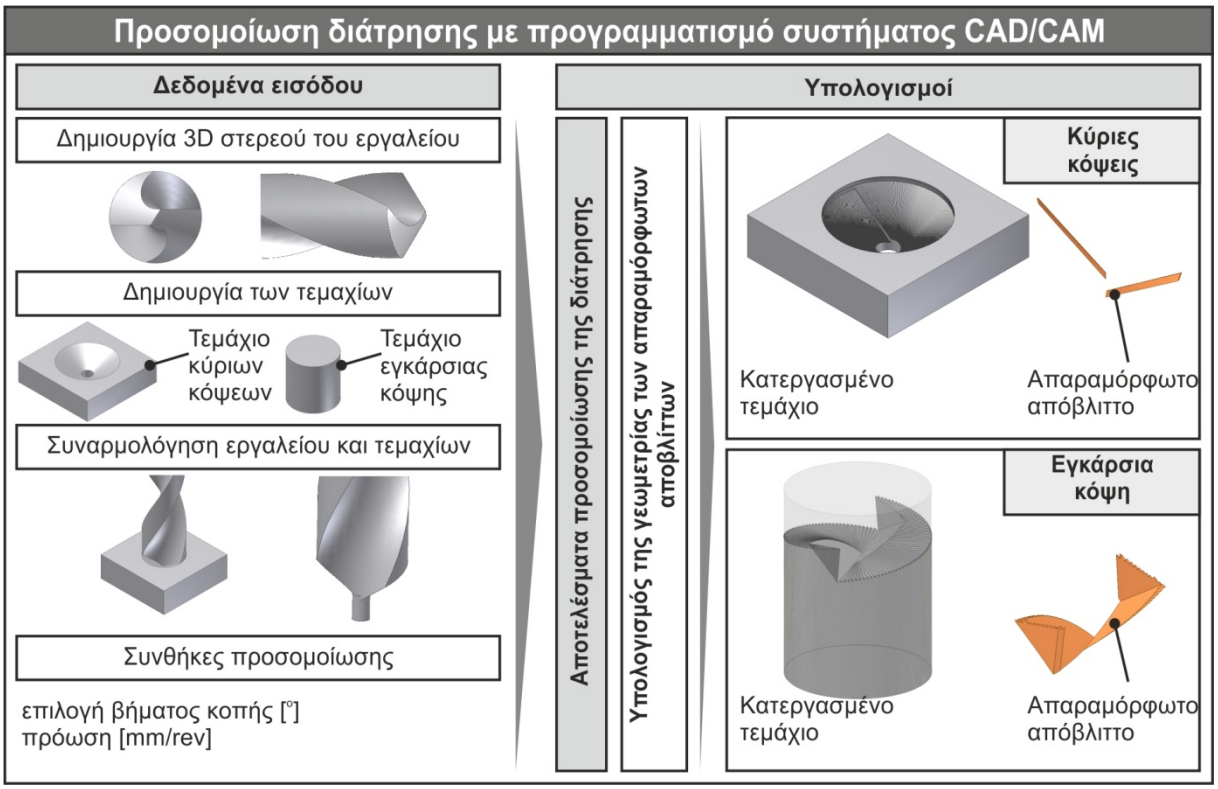
Σχήμα 3.9. Δημιουργία των κατεργαζόμενων τεμαχίων από τα χαρακτηριστικά του εργαλείου

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται, ότι το δοκίμιο που χρησιμοποιείται για την μελέτη της εγκάρσιας κόψης, αποτελείται από μια απλή κυλινδρική γεωμετρία. Η διάμετρός του είναι ίση με την διάσταση της εγκάρσιας κόψης και ο κύλινδρος είναι ίσος με αυτόν που αφαιρέθηκε από το προηγούμενο δοκίμιο των κύριων κόψεων.

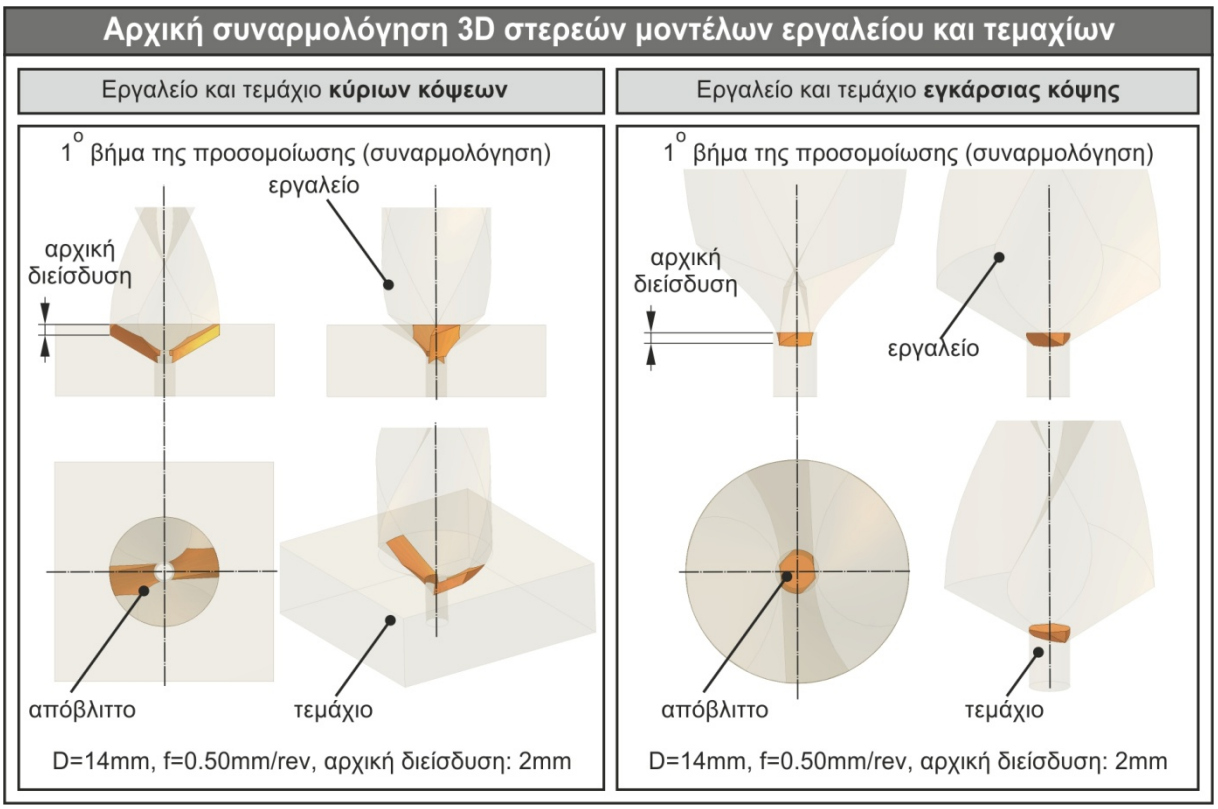
3.5. Προσομοίωση της διείσδυσης του εργαλείου στα κατεργαζόμενα τεμάχια

Αφού έχουν δημιουργηθεί τα 3D στερεά μοντέλα του εργαλείου και των τεμαχίων, απαιτείται να προσομοιωθεί η διείσδυση του εργαλείου και η παραγωγή των αποβλίττων, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κοπής που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση. Έτσι λαμβάνει χώρα κατάλληλη συναρμολόγηση των στερεών, ώστε διαδοχικά, μετά την εκτέλεση των πράξεων Boolean, να προκύψουν τα στερεά μοντέλα τόσο των κατεργασμένων τεμαχίων ανά βήμα, όσο και των αντίστοιχων απαραμόρφωτων αποβλίττων (σχήμα 3.10).

Στη συνέχεια επιλέγονται οι αρχικές συνθήκες για την τοποθέτηση του εργαλείου κοντά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Σε αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί, ότι θα πρέπει οι αποστάσεις αυτές να είναι κατάλληλα επιλεγμένες, ώστε να μην απαιτούνται επιπλέον πολύ περισσότερα βήματα μέχρι να επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση και να αποφεύγονται αρχικά βήματα προσομοίωσης χωρίς πραγματική κοπή. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προγραμματισμό της διείσδυσης κατά το πρώτο βήμα προσομοίωσης, με τιμή ικανή να φέρει το εργαλείο αρκετά μέσα στο τεμάχιο, ώστε η κοπή να ξεκινήσει κατευθείαν.



Σχήμα 3.10. Απαραίτητα στάδια για την εικονική διείσδυση του εργαλείου στα τεμάχια



Σχήμα 3.11. Συναρμολόγηση εργαλείων και κατεργαζόμενων τεμαχίων

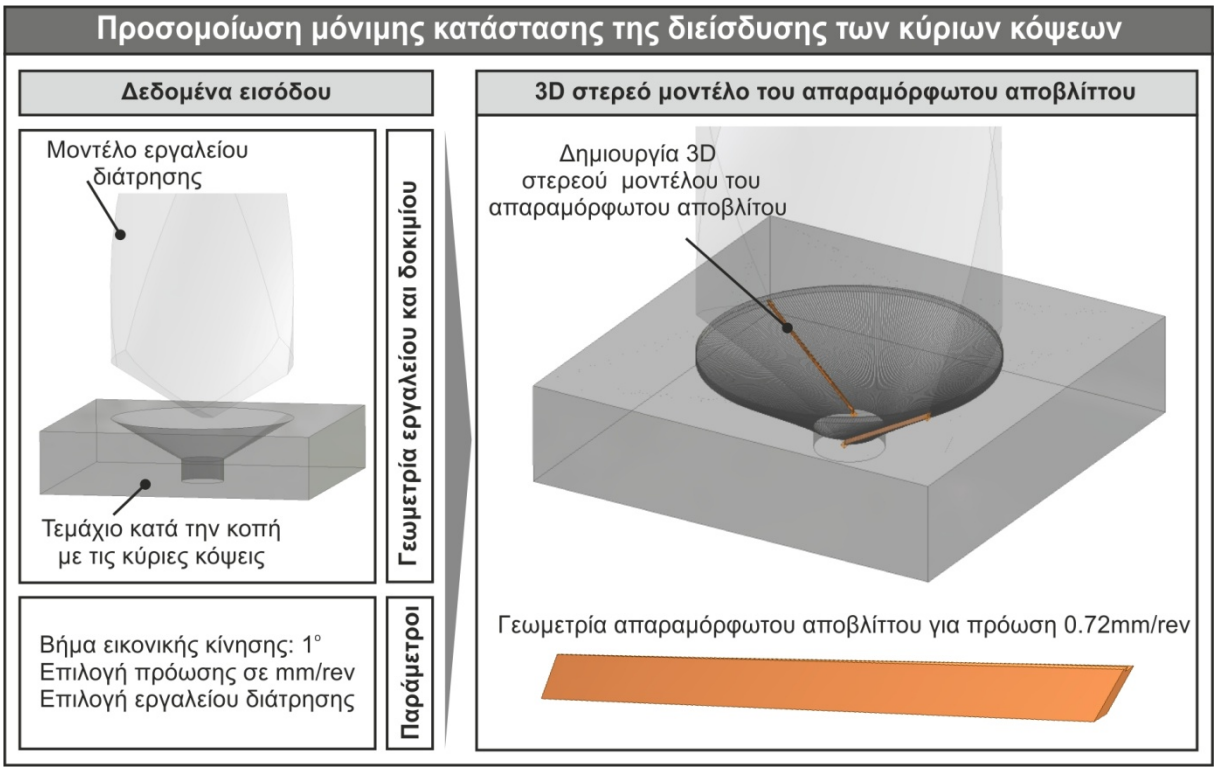
Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η τοποθέτηση του εργαλείου με μια αρχική διείσδυση ίση με 2mm, για ένα εργαλείο με διάμετρο 14mm και πρόωση 0.50mm/rev, τόσο για τις κύριες κόψεις, όσο και για την εγκάρσια κόψη. Και στις δύο περιπτώσεις παράγεται κατευθείαν απόβλιττο, σε ικανό βάθος, ώστε στην συνέχεια με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό βημάτων προσομοίωσης, να είναι δυνατή η προσέγγιση της μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η χρησιμοποιούμενη πρόωση είναι σχετικά μικρή θα πρέπει η παράμετρος της αρχικής διείσδυσης να επιλεγεί μεγαλύτερη.

Στην περίπτωση των κυρίων κόψεων, για την επίτευξη της μόνιμης κατάστασης απαιτείται περιστροφή τουλάχιστον 180°, έτσι ώστε να έχει εισχωρήσει το εργαλείο μέσα στο δοκίμιο και να έχουν διαμορφωθεί τα κατεργασμένα δοκίμια κατά τη διάρκεια των προηγούμενων βημάτων. Αυτό ισχύει, διότι η πρώτη κόψη πραγματοποιεί σε κάθε πλευρά το ένα πέρασμα και στην συνέχεια, η δεύτερη κόψη έρχεται να συνεχίσει την αποστολή της πρώτης. Για την εγκάρσια κόψη ισχύουν τα ίδια, εάν υποθέσει κανείς ότι μπορεί η δράση της ενιαίας εγκάρσιας κόψης, να θεωρηθεί όμοια, με την δράση των δύο μισών κόψεων της (με σημείο διαχωρισμού την κορυφή του εργαλείου).

Κάθε φορά συναρμολογείται τόσο το δοκίμιο που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα όσο και το εργαλείο (με την κατάλληλη γωνία περιστροφής και μετακίνηση εισχώρησης προς το τεμάχιο), ώστε να δημιουργηθούν οι γεωμετρίες του επόμενου βήματος. Σε κάθε βήμα επιλέγεται η Boolean αφαίρεση της γεωμετρίας του εργαλείου που έχει εισχωρήσει στο χρησιμοποιούμενο τεμάχιο και έτσι επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του 3D στερεού μοντέλου του επόμενου τεμαχίου. Επίσης εκτελείται και μια Boolean τομή, μεταξύ των ίδιων στερεών, ώστε να υπολογιστεί το 3D στερεό μοντέλο του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Στο τέλος κάθε βήματος, υπολογίζονται οι διαστάσεις του διαδοχικού απαραμόρφωτου αποβλίττου και έτσι συγκρίνονται με αυτές του προηγουμένου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί η αναγνώριση του βήματος, όπου έχει επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση, αφού τότε τα δύο διαδοχικά μοντέλα αποβλίττου θα έχουν το ίδιο μέγεθος. Στη συνέχεια οι βασικές διαστάσεις των στερεών μοντέλων αναγνωρίζονται αυτόματα και έτσι δίνεται η δυνατότητα περαιτέρω χρήσης τους για υπολογισμούς δυνάμεων. Το κάθε φορά νέο στερεό μοντέλο του κατεργασμένου τεμαχίου χρησιμοποιείται μαζί με το εργαλείο (στη νέα του θέση), ώστε να υπολογιστεί το επόμενο στη σειρά στερεό μοντέλο του κατεργασμένου τεμαχίου.

Ύστερα από σειρά διαδοχικών δοκιμών και λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογιστικούς περιορισμούς του συστήματος CAD/CAM, προτάθηκαν ως βέλτιστες τιμές για το βήμα που ακολουθεί κάθε φορά το εργαλείο, κατά τη διείσδυση του στο τεμάχιο, να χρησιμοποιείται για την μεν περίπτωση των κυρίων κόψεων η μία έως δύο μοίρες, ενώ για την περίπτωση της εγκάρσιας κόψης να χρησιμοποιούνται οι τρεις έως πέντε μοίρες. Αυτό σημαίνει ότι συνδυάζονται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, χωρίς να εμφανίζονται υπολογιστικά προβλήματα με το CAD/CAM σύστημα, αφού σε αρκετές περιπτώσεις το μέγεθος του αποβλίττου είναι πάρα πολύ μικρό και ταυτόχρονα η γεωμετρία του υπερβολικά πολύπλοκη. Με την χρήση αυτών των τιμών επιτυγχάνεται επίσης, η βελτιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης της προσομοίωσης, η οποία μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα απαιτητική από πλευράς υπολογιστικής ισχύος.

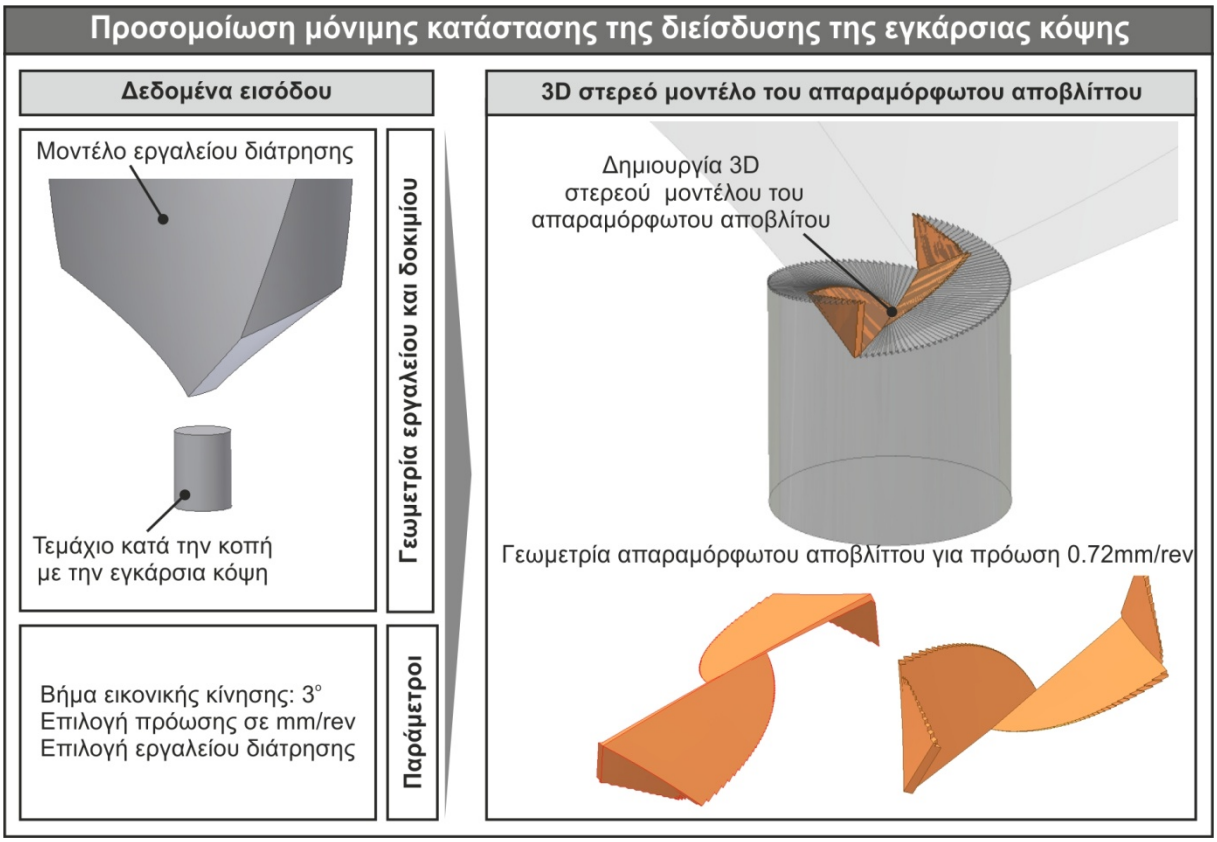
Στο σχήμα 3.12 φαίνονται παραστατικά τόσο η τοποθέτηση στο χώρο των 3D στερεών μοντέλων του εργαλείου και του τεμαχίου για την μελέτη της κοπής των κυρίων κόψεων, όσο και με πορτοκαλί χρωματισμό, ο υπολογισμός της γεωμετρίας του μόνιμης κατάστασης απαραμόρφωτου αποβλίττου. Το βήμα της εικονικής κίνησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1°, ενώ ενδεικτικά φαίνεται σε μεγέθυνση η γεωμετρία του αποβλίττου που προκύπτει για την περίπτωση που χρησιμοποιείται πρόωση 0.72mm/rev.



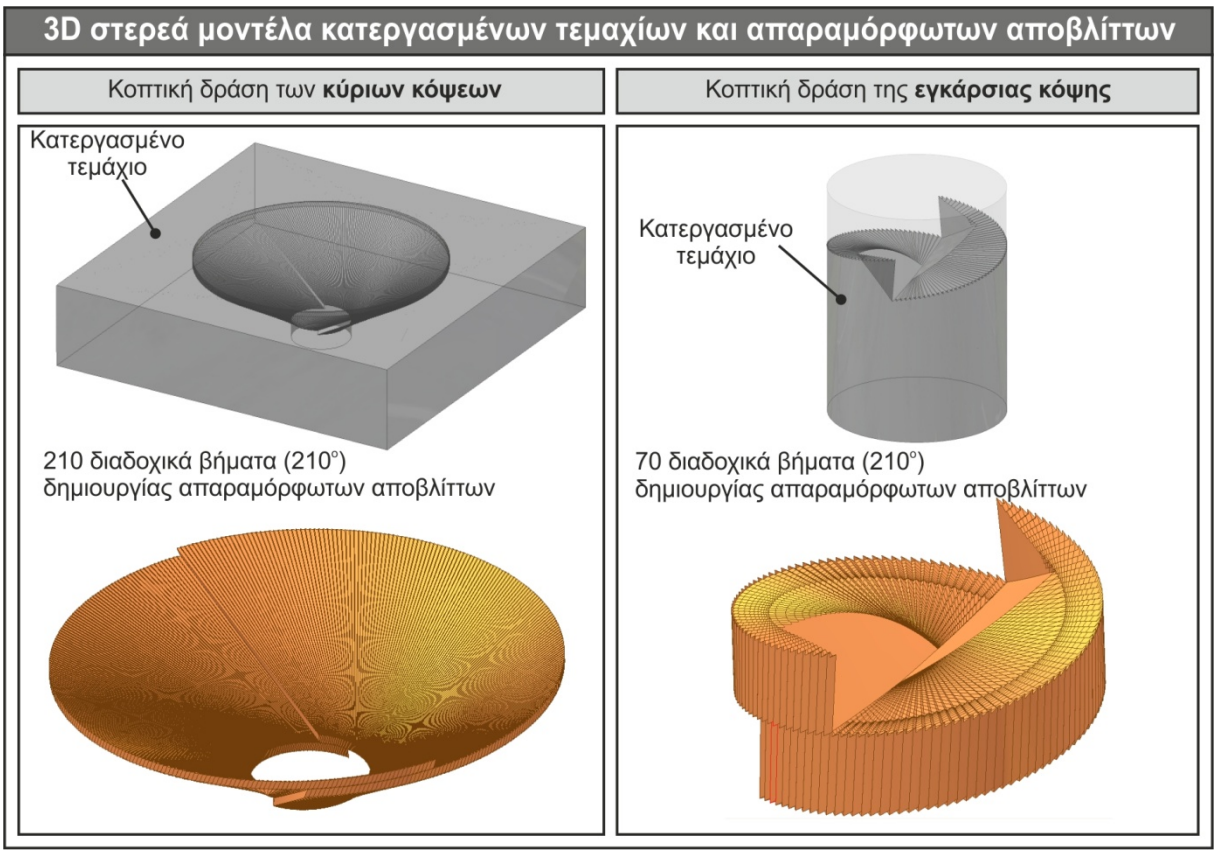
Σχήμα 3.12. Προσομοίωση της σταθερής κατάστασης κατά τη διείσδυση των κυρίων κόψεων

Κατά τον ίδιο τρόπο, στο σχήμα 3.13 φαίνεται η τοποθέτηση στο χώρο των 3D στερεών μοντέλων του εργαλείου και του τεμαχίου, για τη μελέτη της κοπής της εγκάρσιας κόψης. Επίσης με πορτοκαλί ξεχωρίζει η γεωμετρία του υπολογιζόμενου 3D στερεού αποβλίττου, ενώ δίνεται η δυνατότητα για κοντινή παρατήρηση αυτής της γεωμετρίας στην περίπτωση που η πρόωση λαμβάνει την τιμή 0.72mm/rev. Το βήμα της εικονικής κίνησης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την περίπτωση ήταν 3°.

Στο σχήμα 3.14 φαίνεται μια σειρά από απόβλιττα που προέκυψαν από τη δράση τόσο των κύριων κόψεων, όσο και της εγκάρσιας κόψης. Επιλέχθηκε η συναρμολόγηση των διαδοχικών στερεών μοντέλων αποβλίττων σε μια γωνία 210°, ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η προτεινόμενη μεθοδολογία. Εκτός από τη δυνατότητα που δίνεται για να μελετηθούν τα απόβλιττα που προκύπτουν, επιπλέον κρατούνται αποθηκευμένα και τα προκύπτοντα στερεά μοντέλα των κατεργαζόμενων τεμαχίων για τις δύο περιοχές κοπής και για κάθε βήμα. Αυτό γίνεται γιατί κάθε επόμενο τεμάχιο που υπολογίζεται, βασίζεται στο τεμάχιο που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης.

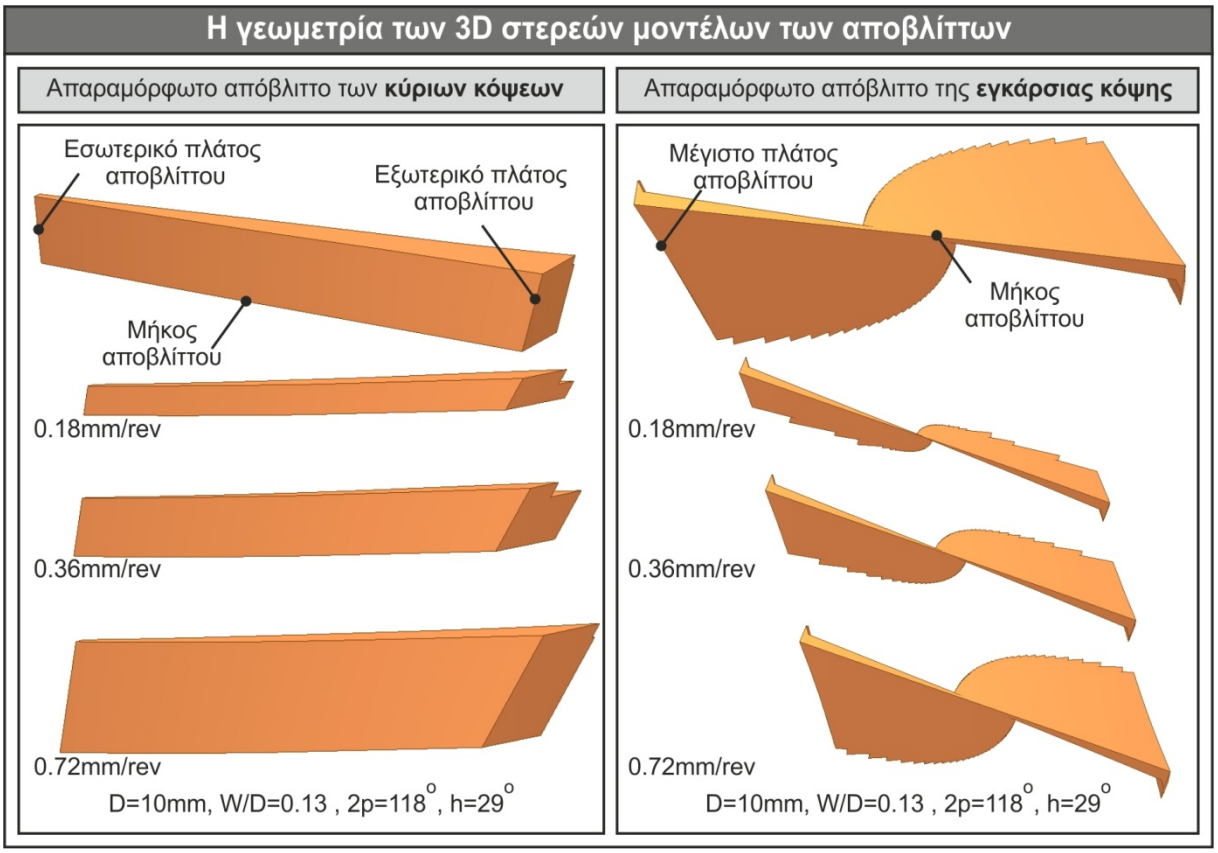


Σχήμα 3.13. Προσομοίωση της σταθερής κατάστασης κατά τη διείσδυση της εγκάρσιας κόψης



Σχήμα 3.14. 3D στερεά μοντέλα των κατεργασμένων τεμαχίων και των απαραμόρφωτων αποβλίττων

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται ταυτόχρονα η γεωμετρική μορφή των αποβλίττων των κύριων κόψεων αλλά και των αποβλίττων της εγκάρσιας κόψης, και οι μετέπειτα χρησιμοποιούμενες διαστάσεις μήκους και εύρους τους, για τις δύο περιπτώσεις. Το χρησιμοποιούμενο εργαλείο έχει διάμετρο 10mm, διάμετρο πυρήνα 1.3mm, γωνία κορυφής 118° και γωνία ελίκωσης 29°. Χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τιμές πρόωσης με το ίδιο εργαλείο (0.18, 0.36 και 0.72mm/rev), φαίνεται η μεταβολή της γεωμετρίας που προκύπτει. Στις διαδοχικές αυτές περιπτώσεις, το εργαλείο διεισδύει περισσότερο σε κάθε βήμα (με την αύξηση της πρόωσης) και το απόβλιττο έχει σημαντικά μεγαλύτερο πλάτος, ενώ το μήκος του παραμένει σταθερό.



Σχήμα 3.15. Οι διαστάσεις μήκους και πλάτους των απαραμόρφωτων αποβλίττων

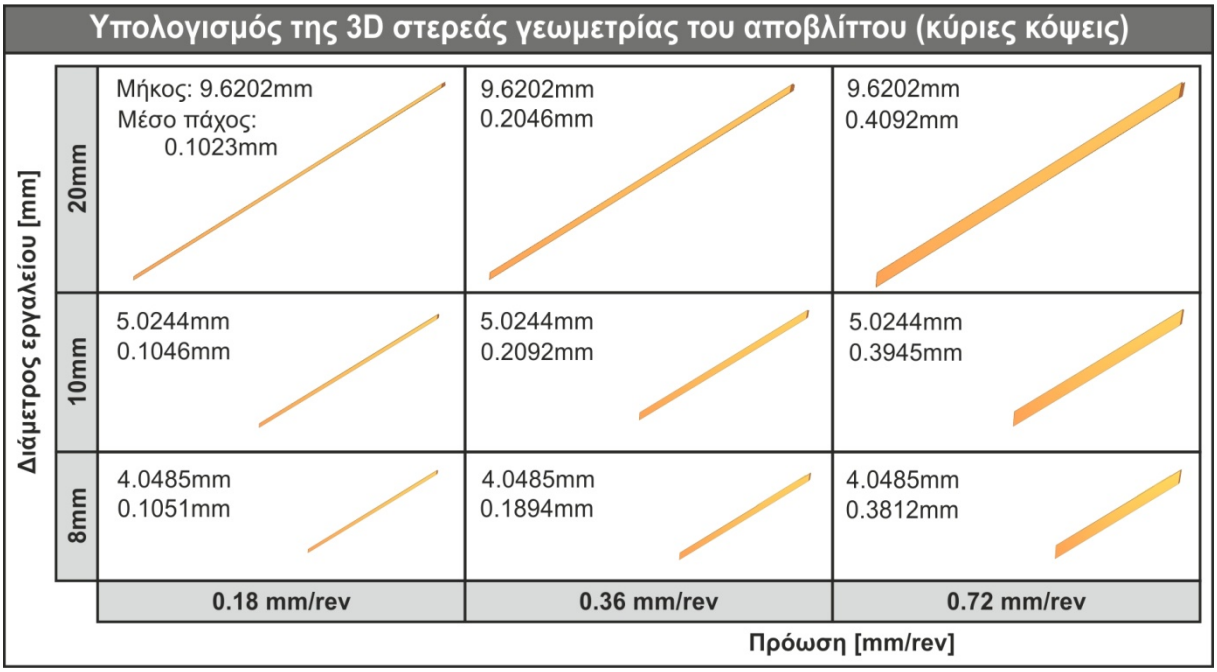
Χρησιμοποιώντας μια σειρά από τρία εργαλεία και τρεις διαφορετικές προώσεις, προέκυψαν μια σειρά από γεωμετρίες και διαστάσεις αποβλίττων για όλες τις κόψεις που εμπλέκονται. Στα σχήματα 3.16 και 3.17 φαίνεται καθαρά ότι:

- το μήκος των αποβλίττων δεν επηρεάζεται από την αλλαγή στην χρησιμοποιούμενη πρόωση, κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού τα εργαλεία παραμένουν με σταθερό μήκος κόψης και
- όλες οι τιμές του πλάτους του απαραμόρφωτου αποβλίττου ακολουθούν την αύξηση της πρόωσης.

Στην περίπτωση των κύριων κόψεων επιλέχθηκε το μέσο εύρος, δηλαδή το ημιάθροισμα του εσωτερικού και του εξωτερικού πλάτους αποβλίττου, αφού υπάρχει διαφορά στο πλάτος του αποβλίττου, όταν αυτό μελετάται πιο κοντά στο κέντρο. Η αιτία γι' αυτό είναι η ελικοειδής μορφή της επιφάνειας αποβλίττου των χρησιμοποιούμενων εργαλείων. Αλλά και στην περίπτωση του αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης εμφανίζεται διαφοροποίηση του πλάτους, εξαιτίας της γεωμετρίας της κορυφής, και επομένως χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή του που είναι αυτή που βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά.

Στο σχήμα 3.16 ενώ φαίνεται καθαρά η αύξηση του μέσου πλάτους του αποβλίττου, με την αύξηση της πρόωσης, όταν εξετάζεται το μέγεθος αυτό σε συνδυασμό με την αύξηση της διαμέτρου του εργαλείου, δεν είναι άμεσα σαφής η επίδραση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέσο πλάτος του αποβλίττου εξαρτάται από δύο βασικά χαρακτηριστικά που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

- την τιμή της πρόωσης που χρησιμοποιήθηκε και
- τη συνεχώς μεταβαλλόμενη γωνία αποβλίττου κατά μήκος της κύριας κόψης. Όσο μικρότερη διάμετρος χρησιμοποιείται, τόσο η ελικοειδής μορφή της μεταβάλλεται γρηγορότερα, αφού τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν σταθερό λόγο W/D (διάμετρος πυρήνα προς διάμετρο εργαλείου).

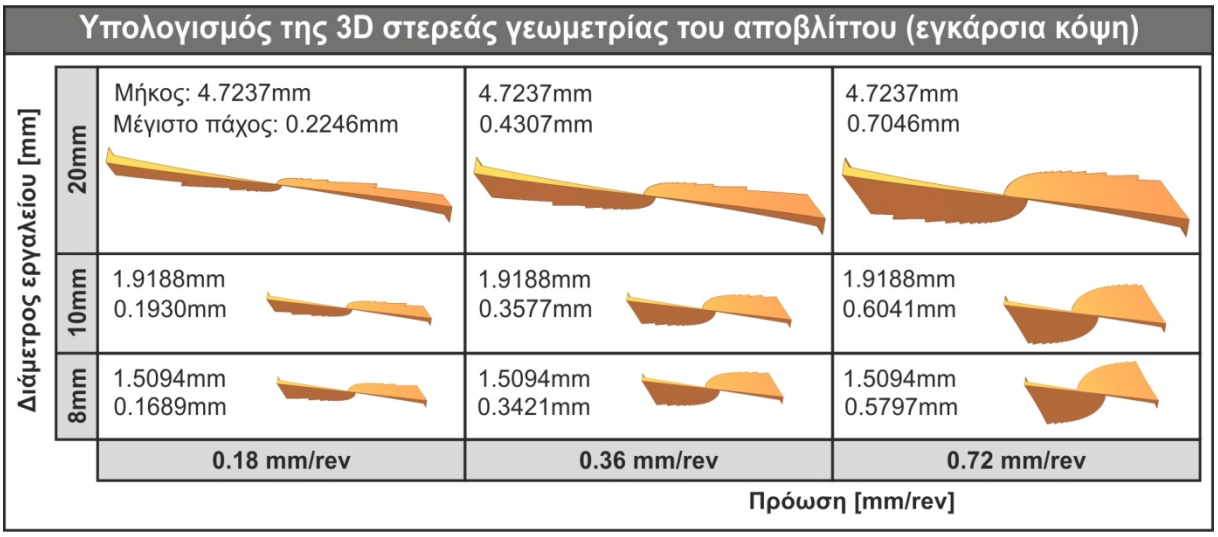


Σχήμα 3.16. Υπολογισμός της 3D γεωμετρίας του αποβλίττου των κύριων κόψεων

Αντίστοιχα στο σχήμα 3.17 το μέγιστο πλάτος αποβλίττου αυξάνεται:

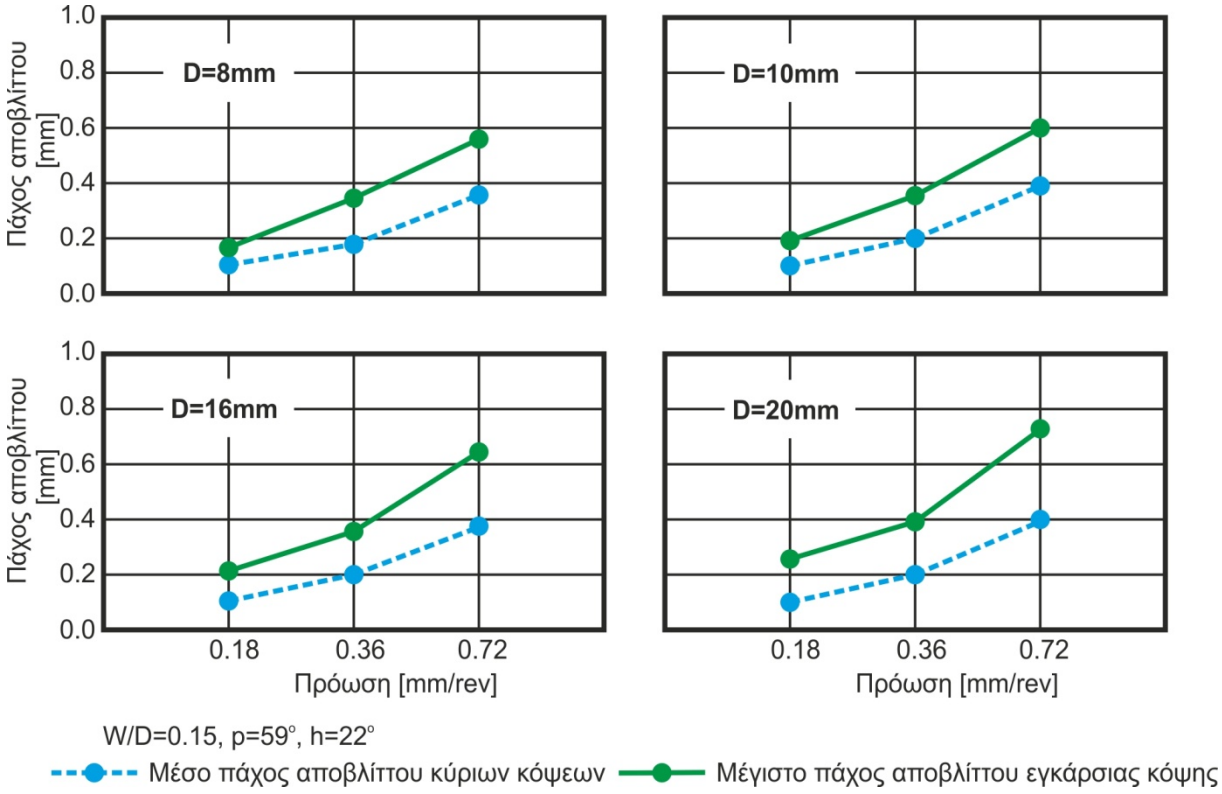
- με την αύξηση της πρόωσης και
- με την αύξηση της διαμέτρου του εργαλείου από 8 σε 10 και τελικά 20 mm. Αυτό συμβαίνει, διότι επικρατεί ο μηχανισμός αύξησης του μεγέθους του πυρήνα, αφού ισχύει και εδώ ότι τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν σταθερό λόγο W/D.

Ακολουθεί ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός πειραμάτων, για μεγάλο αριθμό διαφορετικών εργαλείων με τρεις διαφορετικές προώσεις το καθένα (0.18 mm/rev, 0.36 mm/rev και 0.72 mm/rev), ώστε να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής των γεωμετρικών παραμέτρων τους στις διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Κάθε ένα από τα επόμενα τέσσερα σχήματα παρουσιάζει το πάχος του αποβλίττου και στις δύο περιοχές της κοπτικής δράσης (κύριες και εγκάρσια κόψεις) για τέσσερα διαφορετικά εργαλεία και τρείς διαφορετικές προώσεις το καθένα. Σε όλα τα σχήματα το μέσο πάχος αποβλίττου των κύριων κόψεων και το μέγιστο πάχος αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης, αυξάνονται με την αύξηση της πρόωσης, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο.



Σχήμα 3.17. Υπολογισμός της 3D στερεάς γεωμετρίας του αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης

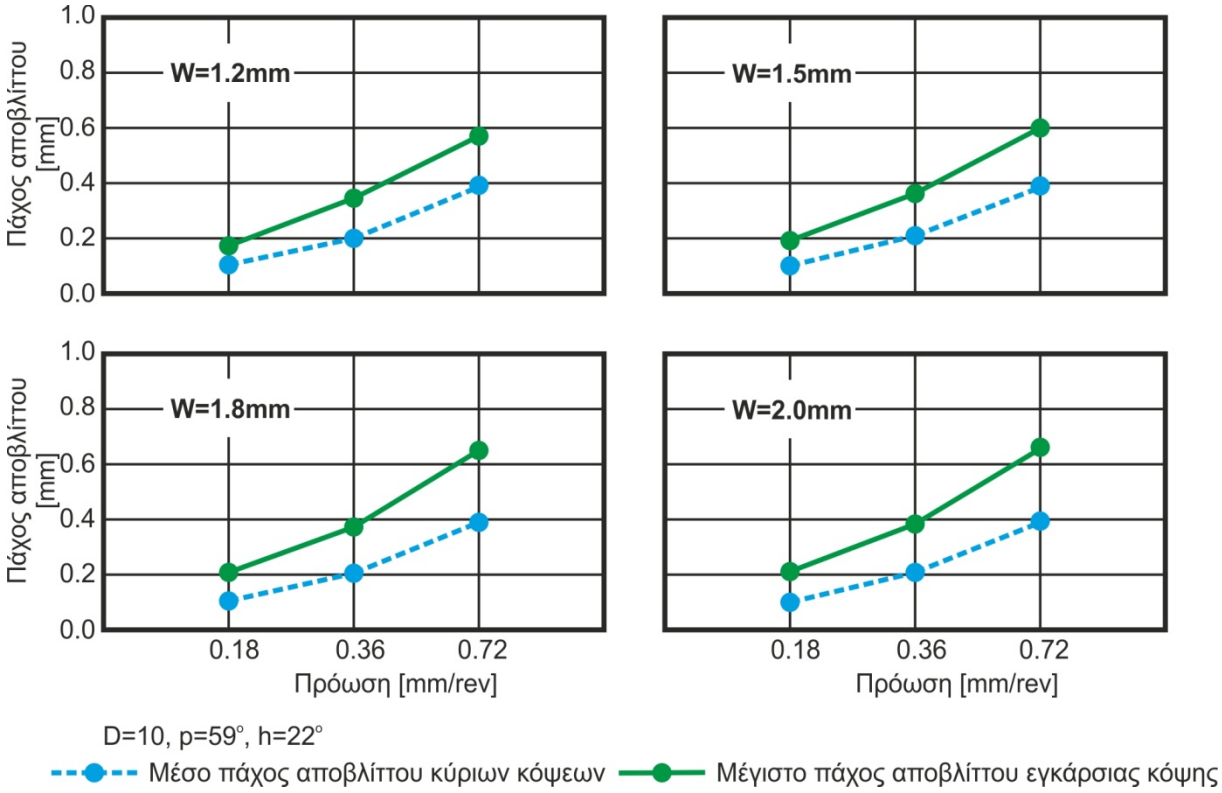
Στο σχήμα 3.18 φαίνεται η επίδραση της διαμέτρου του εργαλείου (8mm, 10mm, 16mm και 20mm) στο μέγεθος των αποβλίττων, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς τη διάμετρο εργαλείου έχει τιμή 0.15, η γωνία κορυφής είναι ίση με 118° και η γωνία ελικώσεως είναι ίση με 22°. Η αλληλεπίδραση που έχει στα απόβλιτα των κυρίων κόψεων, η συνεχής μεταβολή της γωνίας αποβλίττου κατά μήκος της κόψης και η χρησιμοποιούμενη πρόωση είναι εμφανής, αφού δεν είναι δυνατόν να αποφανθεί κανείς για το είδος της επίδρασης άμεσα. Αυτό συμβαίνει όταν τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία έχουν σταθερό λόγο διαμέτρου πυρήνα προς διάμετρο εργαλείου.



Σχήμα 3.18. Επίδραση της διαμέτρου του εργαλείου στο πάχος του αποβλίττου

Αντίθετα, στην περίπτωση της εγκάρσιας κόψης, το μέγιστο πάχος του αποβλίττου αυξάνεται, κυρίως εξαιτίας της σταθερότητας του λόγου W/D που ισχύει για κάθε εργαλείο και έχει σαν αποτέλεσμα την καθ' αναλογία με την αύξηση της διαμέτρου, αύξηση της διαμέτρου του πυρήνα. Η σημαντική αυτή αύξηση, σημαίνει και σημαντική αύξηση της προκύπτουσας δύναμης κοπής στο εργαλείο, και δικαιολογεί την πρακτική των κατασκευαστών τρυπανιών για όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή του λόγου W/D στα προϊόντα τους.

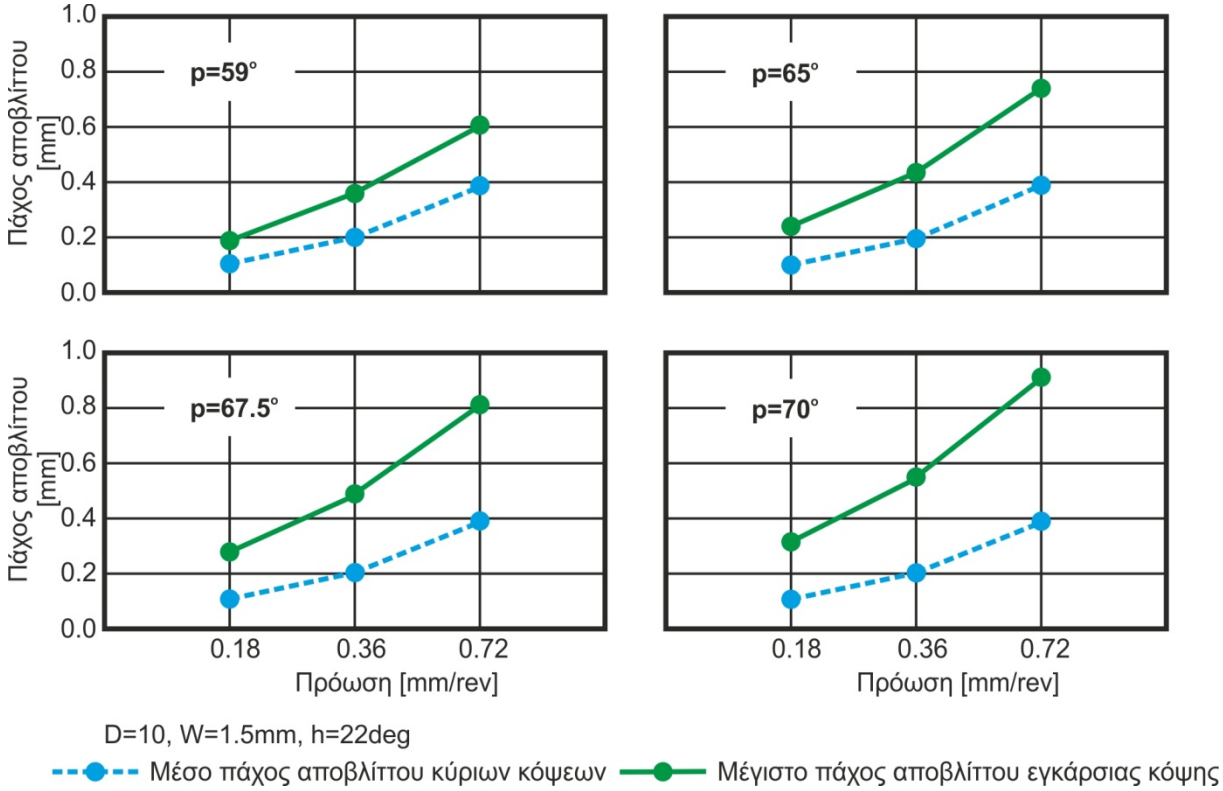
Στο σχήμα 3.19 φαίνεται η επίδραση του μεγέθους του πυρήνα (1.2mm, 1.5mm, 1.8mm και 2mm) στο μέγεθος των αποβλίττων, όταν ισχύει ότι το εργαλείο σε κάθε περίπτωση έχει διάμετρο ίση με 10mm, γωνία κορυφής 118° και γωνία ελικώσεως 22°. Όταν ο πυρήνας μεγαλώνει η κοπτική δράση των κύριων κόψεων παραμένει σχεδόν σταθερή, αφού δεν υπάρχει σημαντική επίδραση αυτής της παραμέτρου στη γεωμετρία τους. Οι τιμές του μεγέθους του πυρήνα βασίστηκαν στις προτεινόμενες τιμές του λόγου W/D από τους κατασκευαστές τρυπανιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μετακίνηση των κύριων κοπτικών ακμών στο χώρο είναι πολύ μικρές κι έτσι δεν εμφανίζονται αξιοπρόσεκτες μεταβολές στα υπολογιζόμενα απόβλιττα. Αντίθετα στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης, το μέγεθος του αποβλίττου αυξάνεται σημαντικά. Αυτό επιβεβαιώνει πάλι την προσπάθεια των κατασκευαστών τρυπανιών, για όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος πυρήνα, αφού όπως έχει αναφερθεί, η κοπή στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης είναι εξώθηση παρά κοπή αυτή καθ' αυτή, με αποτέλεσμα να δημιουργεί μεγάλη δύναμη κοπής κατά την διάτρηση.



Σχήμα 3.19. Επίδραση του μεγέθους του πυρήνα του εργαλείου στο πάχος του αποβλίττου

Στο σχήμα 3.20 φαίνεται η επίδραση της ημιγωνίας κορυφής (59°, 65°, 67.5° και 70°) στο μέγεθος των αποβλίττων. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαμέτρου 10mm, μεγέθους πυρήνα ίσο με 1.5mm (δηλαδή W/D=0.15) και γωνίας ελικώσεως 22°. Το μέγεθος των αποβλίττων των κύριων κόψεων δεν επηρεάζονται από την αλλαγή της ημιγωνίας κορυφής, αφού δεν επηρεάζεται σημαντικά η γεωμετρία των κόψεων. Η αλλαγή της ημιγωνίας κορυφής επιδρά περισσότερο στην επιφάνεια ελευθερίας τους, παρά στην αντίστοιχη επιφάνεια αποβλίττου τους, από την οποία προέρχεται και το μέγεθος του πάχους

του αποβλίττου σε αυτές τις κόψεις. Αντίθετα, εμφανίζεται μια πολύ μεγάλη αλλαγή στο απόβλιττο της εγκάρσιας κόψης, καθώς όσο αυξάνει η ημιγωνία κορυφής, τόσο το εργαλείο γίνεται λιγότερο μυτερό. Τα πιο πολλά γενικής χρήσης εργαλεία διάτρησης με κωνική κορυφή που κυκλοφορούν στο εμπόριο, έχουν τιμή γωνίας κορυφής ίση με 118°.

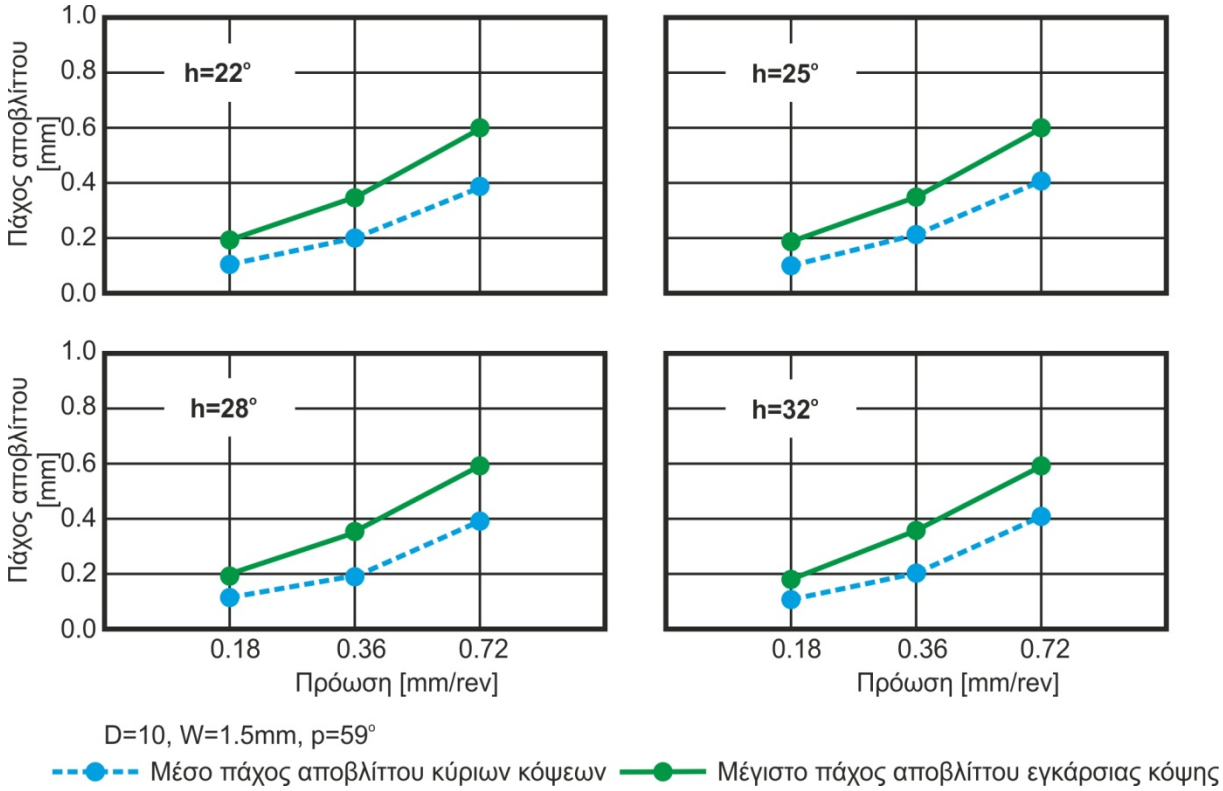


Σχήμα 3.20. Επίδραση της ημιγωνίας κορυφής του εργαλείου στο πάχος του αποβλίττου

Στο σχήμα 3.21 αναδεικνύεται η επίδραση της γωνίας ελίκωσης (22°, 25° , 28° και 32°) στο μέγεθος των αποβλίττων. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαμέτρου 10mm, μεγέθους λόγου διαμέτρου πυρήνα προς διαμέτρου εργαλείου ίσο με 0.15 και γωνία κορυφής 118°. Η αλλαγή της γωνίας ελίκωσης δεν επηρεάζει με κάποιον τρόπο τη γεωμετρία της κορυφής του εργαλείου, οπότε όπως αναμενόταν δεν υπήρξε καμία αλλαγή στα αντίστοιχα απόβλιττα. Από την άλλη μεριά, εμφανίζεται μικρή αύξηση του πάχους στα απόβλιττα των κύριων κόψεων. Αυτό συμβαίνει καθώς η μορφή της επιφάνειας αποβλίττου τους εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της γωνίας ελίκωσης. Οι ερευνητές σε πολλές περιπτώσεις δίνουν τη γωνία αποβλίττου του εργαλείου σε απόσταση ίση με την ακτίνα του, γιατί αυτή συμπίπτει με τη γωνία ελίκωσης του εργαλείου. Έτσι μεταβάλλοντας κάθε φορά αυτή τη γωνία, αλλάζει ταυτόχρονα και ο τρόπος κατανομής της γωνίας αποβλίττου κατά μήκος των κύριων κόψεων.

3.6. Αναλυτικός υπολογισμός των δυνάμεων κοπής

Ο υπολογισμός των διαστάσεων του απαραμόρφωτου αποβλίττου, πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον αναλυτικό υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά τη μηχανουργική κατεργασία της διάτρησης. Οι δυνάμεις αυτές είναι σημαντικές, τόσο για έναν κατασκευαστή εργαλειομηχανών, ώστε να καθοριστεί κατάλληλα η στιβαρότητα της σχεδιαζόμενης συσκευής, όσο και για τον χρήση, αφού έτσι είναι δυνατό να υπολογιστούν μεγέθη όπως ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου, η διάρκεια ζωής του, η απαιτούμενη ισχύς για την κατεργασία κ.λπ..



Σχήμα 3.21. Επίδραση της γωνίας ελίκωσης του εργαλείου στο πάχος του αποβλίττου

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Kienzle-Victor [178]:

$F_i=K_i bh^{(1-m)}$

όπου:

Ki: σταθερά αντίστασης στην κοπή. Μπορεί να θεωρηθεί σαν μέτρο για το απόλυτο ύψος των ανηγμένων στη διατομή του αποβλίττου δυνάμεων.

b: το μήκος της κόψης

h: το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου.

(1-m): συντελεστής που εκφράζει το μέτρο της εξάρτησης των ανηγμένων δυνάμεων από το πάχος του αποβλίττου.

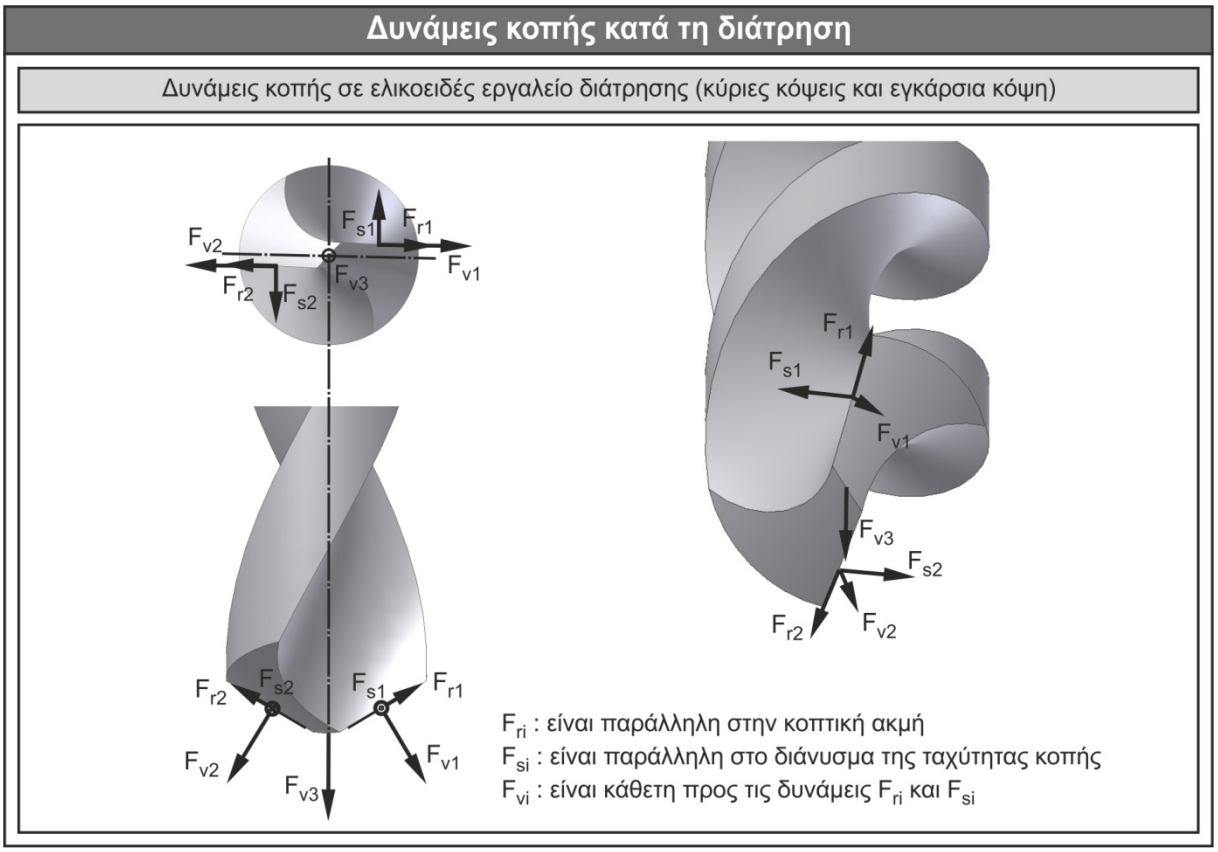
Οι προσδιορισμένες τεχνολογικές σταθερές ισχύουν για συγκεκριμένους συνδυασμούς κοπτικού εργαλείου, υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου και συνθηκών κοπής. Το πρόβλημα της αντιστοίχισης πάχους αποβλίττου και δύναμης στην περίπτωση κοπτικού εργαλείου με γωνία ελίκωσης, όπου το πάχος δεν είναι σταθερό σε κάθε θέση του εργαλείου, αντιμετωπίζεται με τη διακριτοποίηση του αποβλίττου σε μικρότερα κομμάτια και τη χρησιμοποίηση μέσων τιμών του πάχους του αποβλίττου.

Οι βασικές δυνάμεις που λαμβάνουν χώρα κατά την προσομοίωση της διάτρησης φαίνονται στο σχήμα 3.22. Σε κάθε κοπτική ακμή αναπτύσσονται τρία είδη δυνάμεων:

F_{ri}: παράλληλη με την κοπτική ακμή,

F_{si}: παράλληλη με το διάνυσμα της ταχύτητας κοπής,

F_{vi}: κάθετη στις δυνάμεις F_{ri} και F_{si}.



Σχήμα 3.22. Δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά τη κατεργασία της διάτρησης

Τα 3D στερεά μοντέλα των απαραμόρφωτων αποβλίττων που υπολογίζονται, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, διακριτοποιούνται σε μικρότερα κομμάτια με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός ακρίβειας (το ίδιο λαμβάνει χώρα και για τα δύο είδη αποβλίττων που υπολογίστηκαν). Για κάθε επιμέρους στοιχειώδες στερεό μοντέλο αναγνωρίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι που απαιτούνται και τροφοδοτείται ο τύπος του Kienzle-Victor. Πιο συγκεκριμένα και οι δύο παράμετροι b και h αναγνωρίζονται απευθείας, ενώ η επιλογή των κατάλληλων σταθερών γίνεται με βάση δημοσιευμένα δεδομένα [179]. Το αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός της δύναμης της κοπής για τις δύο ξεχωριστές περιοχές του εργαλείου, αθροίζοντας διανυσματικά όλες τις επιμέρους δυνάμεις που υπολογίστηκαν. Πιο συγκεκριμένα η δύναμη της κοπής για κάθε στοιχειώδες μοντέλο αποβλίττου προκύπτει για την μεν κύρια κόψη από το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών των δυνάμεων F_{ri} και F_{vi} πάνω στον άξονα του εργαλείου:

$$F_{i_KK}=F_{vi_KK}\cos(90\text{-}p)-F_{ri_KK}\cos(p)$$

όπου:

F_{i_KK}: η συνολική δύναμη κοπής του i στοιχειώδους αποβλίττου της κύριας κόψης.

F_{ri_KK}: η παράλληλη με την κοπτική ακμή, δύναμη κοπής του i στοιχειώδους αποβλίττου της κύριας κόψης.

F_{vi_KK}: η κάθετη στις δυνάμεις F_{ri} και F_{si} δύναμη κοπής του i στοιχειώδους αποβλίττου της κύριας κόψης.

p: η ημιγωνία κορυφής του εργαλείου.

για την δε εγκάρσια κόψη είναι ίση με:

$F_{j_EK}=F_{vj_EK}$

όπου:

F_{j_EK}: η συνολική δύναμη κοπής του j στοιχειώδους αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης.

F_{vj_EK}: η κάθετη στις δυνάμεις F_{rj} και F_{sj} δύναμη κοπής του j στοιχειώδους αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης.

Στην περίπτωση των κύριων κόψεων δεν απαιτείται η χρήση της F_{si_KK}, αφού η διεύθυνσή της, είναι σε επίπεδο κάθετο προς τον άξονα του εργαλείου. Επίσης το αποτέλεσμα της συνολικής δύναμης κοπής που προκύπτει, θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί δύο, αφού υπάρχουν δύο κοπτικές ακμές συμμετρικά τοποθετημένες στο χώρο.

Στην περίπτωση της εγκάρσιας κόψης, και με αμελητέα επίπτωση στην ακρίβεια υπολογισμού των δυνάμεων, θεωρείται ότι η F_{vj_EK}, είναι η μοναδική συνιστώσα που συνεισφέρει στη δημιουργία της συγκεκριμένης δύναμης κοπής. Αυτό είναι αληθές, αφού η γεωμετρία της εγκάρσιας κόψης είναι σχεδόν επίπεδη και επομένως οι υπόλοιπες συνιστώσες των δυνάμεων που αναπτύσσονται τείνουν στο μηδέν. Η συνολική δύναμη λοιπόν που αναπτύσσεται, μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα των στοιχειωδών δυνάμεων, τόσο για τις κύριες κόψεις όσο και για την εγκάρσια με την επόμενη εξίσωση:

$$F_{z_total}=2\sum_{1}^{n} F_{i_KK}+\sum_{1}^{m} F_{j_EK}=F_{KK}+F_{EK}$$

όπου:

F_{z_total}: η συνολική υπολογιζόμενη δύναμη της κοπής του εργαλείου, που προκύπτει ως αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων κοπής των κόψεων.

n: ο αύξων αριθμός των i χρησιμοποιούμενων στοιχειωδών αποβλίττων της κύριας κόψης.

m: ο αύξων αριθμός των j χρησιμοποιούμενων στοιχειωδών αποβλίττων της εγκάρσιας κόψης.

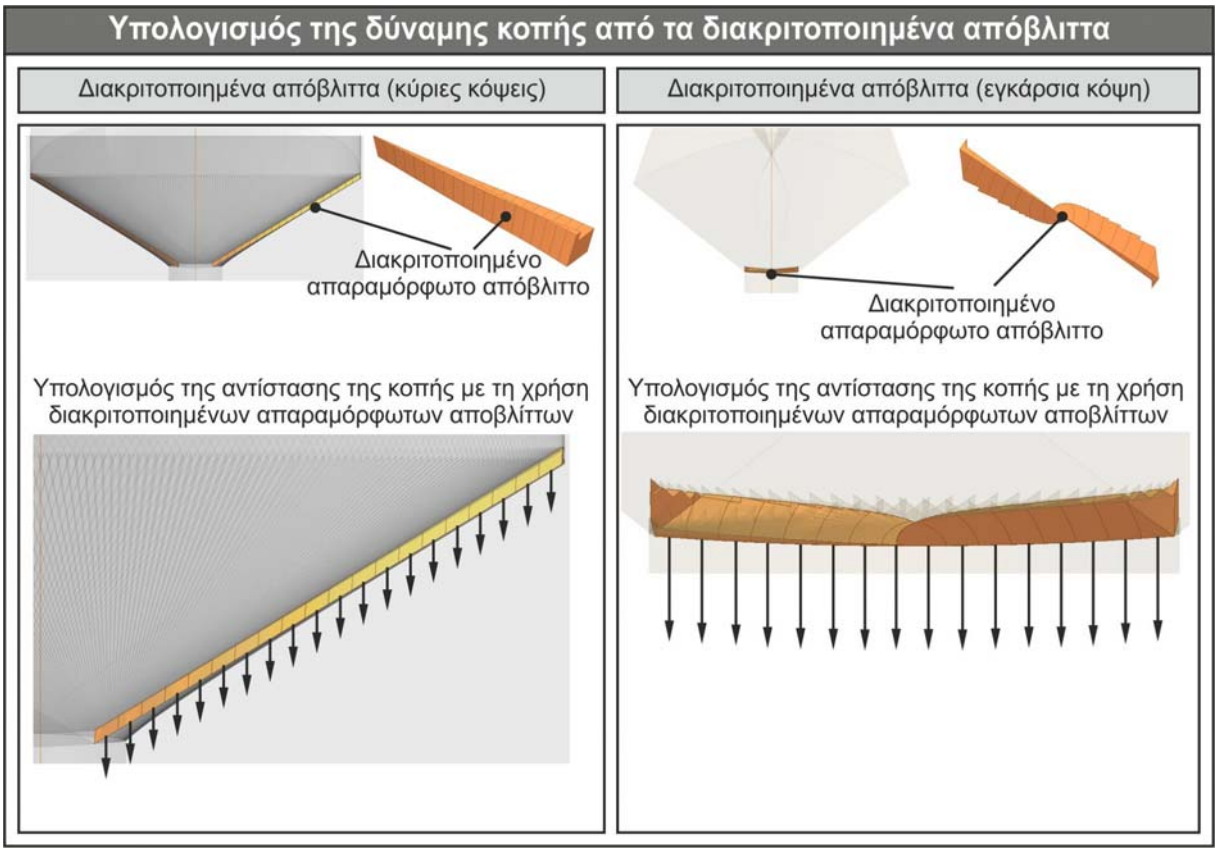
F_{i_KK}: η συνολική δύναμη κοπής του i στοιχειώδους αποβλίττου της κύριας κόψης.

F_{j_EK}: η συνολική δύναμη κοπής του j στοιχειώδους αποβλίττου της εγκάρσιας κόψης.

F_{KK}: η συνολική δύναμη κοπής των κύριων κόψεων.

F_{EK}: η συνολική δύναμη κοπής της εγκάρσιας κόψης.

Στο σχήμα 3.23 φαίνεται ξεχωριστά για κάθε είδος κόψης, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διακριτοποίηση του συνολικού απαραμόρφωτου αποβλίττου. Οι γεωμετρίες τους είναι ίδιες με τη γεωμετρία των κόψεων, από τις οποίες προέρχονται και το μέγεθός τους επηρεάζεται άμεσα από τη χρησιμοποιούμενη πρόωση. Η κατανομή των στοιχειωδών αποβλίττων είναι ομοιόμορφη κατά μήκος των κόψεων. Για όλες τις περιπτώσεις διακρίνεται η θέση τους στο χώρο. Για τις κύριες κόψεις φαίνεται καθαρά ο σχηματισμός της γωνίας κορυφής, ενώ για την εγκάρσια φαίνεται πόσο σημαντικά μικρότερο είναι το μήκος της.

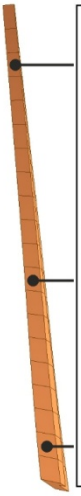


Σχήμα 3.23. Αναλυτικός υπολογισμός της δύναμης κοπής

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται αναλυτικά ένα παράδειγμα υπολογισμού της δύναμης κοπής κατά τη διάτρηση. Εμφανίζονται ξεχωριστά όλοι οι επιμέρους υπολογισμοί των κύριων κόψεων και της εγκάρσιας κόψης, για συγκεκριμένο εργαλείο και συνθήκες κοπής ενός τεμαχίου από CK60. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευασμένο από HSS, έχει διάμετρο 12mm, μέγεθος πυρήνα 1.5mm, γωνία κορυφής 118° και γωνία ελίκωσης 29°. Οι συνθήκες κοπής περιλαμβάνουν πρόωση 0.25mm/rev και ταχύτητα κοπής 15m/min. Οι διαστάσεις των αποβλίττων αναγνωρίστηκαν αυτόματα (b και h σε mm). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές του εύρους του κάθε στοιχειώδους αποβλίττου ($h_{average}$), βρίσκοντας το ημιάθροισμα δύο διαδοχικών τιμών από τη στήλη h. Το μήκος της κόψης του κάθε στοιχειώδους αποβλίττου παραμένει σταθερό και αυτό συμβαίνει, διότι επιλέχθηκε προγραμματιστικά να χρησιμοποιούνται εκείνες οι ακτίνες από το κέντρο του εργαλείου, οι οποίες θα έχουν αυτό το αποτέλεσμα. Με την εφαρμογή της εξίσωσης του Kienzle-Victor, υπολογίστηκαν οι επιμέρους δυνάμεις (F_{vi} και F_{ri}) και στη συνέχεια προστέθηκαν διανυσματικά, ώστε να προκύψει η υπολογιζόμενη στοιχειώδης δύναμη κοπής για κάθε στοιχειώδες απόβλιττο (F_{i_thrust}). Τέλος, αθροίστηκαν όλες οι στοιχειώδεις δυνάμεις κοπής και βρέθηκαν οι δύο συνιστώσες της συνολικής δύναμης κοπής, 1139.16N για τις δύο δυνάμεις που δρουν στις κύριες κόψεις και 1533.3N για τη δύναμη που αναπτύσσεται στην εγκάρσια κόψη. Η συνολική δύναμη κοπής για το συγκεκριμένο εργαλείο και συνθήκες ανέρχεται σε 2672.46N. Στη περίπτωση των κύριων κόψεων, λόγω συμμετρίας, υπολογίζεται η δύναμη κοπής στην μία κόψη και στη συνέχεια διπλασιάζεται για να ληφθούν υπόψη και οι δύο μαζί. Αντίστοιχα με το απόβλιττο των κύριων κόψεων, πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην εγκάρσια κόψη.

DRILL3D - Υπολογισμός δυνάμεων κοπής

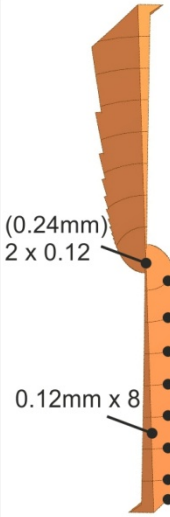
Κύρια κόψη (ΚΚ)



	b	h	h average	FV (N)	FR (N)	Fi thrust
1	0.31	0.1351	0.06755	44.64	23.79	26.01
2	0.31	0.1367	0.1359	45.10	24.08	26.25
3	0.31	0.1384	0.13755	45.48	24.33	26.45
4	0.31	0.1401	0.13925	45.88	24.59	26.66
5	0.31	0.142	0.14105	46.31	24.87	26.88
6	0.31	0.1439	0.14295	46.76	25.17	27.12
7	0.31	0.1459	0.1449	47.24	25.48	27.37
8	0.31	0.1481	0.147	47.75	25.81	27.63
9	0.31	0.1504	0.14925	48.31	26.18	27.93
10	0.31	0.1527	0.15155	48.89	26.56	28.23
11	0.31	0.1552	0.15395	49.48	26.94	28.54
12	0.31	0.1577	0.15645	50.07	27.33	28.84
13	0.31	0.1604	0.15905	50.66	27.73	29.15
14	0.31	0.1631	0.16175	51.25	28.12	29.45
15	0.31	0.166	0.16455	51.84	28.52	29.75
16	0.31	0.169	0.1675	52.43	28.92	30.04
17	0.31	0.172	0.1705	53.01	29.33	30.34
18	0.31	0.1752	0.1736	53.62	29.75	30.64
19	0.31	0.1785	0.17685	54.24	30.18	30.95
20	0.31	0.1819	0.1802	55.04	30.71	31.36

Δύναμη κοπής των ΚΚ: 2x569.68=**1139.16N**

Εγκάρσια κόψη (ΕΚ)



FV (N)	Fi thrust
51.87	51.87
88.78	88.78
94.43	94.43
98.11	98.11
99.03	99.03
101.74	101.74
111.58	111.58
121.43	121.43

Δύναμη κοπής (ΕΚ): **1533.3N**

D=12mm, W=1.5mm, p=59°, h=29°, f=0.25mm/rev, V=15m/min

Δύναμη κοπής: 2672.46N

Σχήμα 3.24. Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής με τη βοήθεια του DRILL3D

3.7. Λογισμικό προσομοίωσης της διάτρησης DRILL3D

Όλες οι διαδικασίες μοντελοποίησης που περιγράφηκαν, ενσωματώθηκαν στο λογισμικό DRILL3D. Το DRILL3D είναι μια εκτελέσιμη εφαρμογή η οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό Autodesk Inventor™. Εκκινώντας το DRILL3D έχουν ενσωματωθεί έλεγχοι για το άνοιγμα του Autodesk Inventor™, εάν αυτό είναι κλειστό, ή απ' ευθείας εκτέλεση των απαιτούμενων εντολών, εάν είναι ήδη σε χρήση.

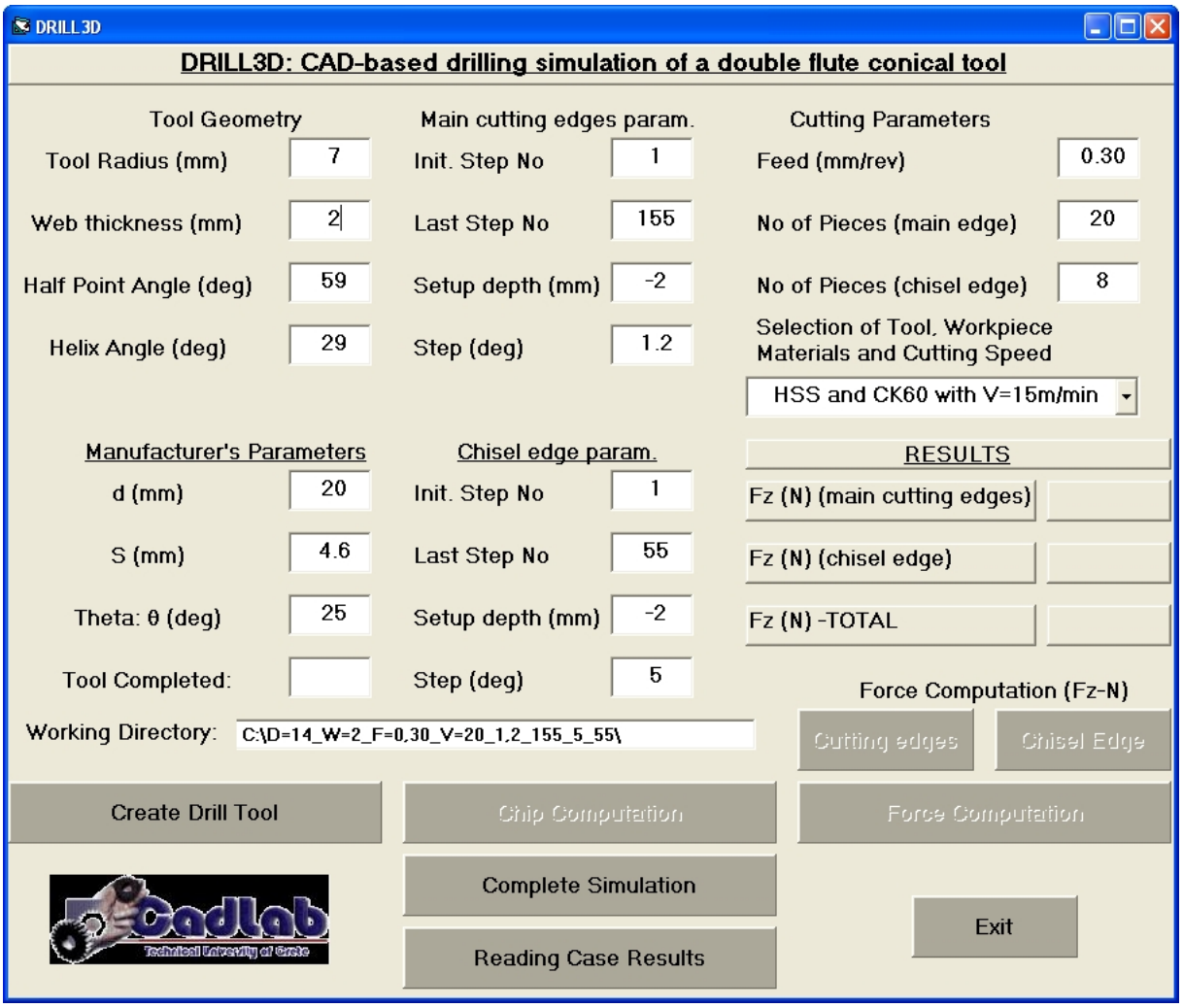
Το λογισμικό τροφοδοτείται με τις παραμέτρους σχεδιασμού και κατασκευής του εργαλείου και αυτόματα καθορίζει την μορφή της εγκάρσιας διατομής του, ώστε να προκύψουν ευθείες κύριες κόψεις. Στη συνέχεια αναγνωρίζονται οι γωνία κορυφής και η ακτίνα του πυρήνα του εργαλείου. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για την αυτόματη μοντελοποίηση των δύο τεμαχίων που απαιτούνται για την αυτόνομη μελέτη, τόσο των κύριων κόψεων, όσο και της εγκάρσιας κόψης. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής των συνθηκών κοπής (πρόωση f σε mm/rev και ταχύτητα κοπής V σε m/min) και του συνδυασμού υλικών εργαλείου-τεμαχίου που χρησιμοποιείται (π.χ. HSS για το υλικό του εργαλείου και CK60 για το δοκίμιο) και έτσι τελικά υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής κατά τη διάτρηση. Μέσω της αυτόματης αναγνώρισης του μήκους του εκάστοτε αποβλίττου, γίνεται και επιπλέον έλεγχος-σύγκριση με το άθροισμα των μηκών των στοιχειωδών αποβλίττων.

Το περιβάλλον χρήσης του DRILL3D φαίνεται στο σχήμα 3.25. Στην αριστερή στήλη παρέχεται η δυνατότητα επιλογής των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων που οδηγούν στην δημιουργία του επιλεγμένου εργαλείου. Στη μεσαία στήλη δεδομένων ο χρήστης μπορεί να επιλέξει:

- το χρησιμοποιούμενο βήμα της προσομοίωσης, τόσο για τις κύριες κόψεις, όσο και για την εγκάρσια ξεχωριστά. Αυτό γίνεται δηλώνοντας πόσα βήματα πρόκειται να

διανυθούν (Initial Step No, Last Step No) και ανά πόσες μοίρες πρόκειται να διανυθεί το καθένα (Step-deg)

- τις αρχικές συνθήκες τοποθέτησης του εργαλείου ως προς τα δοκίμια. Για να είναι δυνατόν να εισέλθει το εργαλείο επαρκώς μέσα στα δοκίμια, ώστε στον ελάχιστο δυνατό αριθμό βημάτων να επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση, απαιτείται η αρχική εισχώρηση του εργαλείου μέσα στο δοκίμιο. Αυτό γίνεται με την ρύθμιση του ύψους της θέσεις του εργαλείου ως προς τα δοκίμια σε ικανή αρνητική τιμή π.χ. -2mm (Setup depth – mm).



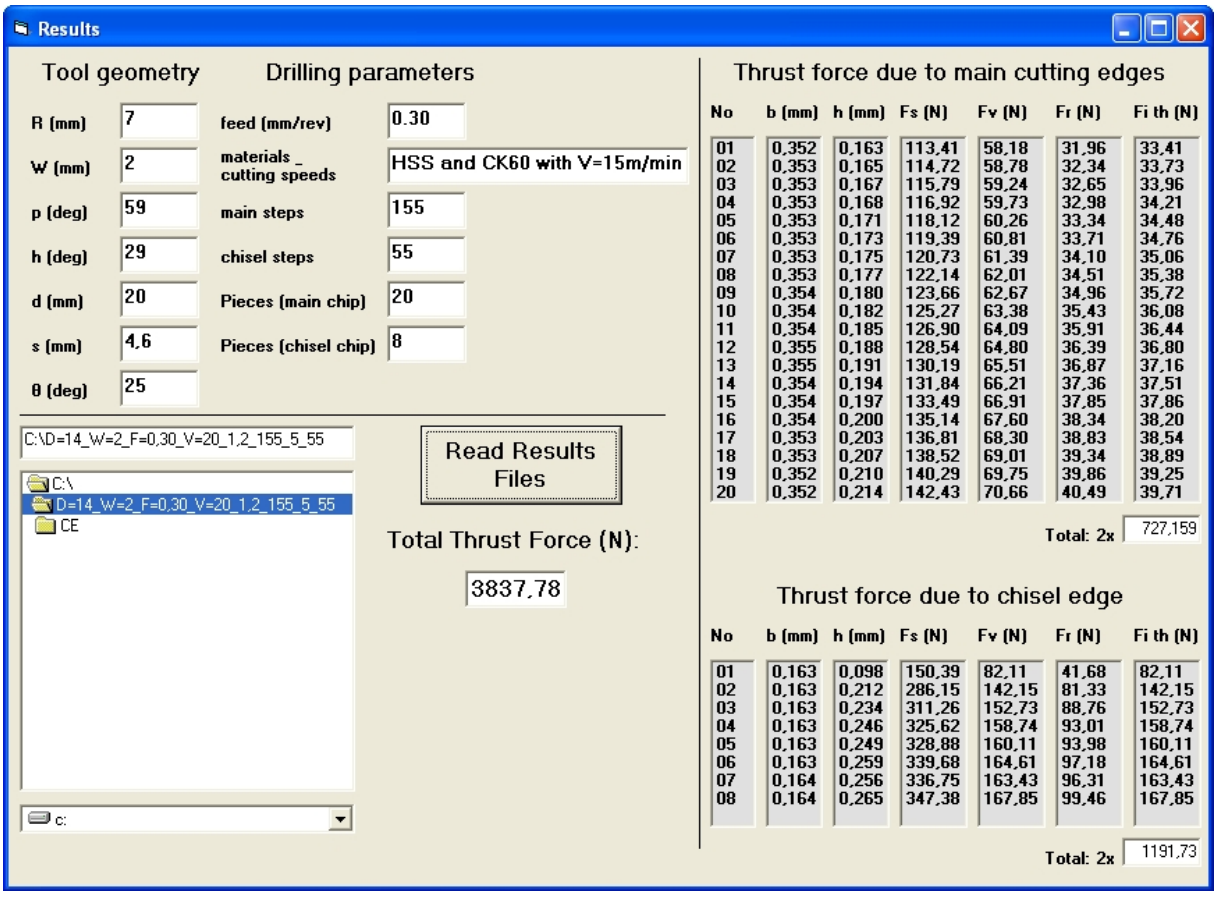
Σχήμα 3.25. Το περιβάλλον του DRILL3D

Στην δεξιά στήλη δεδομένων, επιλέγεται η πρόωση σε mm/rev και ο αριθμός των τεμαχίων στα οποία πρόκειται να διακριτοποιηθούν τα υπολογιζόμενα απόβλιττα των κόψεων ξεχωριστά για τις κύριες κόψεις και την εγκάρσια κόψη (No of pieces – main edge και No of pieces – chisel edge). Επίσης γίνεται επιλογή από μενού, που μπορεί να ανανεώνεται κατά περίπτωση, της χρησιμοποιούμενης ταχύτητας κοπής σε m/min και του συνδυασμού υλικών εργαλείου-τεμαχίου (π.χ. HSS και CK60). Στην ίδια στήλη με την ολοκλήρωση των υπολογισμών της προσομοίωσης, προβάλλονται τα αποτελέσματα των δυνάμεων τόσο ξεχωριστά ανά είδος κόψης, όσο και σαν άθροισμα της συνολικής δύναμης κοπής σε N.

Στο κάτω μέρος, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την απ' ευθείας εκτέλεση ολόκληρης της ακολουθίας προσομοίωσης (Complete Simulation) ή να επιλέξει σταδιακά να παρακολουθήσει την εκτέλεσή της, ελέγχοντας τα βήματα καθώς αυτά εξελίσσονται, δηλαδή:

δημιουργία του εργαλείου (Create Drill Tool), υπολογισμός της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων (Chip Computation), υπολογισμός των δυνάμεων και μάλιστα ξεχωριστά ανά είδος κόψης (Force Computation).

Εάν ο χρήστης επιλέξει να εκτελέσει σταδιακά την εφαρμογή, μόνο η επιλογή δημιουργίας του εργαλείου είναι αρχικά διαθέσιμη. Στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα επιλογής του υπολογισμού της γεωμετρίας των απαραμόρφωτων αποβλίττων και μόνο όταν ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο είναι δυνατή η χρήση του υπολογισμού των δυνάμεων. Αυτοί οι επιπλέον έλεγχοι επιλέχθηκαν, ώστε να μην προκύπτουν σφάλματα κατά την προσομοίωση, εξαιτίας της μη ύπαρξης των απαιτούμενων αρχείων κάθε φορά.



Σχήμα 3.26. Το περιβάλλον του DRILL3D για την ανάγνωση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Επειδή μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα χάνονται από το βασικό μενού της εφαρμογής, κατά τον αναλυτικό υπολογισμό των δυνάμεων, όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, αποθηκεύονται και σε αρχεία υπολογισμού MS Excel™, ώστε να είναι δυνατή η εκ των υστέρων μελέτη των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, στο κάτω μέρος της βασικής φόρμας του DRILL3D, υπάρχει η επιλογή ανάγνωσης υπαρχόντων αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (Reading Case Results). Όταν ο χρήστης επιλέξει αυτό το εργαλείο, τότε ανοίγει μια νέα φόρμα αποτελεσμάτων (σχήμα 3.26), όπου παρέχεται η δυνατότητα να επιλεγεί η τοποθεσία των αρχείων προσομοίωσης στο σκληρό δίσκο (επιλογή κατάλληλου φακέλου) και να παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν. Με την χρήση αυτού του εργαλείου ανάγνωσης αποτελεσμάτων, για κάθε προσομοίωση που είναι αποθηκευμένη:

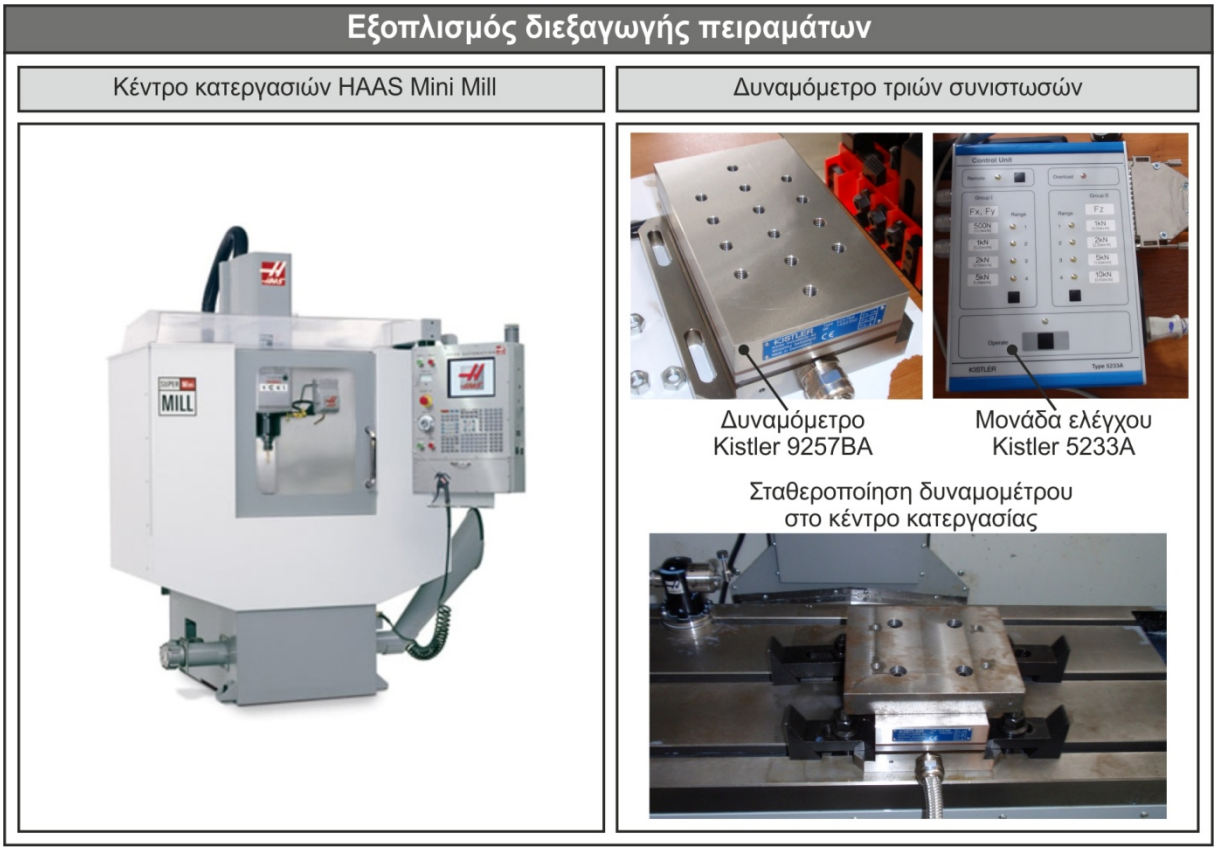
- παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου στο πάνω αριστερά μέρος της φόρμας (γεωμετρία εργαλείου, συνθήκες κοπής και παράμετροι λογισμικού προσομοίωσης).

- παρουσιάζεται στη δεξιά πλευρά (για τα δύο είδη κόψεων) η αναλυτική λίστα των στοιχειωδών δυνάμεων που υπολογίζονται, αλλά και ο υπολογισμός των στοιχειωδών δυνάμεων κοπής της διάτρησης των επιμέρους αποβλίττων. Στο κάτω μέρος κάθε λίστας εμφανίζεται το συνολικό μέγεθος της κάθε δύναμης κοπής, το οποίο θα πρέπει να διπλασιαστεί, αφού οι υπολογισμοί γίνονται για την μία πλευρά του τρυπανιού και επομένως για ένα τρυπάνι δύο αυλακώσεων η συνολική δύναμη που αναπτύσσεται είναι διπλάσια.
- εμφανίζεται στο κέντρο της φόρμας η συνολική δύναμη κοπής της διάτρησης για το συγκεκριμένο εργαλείο και κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες κοπής.

4. Επιβεβαίωση μοντέλου

4.1. Εξοπλισμός

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το DRILL3D απαιτήθηκε να προσομοιωθούν σειρά κοπών, η οποίες με τη σειρά τους εκτελέστηκαν πειραματικά με τον κατάλληλο εξοπλισμό (σχήμα 4.1). Για την εκτέλεση των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε το κέντρο κατεργασίας τριών αξόνων HAAS Mini Mill του εργαστηρίου. Το κέντρο αυτό μπορεί να κατεργαστεί τεμάχια διαστάσεων 406x305x254, ενώ η μέγιστη ισχύς του ανέρχεται στα 5.6KW και η μέγιστη ροπή του είναι ίση με 45Nm στις 1200rpm. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου είναι 6000rpm, η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει σε κάθε άξονα είναι σχεδόν 9000N και η μέγιστη πρόωση κοπής που μπορεί να επιτύχει είναι 12.7m/min.



Σχήμα 4.1. Κέντρο κατεργασίας HAAS που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή πειραμάτων

Για την μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμόμετρο Kistler τύπου 9257BA, με δυνατότητα μέτρησης τριών συνιστωσών δυνάμεων. Το σήμα επεξεργαζόταν από μια μονάδα ελέγχου τύπου 5233A, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονταν απ' ευθείας στην οθόνη ενός Η/Υ, ώστε να εντοπίζονται αμέσως τυχόν λάθη κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Το δυναμόμετρο επέτρεπε την μέτρηση δυνάμεων σε διαφορετικές εμβέλειες:

- Fx, Fy: ±0.5KN, Fz: ±1KN,
- Fx, Fy: ±1KN, Fz: ±2KN,
- Fx, Fy: ±2KN, Fz: ±5KN).

Η μονάδα ελέγχου επέτρεπε την επιλογή της εμβέλειας της μετρούμενης κάθε φορά δύναμης. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων επιλέχθηκαν οι τιμές 2KN και 5KN για τη μέτρηση της δύναμης κοπής (Fz) και επομένως η ευαισθησία που επιτεύχθηκε ήταν 2.50mV/N και 1.00mV/N αντίστοιχα.

Το δυναμόμετρο σταθεροποιήθηκε πάνω στην τράπεζα του κέντρου κατεργασίας με τέσσερα σημεία στήριξης και στη συνέχεια πάνω του στερεώθηκε καλά το δοκίμιο (πλάκα) από CK60 που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρυπάνια μετάλλου Bosch HSS-R που προτείνονται για κατεργασίες διάτρησης γενικής χρήσης, δεξιόκοπα, και κατασκευασμένα σύμφωνα με το πρότυπο DIN338. Πρόκειται για εργαλεία με δύο κόψεις και επομένως με δύο αύλακες απομάκρυνσης αποβλίττων, με ευθείες κύριες κόψεις και κωνική κορυφή. Η γωνία κορυφής τους ήταν 118°.

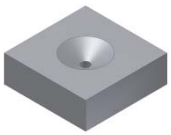
4.2. Σχεδιασμός των πειραμάτων

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων επιβεβαίωσης των μοντέλων του DRILL3D, επιλέχθηκαν δύο εργαλεία διαμέτρων 10mm και 14mm, τα οποία δοκιμάστηκαν σε σειρά διαφορετικών ταχυτήτων κοπής και προώσεων (σχήμα 4.2). Πέρα από τις χρησιμοποιημένες συνθήκες κοπής, επισημάνεται η χρήση μη διαμορφωμένων δοκιμίων για τα πρώτα 16 πειράματα και η αντίστοιχη χρήση των εξαρχής διαμορφωμένων δοκιμίων για τα υπόλοιπα 16.

Στο ίδιο σχήμα φαίνονται οι ακριβείς συνθήκες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση, τόσο στην προσομοίωση όσο και στα πειράματα που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο. Για τα δύο εργαλεία διαμέτρου 10 και 14mm, δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές ταχύτητες κοπής (15 και 20 m/min). Για το εργαλείο με διάμετρο 10mm εκτελέστηκαν πειράματα με πρόωση από 0.10 έως 0.25 mm/rev με βήμα 0.05mm/rev, ενώ για το εργαλείο με διάμετρο 14mm εκτελέστηκαν αντίστοιχα πειράματα με πρόωση από 0.15 έως 0.30 mm/rev με βήμα 0.05mm/rev. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ψυκτικό υγρό για την αποφυγή υπερθέρμανσης του εργαλείου, ενώ υπήρχε αλλαγή του χρησιμοποιούμενου εργαλείου κάθε 2-4 πειράματα, ώστε να μην προλαβαίνει να φθαρεί και να προκύπτουν αλλοιώσεις των αποτελεσμάτων.

Διεξήχθησαν μια σειρά από ζεύγη πειραμάτων. Στα μισά το δοκίμιο τρυπήθηκε κανονικά χωρίς καμία αρχική διαμόρφωση, με αποτέλεσμα να μετρηθεί η συνολική δύναμη κοπής για τις εκάστοτε συνθήκες κοπής και εργαλείο. Αντίθετα στην περίπτωση των απαραίτητων διαμορφώσεων, απαιτήθηκε να ανοιχθούν οπές διαμέτρου ίση με τη διάσταση της εγκάρσιας κόψης του χρησιμοποιούμενου εργαλείου, έτσι ώστε κατά την εξέλιξη του πειράματος η εγκάρσια κόψη να μην συμμετέχει στην κοπή (σχήμα 4.3). Από το διαχωρισμό της μέτρησης της δύναμης κοπής εξαιτίας των κύριων κόψεων (δοκίμιο με διαμόρφωση) και της συνολικής δύναμης κοπής (δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση), είναι δυνατόν να υπολογιστεί η δύναμη κοπής εξαιτίας του πυρήνα του εργαλείου (διαφορά των δύο αυτών δυνάμεων).

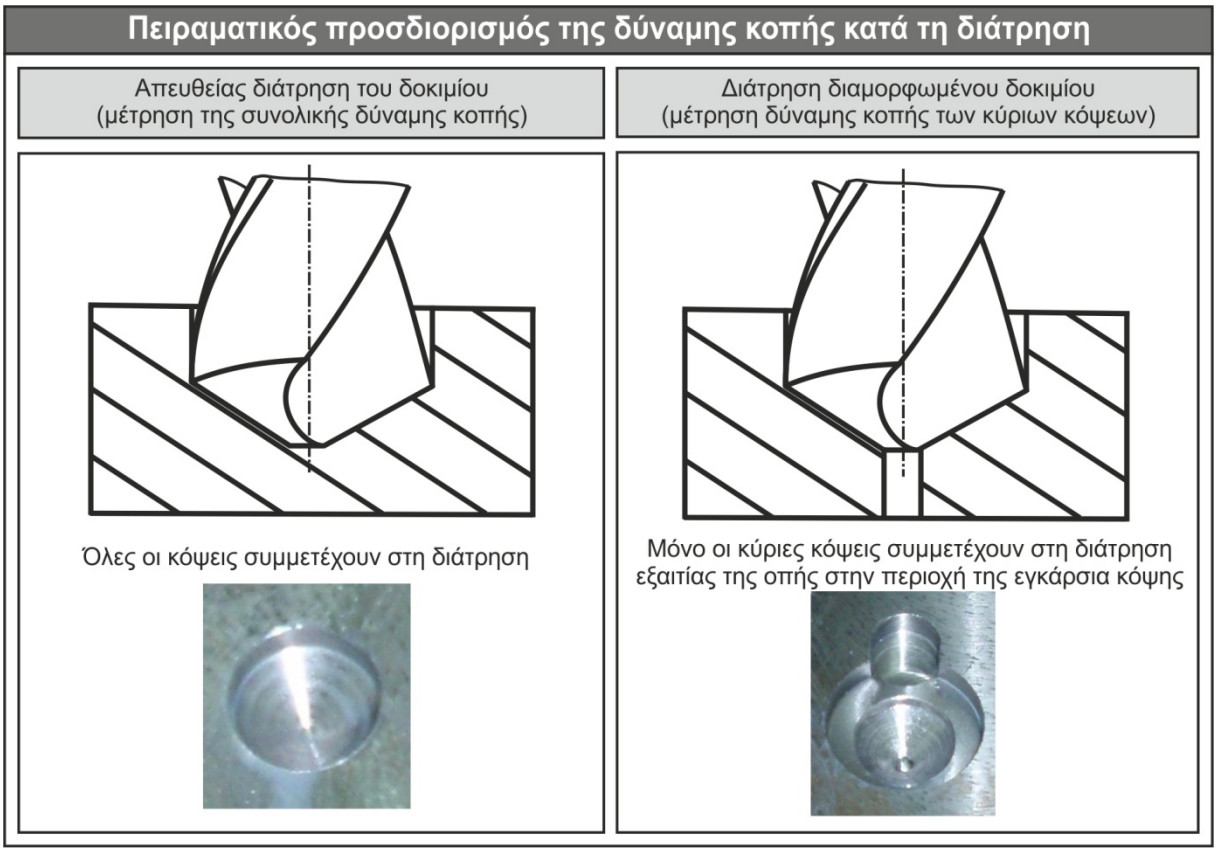
Με τον τρόπο αυτό αποδεσμεύονται οι διαδικασίες κοπής των δύο περιοχών του εργαλείου και επιβεβαιώνεται με ακρίβεια η ορθότητα των προσομοιώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος με τον οποίο δομήθηκε το DRILL3D, επέτρεψε από την αρχή το διαχωρισμό των δύο περιοχών κοπής, αφού και οι συνθήκες που επικρατούν σε κάθε μία είναι τελείως διαφορετικές.

α/α	Διάμετρος εργαλείου (mm)	V (m/min)	n (rpm)	f (mm/rev)	F (m/min)	Δοκίμια
1	10	15	478	0,10	47,80	
2	10	15	478	0,15	71,70	
3	10	15	478	0,20	95,60	
4	10	15	478	0,25	119,5	
5	10	20	637	0,10	63,70	
6	10	20	637	0,15	95,50	
7	10	20	637	0,20	127,4	
8	10	20	637	0,25	159,2	
9	14	15	341	0,15	51,20	
10	14	15	341	0,20	68,20	
11	14	15	341	0,25	85,20	
12	14	15	341	0,30	102,3	
13	14	20	455	0,15	68,30	
14	14	20	455	0,20	91,00	
15	14	20	455	0,25	113,8	
16	14	20	455	0,30	136,5	
17	10	15	478	0,10	47,80	
18	10	15	478	0,15	71,70	
19	10	15	478	0,20	95,60	
20	10	15	478	0,25	119,5	
21	10	20	637	0,10	63,70	
22	10	20	637	0,15	95,50	
23	10	20	637	0,20	127,4	
24	10	20	637	0,25	159,2	
25	14	15	341	0,15	51,20	
26	14	15	341	0,20	68,20	
27	14	15	341	0,25	85,20	
28	14	15	341	0,30	102,3	
29	14	20	455	0,15	68,30	
30	14	20	455	0,20	91,00	
31	14	20	455	0,25	113,8	
32	14	20	455	0,30	136,5	

Σχήμα 4.2. Παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα

4.3. Αποτελέσματα των πειραμάτων

Η μορφή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που διενεργήθηκαν, είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4 για τη διενέργεια του πειράματος Νο 16. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν διαμέτρου 14mm. Η ταχύτητα κοπής ήταν 20m/min, που επιτυγχάνεται με ρύθμιση 455rpm στον άξονα του εργαλειοφορείου για το συγκεκριμένο εργαλείο. Επίσης, η πρόωση του πειράματος ήταν 0.30mm/rev ή 136.5m/min, ενώ χρησιμοποιήθηκε ψυκτικό υγρό για την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας. Στο ίδιο σχήμα, δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί η μορφή από τα παραγόμενα απόβλιττα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του εκτελούμενου πειράματος.



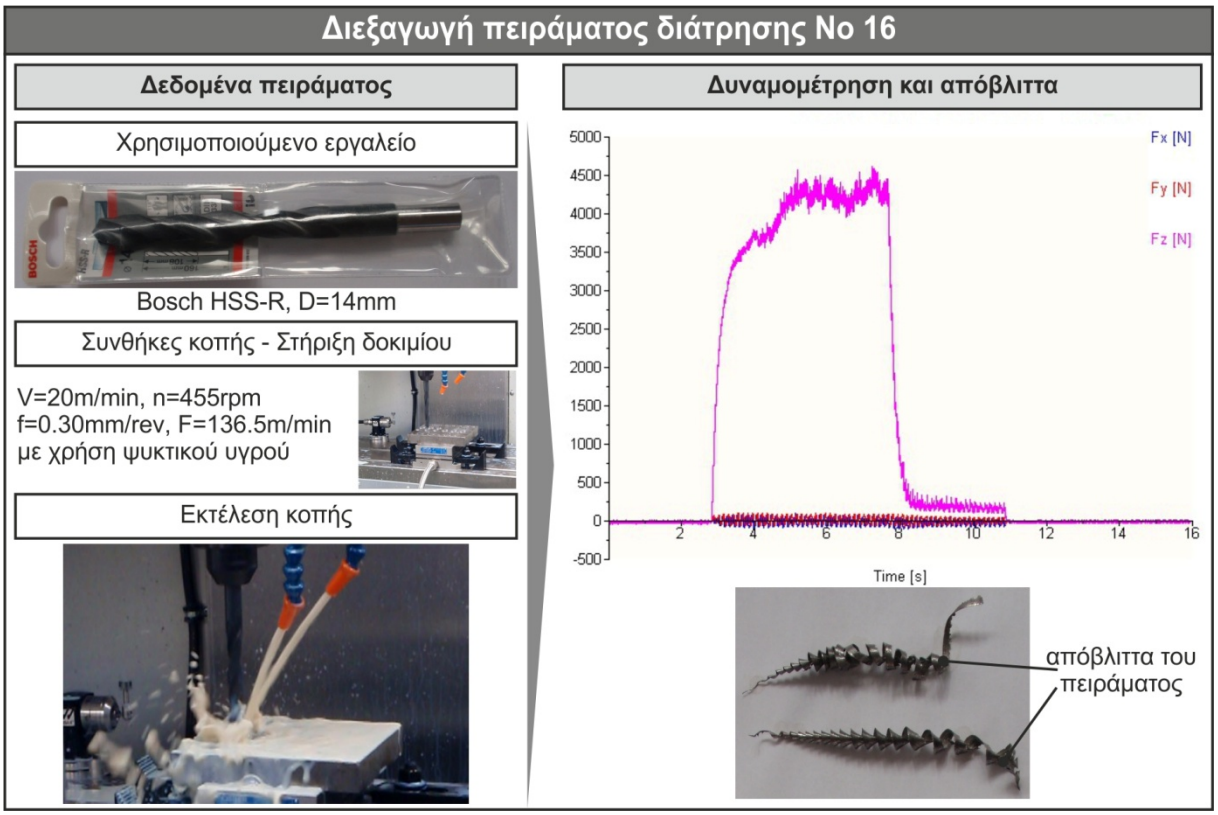
Σχήμα 4.3. Πειραματικός προσδιορισμός της δύναμης κοπής κατά τη διάτρηση

Οι δυνάμεις F_x και F_y που ασκούνται στο οριζόντιο επίπεδο (XY), εμφανίζουν τιμές που βρίσκονται γύρω από το μηδέν. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού το εργαλείο είναι συμμετρικό ως προς άξονα περιστροφής και οι παραγόμενες δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται, ενώ το μικρό εύρος αποκλίσεων αποδεικνύει τον στιβαρό τρόπο στήριξης της πλάκας πάνω στο δυναμόμετρο. Όσον αφορά την μετρούμενη δύναμη F_z, ύστερα από μια απότομη άνοδο της τιμής της από το μηδέν, εμφανίζει σταθεροποιητική τάση, αφού το εργαλείο πλέον βρίσκεται σε φάση πλήρους κοπτικής δράσης με τη συμμετοχή και των τριών κόψεων.

Όταν το εργαλείο φτάνει στο προκαθορισμένο βάθος κοπής και σταματά πλέον η διαδικασία της διάτρησης, τότε η Fz μειώνεται δραματικά, ενώ ακολουθεί η απομάκρυνση του εργαλείου από την οπή. Σε όλες τις περιπτώσεις δόθηκε ικανός χρόνος διάρκειας κοπής ώστε να είναι δυνατή η σταθεροποίηση της τιμής της δύναμης κοπής.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τόσο οι συνολική δύναμη κοπής που αναπτύσσεται κατά τη διάτρηση, όσο και η δύναμη κοπής εξαιτίας της κοπτικής δράσης των κύριων κόψεων. Στα ίδια σχήματα έχουν τοποθετηθεί οι τιμές που προέκυψαν από τα πειράματα, αλλά και από τις προσομοιώσεις με τη βοήθεια του DRILL3D, με αποτέλεσμα να είναι εμφανής η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η πειραματική επιβεβαίωση του DRILL3D για το εργαλείο των 10mm, σε ταχύτητα κοπής 15m/min και τις τέσσερις διαφορετικές προώσεις (0.10, 0.15, 0.20 και 0.25mm/rev), ενώ στο σχήμα 4.6 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για διαφορετική ταχύτητα κοπής (20m/min). Με όμοιο τρόπο παρουσιάζονται στα σχήματα 4.7 και 4.8, τα αποτελέσματα που αφορούν το εργαλείο των 14mm, στις δύο ταχύτητες κοπής που αναφέρθηκαν και σε αντίστοιχες προώσεις (0.15, 0.20, 0.25 και 0.30mm/rev).

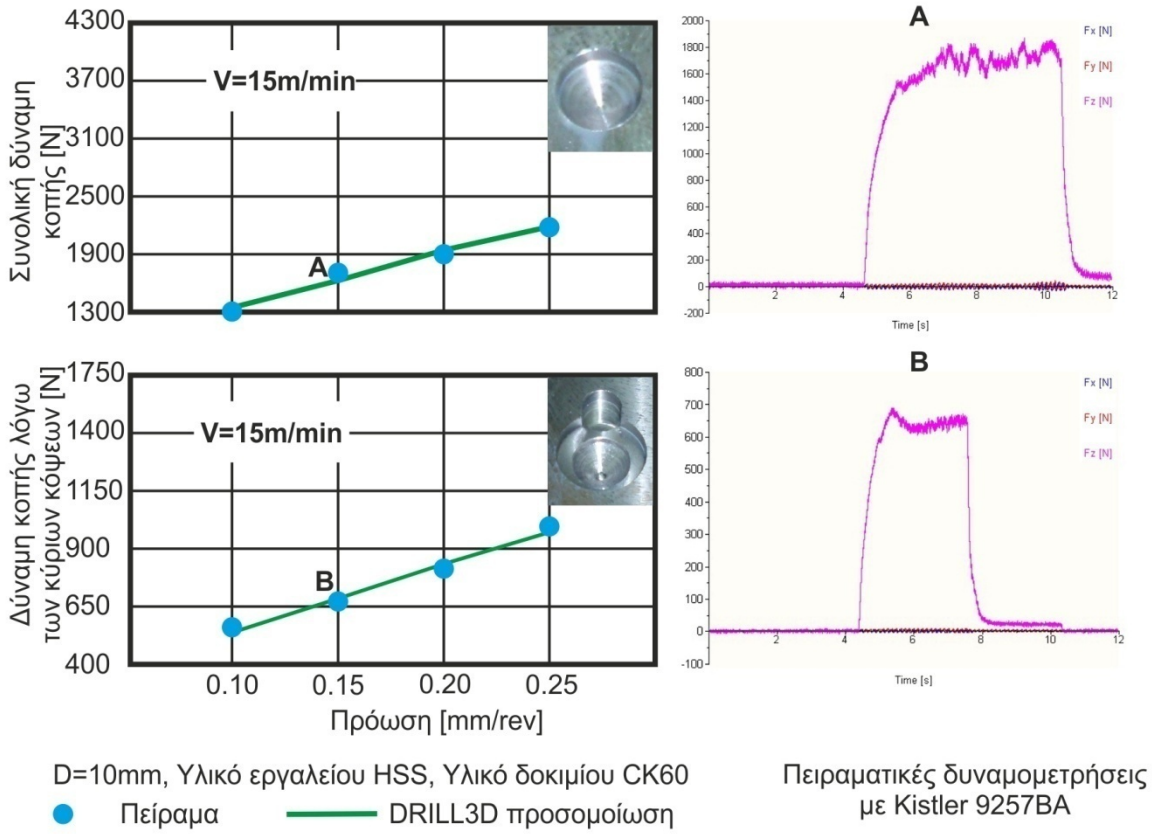


Σχήμα 4.4. Παρουσίαση της διεξαγωγής πειράματος διάτρησης

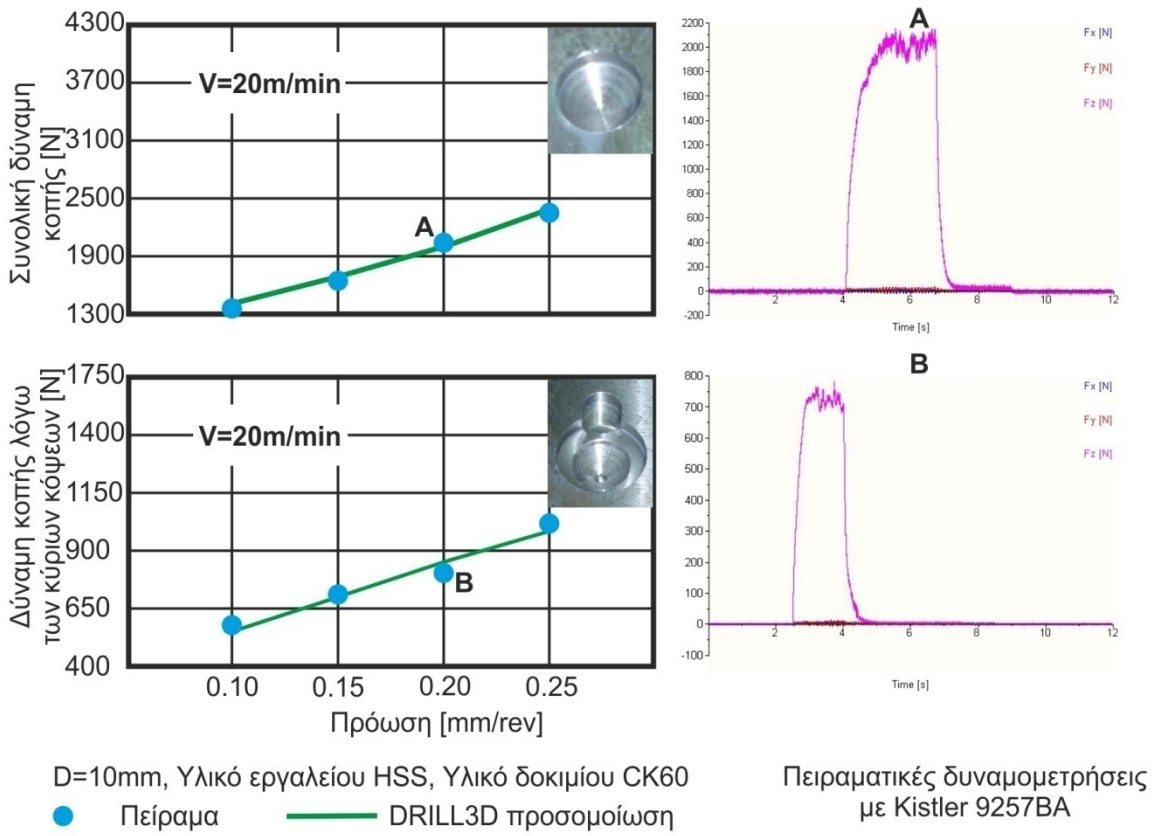
Εύκολα μπορεί κανείς να διακρίνει τη διαφορά που προκύπτει μεταξύ των διαγραμμάτων που αφορούν τη συνολική δύναμη κοπής και την δύναμη κοπής λόγω των κύριων κόψεων. Όπως αναμενόταν, σχεδόν 60% της συνολικής δύναμης κοπής προέρχεται από την κοπτική δράση της εγκάρσιας κόψης. Αυτό οφείλεται στην πολύ αρνητική γωνία αποβλίτου με την οποία συμμετέχει στην κοπή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας εισχώρησης του εργαλείου μέσα στο δοκίμιο, που είναι περισσότερο κοντά στην εξώθηση, παρά την διάτρηση. Το υλικό του δοκιμίου παραμορφώνεται έντονα πλαστικά και εξωθείται προς την περιοχή των κυρίων κόψεων, όπου και απομακρύνονται μέσω των αυλακώσεων του εργαλείου. Με τη χρήση εργαλείου μεγαλύτερης διαμέτρου οι δυνάμεις αυξάνονται σημαντικά, αφού αυξάνονται και οι διαστάσεις του απαραμόρφωτου αποβλίττου.

Επιπλέον σε όλες τις περιπτώσεις, τόσο η συνολική δύναμη κοπής, όσο και η δύναμη κοπής λόγω των κύριων κόψεων, αυξάνει με την αύξηση της πρόωσης, γεγονός που ήταν αναμενόμενο και υπολογιστικά εξηγείται από την εμφάνιση μεγαλύτερης διάστασης απαραμόρφωτων αποβλίττων κατά την κοπή. Από την άλλη μεριά, η αύξηση της ταχύτητας κοπής φαίνεται να έχει διαφορετική επίδραση στις δυνάμεις που μετρώνται. Στην μεν συνολική δύναμη κοπής η αυξητική επίδραση με την αύξηση της ταχύτητας κοπής είναι μικρή αλλά ευδιάκριτη, ενώ στην περίπτωση της δύναμης κοπής λόγω των κύριων κόψεων φαίνεται να υπάρχει μια σχετική σταθερότητα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής επιδρά αυξητικά κατά βάση στην δύναμη κοπής της εγκάρσιας κόψης. Αυτό μπορεί πάλι να εξηγηθεί μέσω του μηχανισμού κοπής που ισχύει στην εγκάρσια κόψη και που περιγράφηκε προηγουμένως.

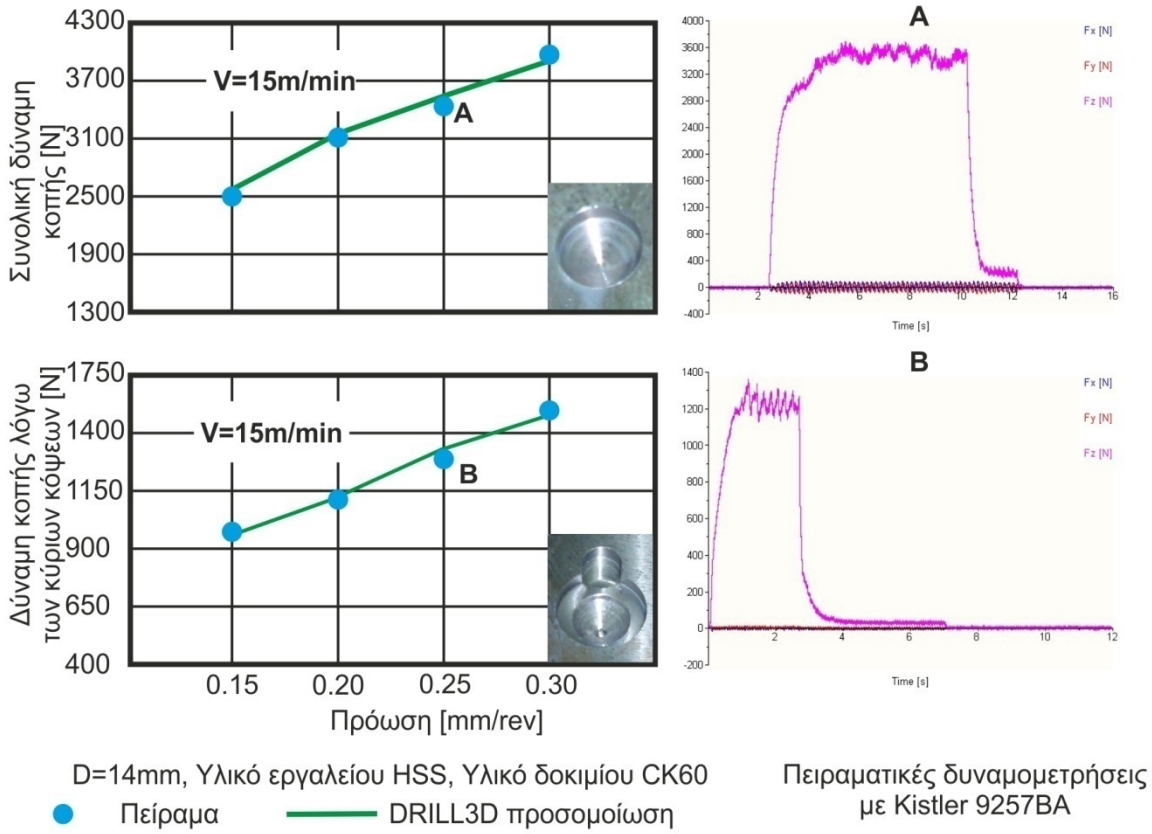
Σε όλα τα σχήματα έχουν ενσωματωθεί και οι αντίστοιχες εικόνες των οπών που διανοίχτηκαν, ώστε να είναι πλήρως κατανοητός ο τρόπος με τον οποίον εκτελέστηκαν τα πειράματα με τα εξαρχής διαμορφωμένα ή μη δοκίμια.



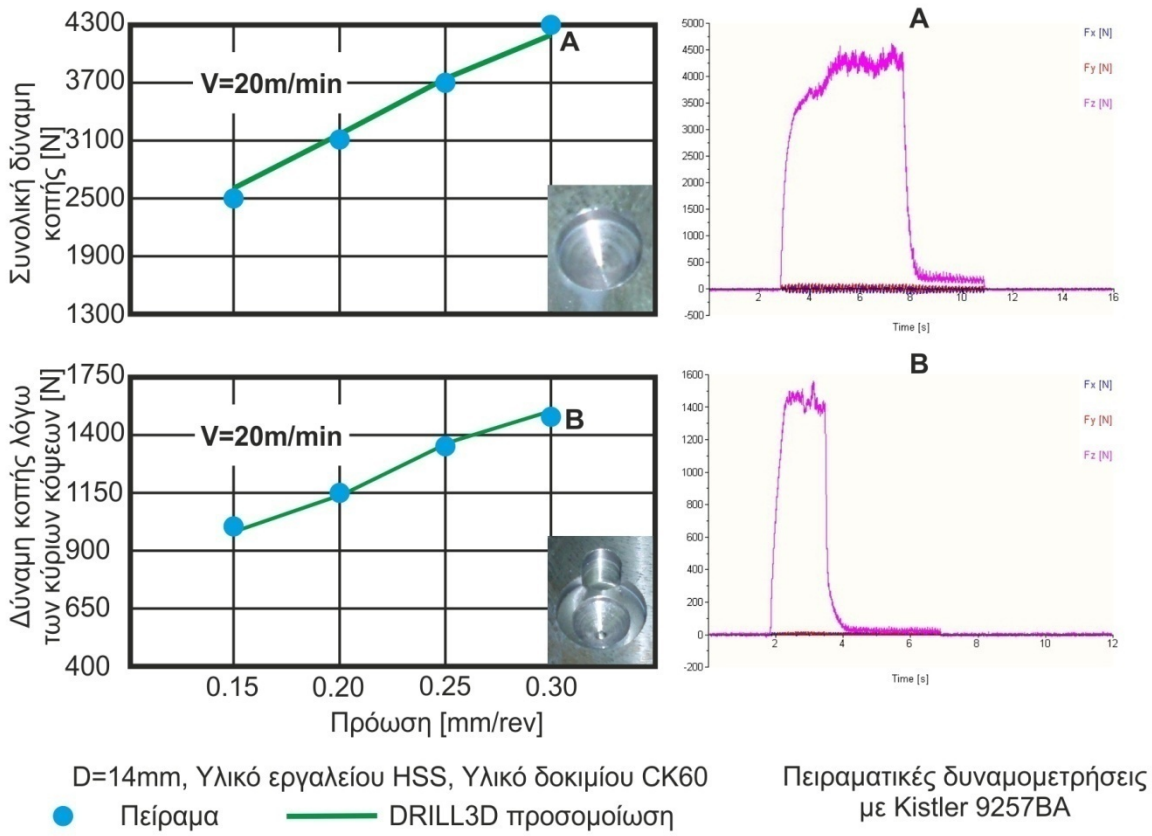
Σχήμα 4.5. Πειραματική επιβεβαίωση του DRILL3D για εργαλείο D=10mm και V=15m/min



Σχήμα 4.6. Πειραματική επιβεβαίωση του DRILL3D για εργαλείο D=10mm και V=20m/min



Σχήμα 4.7. Πειραματική επιβεβαίωση του DRILL3D για εργαλείο D=14mm και V=15m/min



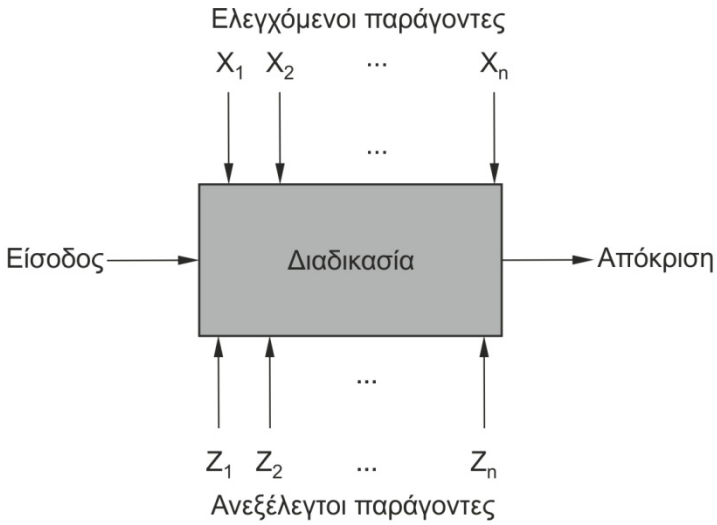
Σχήμα 4.8. Πειραματική επιβεβαίωση του DRILL3D για εργαλείο D=14mm και V=20m/min

5. Εφαρμογή της μεθόδου Σχεδιασμού Πειραμάτων

5.1. Μεθοδολογία Σχεδιασμού Πειραμάτων

5.1.1. Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Πειραμάτων

Ο σχεδιασμός πειραμάτων αναφέρεται και ως στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων. Σκοπός του είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ της εξόδου μιας διεργασία (απόκριση) και των πειραματικών της παραγόντων. Έτσι καταγράφεται η επιρροή που έχουν οι παράγοντες αυτοί πάνω στην έξοδο του συστήματος στο οποίο δρουν [180, 181, 182]. Μια γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας ενός πειράματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1. Γραφική απεικόνιση της διαδικασίας ενός πειράματος

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εύρεση ενός εμπειρικού μοντέλου που προσεγγίζεται βέλτιστα από μια συνάρτηση της μορφής:

$y=f(x_1,x_2,\ldots,x_n)+\varepsilon$

όπου:

Y: είναι η απόκριση,

$X_1, X_2, \ldots X_n$: είναι οι τιμές των ελεγχόμενων παραγόντων

$Z_1, Z_2, \ldots Z_n$: είναι οι τιμές των ανεξέλεγκτων παραγόντων και

ε: είναι το πειραματικό σφάλμα

Η ύπαρξη του ε σημαίνει ότι μπορεί να μην υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ του Y και των (X_1, X_2, …, X_n) και αυτό μπορεί να οφείλεται:

- σε ανεξέλεγκτους παράγοντες (Z_1, Z_2, …, Z_n) που θα επηρεάσουν την τιμή Y, αλλά δεν περιλαμβάνονται στην εξίσωση.
- στην ύπαρξη πειραματικών και μετρητικών σφαλμάτων στην τιμή Y και
- στους ελεγχόμενους παράγοντες (X_1, X_2, …, X_n).

Η διαδικασία που ακολουθείται για το σχεδιασμό πειραμάτων βασίζεται σε μια σειρά από βήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. *Προσδιορισμός του έργου*. Στο βήμα αυτό προσδιορίζεται ο σκοπός του έργου και ορίζεται το πρόβλημα. Επίσης, γίνεται η καταγραφή της τωρινής απόδοσης του συστήματος. Σε αυτό το βήμα πρέπει να γίνει σαφές, τι είναι αυτό που πρέπει να επιτευχθεί.
2. *Επιλογή της παραμέτρου εξόδου (απόκριση)*. Μετά τον προσδιορισμό του έργου, ορίζεται η παράμετρος Y, που είναι η απόκριση του συστήματος. Η απόκριση πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να ανταποκρίνεται στην έξοδο του συστήματος, να είναι συνεχής (εάν είναι δυνατόν) για ευκολία ανάλυσης των δεδομένων και να διευκολύνει την σωστή και ακριβή μέτρησή της.
3. *Επιλογή των παραγόντων*. Το βήμα αυτό γίνεται παράλληλα με την επιλογή της απόκρισης Y, ώστε οι παράγοντες που θα επιλεγούν να την επηρεάζουν άμεσα. Μερικές φορές η επιλογή τους είναι προφανής και εύκολη, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικοί παράγοντες είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Οι παράγοντες ενός πειράματος μπορεί να είναι συνεχείς ή διακριτοί και για κάθε είδος πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές τιμές δοκιμής. Οι διαφορετικές αυτές τιμές δοκιμής ονομάζονται επίπεδα. Ο αριθμός των επιλεγμένων παραγόντων έχει άμεση επίδραση στο κόστος και την διάρκεια των πειραμάτων, ενώ τα πειράματα πρέπει να έχουν επαρκείς παράγοντες, για να δώσουν σωστά αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα και με λογικό κόστος.
4. *Η επιλογή του σχεδίου πειραμάτων.* Η επιλογή του κατάλληλου σχεδίου πειραμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των παραγόντων, το φάσμα τιμών τους και τον αριθμό των επαναλήψεων που πρέπει να εκτελεστούν. Έτσι μπορούν να σχεδιαστούν πλήρη παραγοντικά πειράματα (full factorial designs), όπου γίνεται έλεγχος για όλους τους συνδυασμούς των δεδομένων, αποκτώνται περισσότερες πληροφορίες για τη διαδικασία και κοστίζουν αρκετά παραπάνω, ή μικρότερου μεγέθους κλασματικά παραγοντικά πειράματα (fractional factorial designs), όπου εκτελείται σαφώς μικρότερος αριθμός πειραμάτων, με μικρότερο κόστος, αλλά και με λιγότερες πληροφορίες για την διαδικασία που μελετάται.
5. *Εκτέλεση του πειράματος*. Κατά την φάση εκτέλεσης του πειράματος αρχικά γίνεται έλεγχος των οργάνων μέτρησης, για να επιβεβαιωθεί ότι λειτουργούν σωστά και δίνουν σωστές μετρήσεις. Επίσης, γίνεται έλεγχος του συστήματος για αστοχίες. Τέλος, κατά την διάρκεια εκτέλεσης γίνεται αναλυτική καταγραφή όλων των συμβάντων.
6. *Ανάλυση των δεδομένων*. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με στατιστικές μεθόδους και επικεντρώνεται στα ακόλουθα θέματα:
   - προσδιορισμός των σημαντικών και ασήμαντων επιδράσεων που προέρχονται από τους παράγοντες του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις τους. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση της ανάλυσης διασποράς (ANOVA - ANalysis Of VAriance).
   - κατάταξη των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους ανάλογα με την σημαντικότητά τους. Η ANOVA υπολογίζει τους αντίστοιχους συντελεστές.
   - σύνθεση του μαθηματικού μοντέλου που προσεγγίζει βέλτιστα την απόκριση Y του συστήματος. Το μοντέλο μπορεί να είναι γραμμικό ή πολυωνυμικό, με την προσθήκη των αλληλεπιδράσεων.
   - αναγνώριση των καλύτερων επιπέδων (τιμές) των παραγόντων, ώστε να βρεθούν η τιμές που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την απόκριση του

συστήματος.

7. *Συμπεράσματα και προτάσεις*. Μετά την ανάλυση των δεδομένων, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το έργο που μελετάται. Εάν έχουν εξαχθεί αρκετές πληροφορίες, τότε μπορεί να προταθούν αλλαγές στην αρχική σχεδίαση της διαδικασίας. Ακόμη και όταν το έργο ολοκληρωθεί με επιτυχία και βρεθούν το μαθηματικό μοντέλο ή/και οι βέλτιστες τιμές για την μελετώμενη διαδικασία, θα πρέπει να γίνουν τα λεγόμενα πειράματα επαλήθευσης και να διαπιστωθεί ότι η τιμή της απόκρισης στην έξοδο, είναι κοντά σε αυτή που έχει υπολογιστεί με βάση τα προηγούμενα βήματα.

5.1.2. Παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων

Οι περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούν πειράματα στα οποία εμπλέκονται δυο ή περισσότεροι παράγοντες. Στην περίπτωση αυτή, ο όρος παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων χρησιμοποιείται για να περιγράψει, όλα τα πειράματα τα οποία προκύπτουν από τον συνδυασμό όλων των επιπέδων, από όλους τους παράγοντες που συμμετέχουν. Εάν για παράδειγμα υπάρχουν δύο παράγοντες Α και Β και για τον μεν Α υπάρχουν α επίπεδα τιμών, ενώ για τον Β υπάρχουν β επίπεδα, τότε τα πειράματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν είναι όλοι οι (α*β) συνδυασμοί. Επιπλέον, εάν για κάθε συνδυασμό πραγματοποιηθούν n αριθμός επαναλήψεων, τότε θα πραγματοποιηθούν (n*α*β) πειράματα.

Υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι για τη διενέργεια παραγοντικών πειραμάτων:

- ο πρώτος λόγος είναι ότι με τα πειράματα αυτά γίνεται δυνατή η αποτίμηση των κοινών επιδράσεων δύο ή περισσοτέρων παραγόντων, δηλαδή των αλληλεπιδράσεων τους. Έτσι αποφεύγονται λανθασμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της μέσης απόκρισης.
- δεύτερον, στα παραγοντικά πειράματα όλες οι παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιδράσεων των παραγόντων. Κάθε παρατήρηση της απόκρισης δίνει πληροφορίες για όλους τους παράγοντες που υπεισέρχονται στο πείραμα. Δεν μένουν δηλαδή παρατηρήσεις της απόκρισης ανεκμετάλλευτες, στην τελική αποτίμηση των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων. Έτσι εξοικονομούνται πειραματικοί πόροι.
- ο τρίτος κύριος λόγος της χρησιμότητας των παραγοντικών πειραμάτων είναι ότι τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά, ισχύουν για ένα μεγάλο εύρος πειραματικών συνθηκών.

Ένα είδος πειράματος το οποίο είναι πολύ διαδεδομένο σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά μειονεκτεί σε σχέση με τα παραγοντικά πειράματα, είναι το πείραμα της αλλαγής «ενός παράγοντα κάθε φορά». Σε μια εκδοχή του πειράματος αυτού γίνονται παρατηρήσεις της απόκρισης στα διαφορετικά επίπεδα ενός παράγοντα, ενώ όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί. Ακολούθως, επιλέγεται ένας άλλος παράγοντας για να μεταβάλλεται διατηρώντας τους υπόλοιπους σταθερούς κ.ο.κ.

Τα πειράματα αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά δεν παρέχουν επαρκή πληροφόρηση για τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά είναι αρκετές φορές λανθασμένα, όταν οι παράγοντες δεν επενεργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο στην απόκριση. Για παράδειγμα, όταν η μεταβλητή απόκρισης είναι η απόδοση μιας βιομηχανικής διεργασίας και υπάρχει ανάγκη εύρεσης των επιπέδων δύο ή περισσότερων παραγόντων στα οποία μεγιστοποιείται η απόδοση, ο παραγοντικός σχεδιασμός οδηγεί πάντα στην προσεγγιστική εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού, ενώ ο σχεδιασμός αλλαγής

ενός παράγοντα κάθε φορά μπορεί να οδηγήσει σε ένα συνδυασμό πολύ διαφορετικό του βέλτιστου.

Επιπλέον, ακόμη και στην περίπτωση που οι παράγοντες επιδρούν μεμονωμένα πάνω στην απόκριση και δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, οι σχεδιασμοί αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά είναι λιγότερο αποτελεσματικοί από τους παραγοντικούς σχεδιασμούς για την εκτίμηση των κύριων επιδράσεων των παραγόντων. Αυτό συμβαίνει γιατί η κύρια επίδραση ενός παράγοντα στους πρώτους σχεδιασμούς, βασίζεται μόνο στις πληροφορίες που δίνουν για τον παράγοντα οι παρατηρήσεις στις οποίες ο παράγοντας αυτός μεταβάλλεται και όλοι οι άλλοι μένουν σταθεροί. Αντίθετα, στους παραγοντικούς σχεδιασμούς χρησιμοποιούνται όλες οι παρατηρήσεις για την εκτίμηση της κύριας επίδρασης κάθε παράγοντα.

Η προηγούμενη αδυναμία των πειραμάτων αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά, για την ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών παραγόντων, περιορίζει το εύρος εφαρμογής των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτά, σε σύγκριση με τα παραγοντικά πειράματα. Έτσι με τους ήδη περιορισμένους διαθέσιμους πόρους, είναι δυνατή η παρακολούθηση λιγότερων παραγόντων, αφού για την εκτίμηση των κυρίων επιδράσεων τους χρειάζονται περισσότερες συνολικά παρατηρήσεις, εάν απαιτηθεί η ίδια ακρίβεια εκτίμησης με αυτήν που δίνουν τα παραγοντικά πειράματα.

5.1.3 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων

Καθώς ο αριθμός των παραγόντων αυξάνει, ο αριθμός των πειραμάτων αυξάνει λογαριθμικά, με αποτέλεσμα πολύ σύντομα να είναι δύσκολη η διαχείριση του πλήθους των δεδομένων. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιούνται έξι παράγοντες μοντελοποίησης στο πείραμα και για το καθένα υπάρχουν δυο τιμές, τότε δημιουργούνται 2^6=64 πειράματα. Αυτό όμως που δυσκολεύει το πρόβλημα είναι ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων. Έτσι για 6 παράγοντες (A, B, C, D, E, F), υπάρχουν δεκαπέντε αλληλεπιδράσεις δυο παραγόντων (AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, BE, BF, CD, CE, CF, DE, DF, EF), είκοσι αλληλεπιδράσεις τριών παραγόντων (ABC, ABD, .), δεκαπέντε των τεσσάρων παραγόντων (ABCD, …), έξι των πέντε παραγόντων και μία των έξι παραγόντων.

Η μελέτη πειραμάτων με μεγάλο αριθμό παραγόντων έχει δείξει ότι σπάνια οι αλληλεπιδράσεις άνω των δυο παραγόντων έχουν σημαντική επίδραση στο πείραμα. Για το λόγο αυτό, σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τα κλασματικά πειράματα, τα οποία εξετάζουν ένα συγκεκριμένο αριθμό παραγόντων και εκτελούν 1/2, 1/4, 1/8… αριθμό πειραμάτων.

5.1.4. Σχεδιασμός πειραμάτων Taguchi

Η μεθοδολογία του Taguchi είναι μια εκτενής ποιοτική προσέγγιση που εισάγει στοιχεία σταθερότητας στη μελέτη κατά τη φάση σχεδιασμού της. Όλα τα σχέδια πειραμάτων προκύπτουν από 18 συγκεκριμένους ορθογώνιους πίνακες. Οι ορθογώνιοι αυτοί πίνακες είναι ειδικοί κλασματικοί παραγοντικοί πίνακες πειραμάτων. Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η χρήση των βασικών πινάκων, ανάλογα με τον αριθμό των παραγόντων και των επιπέδων τους που απαιτεί μια μελέτη. Ο πίνακας L_8 για παράδειγμα απαιτεί την διενέργεια 8 διαφορετικών πειραμάτων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν υπάρχουν 7 παράγοντες με δύο επίπεδα ο καθένας και επομένως ο σχεδιασμός πλήρους παραγοντικού απαιτεί 2^7= 128 πειράματα (σχήμα 5.3).

Η μεθοδολογία πειραμάτων Taguchi είναι παρεμφερής με την κλασσική προσέγγιση των κλασματικών παραγοντικών πειραμάτων, ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση θεωρούνται

υψηλής σπουδαιότητας μόνο οι κύριοι παράγοντες και οι ανά δυο αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Επίσης απαιτείται και ο εκ των προτέρων διαχωρισμός των αλληλεπιδράσεων που θεωρούνται σημαντικές, ανάλογα με τη γνώση και την εμπειρία των μελετητών. Αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης θεωρείται ότι δεν υπάρχουν.

Ορθογώνιος Πίνακας	Αριθμός Πειραμάτων	Μέγιστος αριθμός παραγόντων	Μέγιστος αριθμός στηλών ανάλογα με τον αριθμό των επιπέδων			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3			
L_8	8	7	7			
L_9	9	4		4		
L_{12}	12	11	11			
L_{16}	16	15	15			
L'_{16}	16	5			5	
L_{18}	18	8	1	7		
L_{25}	25	6				6
L_{27}	27	13		13		
L_{32}	32	31	31			
L'_{32}	32	10	1		9	
L_{36}	36	23	11	12		
L'_{36}	36	16	3	13		
L_{50}	50	12	1			11
L_{54}	54	26	1	25		
L_{64}	64	63	63			
L'_{64}	64	21			21	
L_{81}	81	40		40		

Σχήμα 5.2. Βασικές πληροφορίες για τη χρήση των ορθογώνιων πινάκων του Taguchi

Αριθμός Πειραμάτων	Στήλες με τις τιμές των παραγόντων για κάθε πείραμα						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Σχήμα 5.3. Ορθογώνιος πίνακας $L_8(2^7)$

5.2. Μεθοδολογία RSM (Response Surface Methodology)

Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει από την ανάλυση παλινδρόμησης και τον έλεγχο της ποιότητας του με τη βοήθεια του πίνακα ANOVA [183].

5.2.1. Ανάλυση παλινδρόμησης

Ο κύριος σκοπός της ανάλυσης παλινδρόμησης μπορεί να είναι ανάλογα με την περίπτωση, ένας εκ των κάτωθι:

- πρόβλεψη της τιμής της απόκρισης,
- σύνοψη μεγάλου αριθμού δεδομένων για την εύρεση καμπυλών,
- επιλογή ενός μαθηματικού προτύπου που να εξηγεί το σύστημα ή να εκφράζει προσεγγιστικά, το θεωρητικό νόμο της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών.

Μια σχετικά απλή μορφή που χρησιμοποιείται στην ανάλυση παλινδρόμησης είναι αυτή του γραμμικού προτύπου:

$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\ldots+\beta_nX_n+\varepsilon$

όπου:

Y: είναι η απόκριση,

$X_1, X_2, \ldots, X_n$: είναι οι τιμές των ελεγχόμενων παραγόντων

$\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_n$: είναι οι άγνωστες σταθερές που πρέπει να εκτιμηθούν και

ε: είναι το πειραματικό σφάλμα

Υπάρχει μια σειρά από διαφορετικά πρότυπα παλινδρόμησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάθε φορά. Στην περίπτωση που εξετάζονται δύο παράγοντες X_1 και X_2 και η απόκριση του συστήματος Y, τότε μπορούν να προταθούν ενδεικτικά πρότυπα όπως:

- το πρότυπο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (γραμμικό πρότυπο πρώτης τάξης), στο οποίο η επίδραση των δύο παραγόντων στην απόκριση, είναι προσθετική:

  $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\varepsilon$

- το πρότυπο αλληλεπίδρασης:

  $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_{12}X_1X_2+\varepsilon$

  Στο πρότυπο αυτό εκτός από τους γραμμικούς όρους, υπάρχει και ο όρος της αλληλεπίδρασης $\beta_{12}X_1X_2$. Στο πρότυπο αυτό οι παράγοντες επηρεάζουν την απόκριση προσθετικά και πολλαπλασιαστικά.

- το πρότυπο δεύτερης τάξης:

  $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_{12}X_1X_2+\beta_{11}X_1^2+\beta_{22}X_2^2+\varepsilon$

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

Η επιλογή του προτύπου παλινδρόμησης θα πρέπει να γίνεται με συνεκτίμηση του σκοπού της ανάλυσης και της επιδιωκόμενης χρήσης του. Έτσι πολλές φορές απαιτείται και η εμπειρία του αναλυτή για την συγκεκριμένη εφαρμογή που το χρησιμοποιεί. Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί, ότι έξω από το διάστημα των τιμών των παραγόντων είναι

παρακινδυνευμένη η οποιαδήποτε εκτίμηση της απόκρισης και θα πρέπει να αποφεύγεται. Εξαίρεση μπορεί να αποτελέσει η περίπτωση που είναι γνωστό ότι το ίδιο πρότυπο ισχύει σε μια ευρύτερη περιοχή τιμών των παραγόντων. Ανεξάρτητα όμως από το πρότυπο που θα επιλεγεί, στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν τα υπόλοιπα e_i, που είναι οι διαφορές των τιμών της απόκρισης που προκύπτει από το πρότυπο και την πραγματική τιμή της απόκρισης.

5.2.2. Ανάλυση διασποράς

Η προσαρμογή μιας καμπύλης σε δεδομένα (X_i, Y_i) είναι τέλεια, μόνο όταν τα σημεία αυτά βρίσκονται εξαρχής πάνω στην καμπύλη. Στις άλλες περιπτώσεις η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εξασφαλίζει ότι η προσαρμογή είναι η καλύτερη δυνατή, με την έννοια ότι έχει βρεθεί μια καμπύλη, ώστε τα δεδομένα της απόκρισης Y_i να έχουν το μικρότερο δυνατό άθροισμα τετραγωνικών αποκλίσεων από αυτήν. Οι αποκλίσεις αυτές όμως από μόνες τους (απόλυτες τιμές των υπολοίπων e_i) μπορεί να είναι μεγάλες ή μικρές.

Η ακρίβεια της προσαρμογής μπορεί να μελετηθεί, εάν πρώτα αναλυθεί η μεταβλητότητα των δεδομένων Y_i και αυτό γίνεται με τη χρήση του τύπου της ανάλυσης διασποράς:

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2=\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y})^2+\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$$

ή

SST=SSR+SSE

όπου:

y_i: οι i τιμές των παρατηρήσεων (αποκρίσεις για συγκεκριμένες τιμές παραγόντων)

$\hat{y}_i$: η i προσαρμοσμένη τιμή

$\bar{y}$: η δειγματική μέση τιμή

SST: το μέτρο της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων y_i – ολικό άθροισμα τετραγώνων (Sum of Squares Total)

SSR: το άθροισμα των τετραγώνων που οφείλεται στη παλινδρόμηση (Sum Squares due to Regression). Εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων (της ολικής μεταβλητότητας) που έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, δηλαδή οφείλεται στην παλινδρόμηση.

SSE: το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων ή άθροισμα τετραγώνων γύρω από την παλινδρόμηση ή άθροισμα τετραγώνων που οφείλεται σε σφάλματα (Sum of Squares due to Error). Εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων που παραμένει ανεξήγητο μετά την προσαρμογή του προτύπου παλινδρόμησης.

Επιπλέον, ορίζεται ο συντελεστής προσδιορισμού (r^2), ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέτρο της ακρίβειας της προσαρμογής:

$$r^2=\frac{SSR}{SST}$$

Όσο μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, τόσο ο λόγος αυτός είναι πλησιέστερος στη μονάδα. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ένας πίνακας

με τα στοιχεία που περιλαμβάνει η ανάλυση διασποράς για την περίπτωση της απλής γραμμικής παρεμβολής.

Προέλευση Μεταβλητότητας	Βαθμοί Ελευθερίας DF (degrees of freedom)	Άθροισμα τετραγώνων SS (Sum of Squares)	Μέσο τετράγωνο MS (Mean Square)	Τιμή της F
Παλινδρόμηση	1	SSR	SSR/1	SSR/s^2
Υπόλοιπα	n-2	SSE	s^2=SSE/(n-2)	
Ολική	n-1	SST		

n: οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας

Σχήμα 5.4. Ενδεικτικός πίνακας ανάλυσης διασποράς

5.3. Εφαρμογή της μεθοδολογίας RSM στη διάτρηση με 16 πειράματα

5.3.1. Υπολογισμός μαθηματικών μοντέλων

Έχοντας επιβεβαιώσει την ακρίβεια των υπολογισμών του DRILL3D, αποφασίστηκε η χρήση του σε συνδυασμό με τη μέθοδο RSM. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν περιελάμβαναν τη διάμετρο (D), το λόγο μεγέθους του πυρήνα προς τη διάμετρο του εργαλείου (W/D), την πρόωση (f) και τη ταχύτητα κοπής (V). Τα επίπεδα των τιμών για κάθε παράμετρο φαίνονται στο σχήμα 5.5, και περιλαμβάνεται η χρήση: τεσσάρων εργαλείων (διαμέτρων 10, 12, 14 και 16mm), τεσσάρων λόγων W/D (0.125, 0.130, 0.145 και 0.150), τεσσάρων προώσεων (0.20, 0.30, 0.40 και 0.50mm/rev) και δύο διαφορετικών ταχυτήτων κοπής (15 και 20 m/min)

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	Επίπεδα			
			I	II	III	IV
Διάμετρος εργαλείου	D	mm	10	12	14	16
Λόγος W/D	W/D	-	0.125	0.130	0.145	0.150
Πρόωση	f	mm/rev	0.20	0.30	0.40	0.50
Ταχύτητα κοπής	V	m/min	15	20		

Σχήμα 5.5. Παράμετροι μελέτης της διάτρησης και τα επίπεδα τιμών τους

Από το μέγεθος των επιπέδων που περιλαμβάνουν οι χρησιμοποιούμενοι παράγοντες, γίνεται φανερό ότι θα απαιτούνταν συνολικά 256 εργαστηριακά πειράματα, ώστε να εκτελεστεί ένα πλήρες παραγοντικό μοντέλο. Τα μισά από αυτά θα χρειάζονταν για να υπολογιστεί η συνολική δύναμη κοπής διάτρησης, ενώ τα υπόλοιπα για τη δύναμη κοπής εξαιτίας του πυρήνα του τρυπανιού.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης του DRILL3D είναι, ότι σε κάθε προσομοίωση δίνονται οι τιμές της δύναμης κοπής και για τις δύο περιοχές των κόψεων. Αλλά και πάλι οι απαραίτητες προσομοιώσεις που θα έπρεπε να τρέξουν ήταν 128, αριθμός σημαντικά μεγάλος. Έτσι αποφασίστηκε η χρήση του ορθογώνιου πίνακα Taguchi L_{16}, ώστε να είναι δυνατό να μελετηθούν με στατιστικό τρόπο, όλοι οι υπόλοιποι δυνατοί συνδυασμοί. Στο σχήμα 5.6 φαίνονται αναλυτικά οι τιμές των δυνάμεων που προέκυψαν από το DRILL3D για

τα 16 πειράματα που βασίζονται στον πίνακα L_{16}. Το υλικό του εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις ήταν το HSS και το υλικό του τεμαχίου το CK60.

Το πολυωνυμικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε, και για τις δύο δυνάμεις κοπής βασίστηκε στην εξίσωση:

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_4+b_{11}X_1^2+b_{22}X_2^2+b_{33}X_3^2+b_{44}X_4^2+$$

$$+b_{12}X_1X_2+b_{13}X_1X_3+b_{14}X_1X_4+b_{23}X_2X_3+b_{24}X_2X_4+b_{34}X_3X_4$$

όπου:

Y: είναι η απόκριση (δύναμη κοπής κατά τη διάτρηση),

X_i: είναι οι τιμές των παραγόντων και

$b_0,\ldots,b_{34}$: είναι οι υπολογιζόμενοι συντελεστές παλινδρόμησης

α/α	D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_z total (N)	DRILL3D F_z chisel (N)
1	10	0,125	0,2	15	1916	1072
2	10	0,130	0,3	15	2510	1436
3	10	0,145	0,4	20	3275	2071
4	10	0,150	0,5	20	3864	2511
5	12	0,125	0,3	20	3127	1848
6	12	0,130	0,2	20	2471	1488
7	12	0,145	0,5	15	4337	2747
8	12	0,150	0,4	15	3958	2480
9	14	0,125	0,4	15	4204	2428
10	14	0,130	0,5	15	4876	2918
11	14	0,145	0,2	20	3248	2089
12	14	0,150	0,3	20	4185	2740
13	16	0,125	0,5	20	5933	3615
14	16	0,130	0,4	20	5260	3255
15	16	0,145	0,3	15	4455	2810
16	16	0,150	0,2	15	3520	2257

Σχήμα 5.6. Πειραματικό πλάνο με τις υπολογισμένες δυνάμεις κοπής (πίνακας Taguchi L_{16})

Με την χρήση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 5.6 και με τη βοήθεια του μαθηματικού προτύπου που αναφέρθηκε, υπολογίζονται τα μαθηματικά μοντέλα για την συνολική δύναμη κοπής του εργαλείου και για την δύναμη κοπής εξαιτίας του πυρήνα του και δίνονται στη συνέχεια:

$$F_{z_total}=9941-266.5D-112015\left(W/D\right)-2045f-143.24V+5.109D^2+343750\left(W/D\right)^2-5056f^2+$$

$$+937D\left(W/D\right)+928.4Df+6.788DV+29603\left(W/D\right)f+715.8\left(W/D\right)V$$

και

$$F_{z_chisel}=8124-419.9D-77116\left(W/D\right)-4356f-104.76V+4.516D^2+171250\left(W/D\right)^2-2318.7f^2-$$

$$-2062.5D\left(W/D\right)+394.11Df+5.811DV+37966\left(W/D\right)f+539.6\left(W/D\right)V$$

όπου:

D: η διάμετρος του εργαλείου σε mm

W/D: ο λόγος μεγέθους του πυρήνα προς την διάμετρο του εργαλείου

f: η πρόωση σε mm/rev

V: η ταχύτητα κοπής σε m/min

(οι τιμές που παραλείπονται εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με άλλες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο)

5.3.2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων και επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων

Η επάρκεια των μαθηματικών μοντέλων που προέκυψαν από την ανάλυση παλινδρόμησης εξετάστηκε στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Ο πίνακας ANOVA που χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση αυτή, φαίνεται και για τις δύο περιπτώσεις στο σχήμα 5.7. Σύμφωνα με την μεθοδολογία, η υπολογιζόμενη τιμή F-ratio του μαθηματικού μοντέλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται με βάση τους βαθμούς ελευθερίας στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Στην περίπτωσή μας η τιμή αυτή είναι 636.83 και 1022.27 αντίστοιχα για τα δύο μαθηματικά μοντέλα, ενώ αυτή που προκύπτει από τους στατιστικούς πίνακες είναι 8.74 και επομένως σημαντικά μικρότερη. Επίσης η τιμή του P είναι 0 με ακρίβεια τρίτου δεκαδικού και επομένως αποδεικνύεται η υψηλή συσχέτιση μεταξύ των συμμετεχόντων παραγόντων στα μαθηματικά μοντέλα και της απόκρισης.

Source of variation for $F_{z\ total}$	DF	SS	MS	F	P
Regression	12	16974569	1414547	636,83	0.000
Residual error	3	6664	2221		
Total	15	16981232			
R-sq(adj)	99.8%				

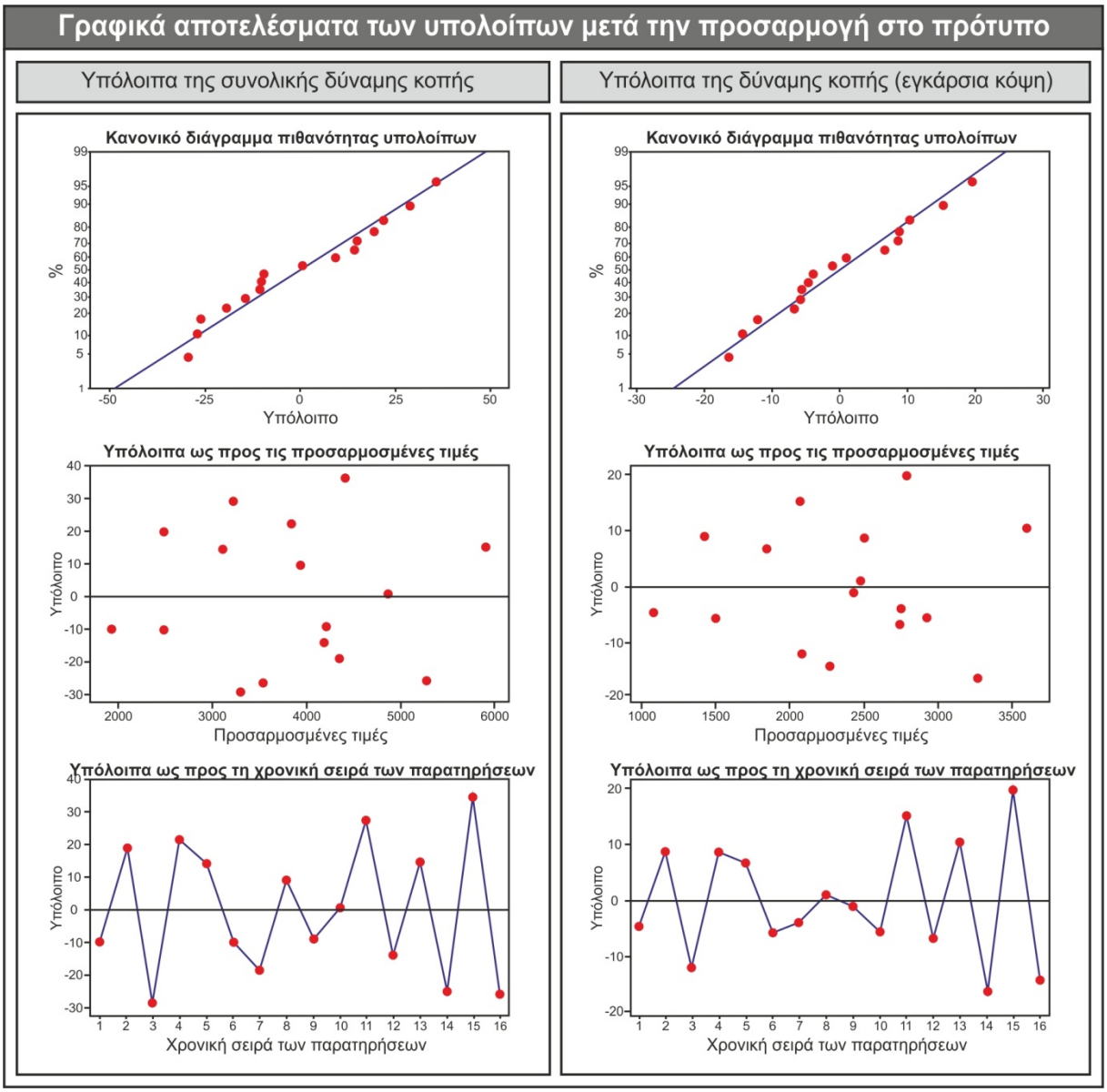
Source of variation for $F_{z\ chisel}$	DF	SS	MS	F	P
Regression	12	6927031	577253	1022,27	0.000
Residual error	3	1694	565		
Total	15	6928725			
R-sq(adj)	99.9%				

F-table $_{(12,\ 3,\ 0.05)}$= 8.74

Σχήμα 5.7. Πίνακας αποτελεσμάτων ANOVA για τα μαθηματικά μοντέλα

Ένας επιπλέον τρόπος να επιβεβαιωθεί η ικανότητα των μαθηματικών μοντέλων να δίνουν ακριβείς τιμές αποτελεί και η παράμετρος R-sq(adj), η οποία μετράει την μεταβλητότητα στην απόκριση που μπορεί να εξηγηθεί από τους χρησιμοποιούμενους παράγοντες αλλά και τις δευτέρου βαθμοί αλληλεπιδράσεις τους. Και στις δύο περιπτώσεις, η παράμετρος είναι πολύ πάνω από το 99% (99.8% και 99.9% αντίστοιχα), με αποτέλεσμα να επιβεβαιώνεται η επάρκεια των μαθηματικών μοντέλων και πάλι.

Η ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων ελέγχεται και με την μελέτη των υπολοίπων μετά την προσαρμογή του προτύπου (σχήμα 5.8). Στον έλεγχο αυτό απαιτείται τα υπόλοιπα να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκαν τα κανονικά διαγράμματα πιθανότητας των υπολοίπων και για τις δύο περιπτώσεις. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν, ότι τα υπόλοιπα ακολουθούν μια σχεδόν γραμμική πορεία. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα διαγράμματα των υπολοίπων ως προς τις προσαρμοσμένες τιμές και τα διαγράμματα των υπολοίπων ως προς την χρονική σειρά των παρατηρήσεων και για τις δύο περιπτώσεις των δυνάμεων. Σε όλα τα διαγράμματα φαίνεται μια ομοιόμορφη κατανομή των υπολοίπων ως προς τις δύο πλευρές της γραμμής αναφοράς.



Σχήμα 5.8. Αποτελέσματα της ανάλυσης υπολοίπων μετά την προσαρμογή στο πρότυπο

5.3.3. Χρήση των μαθηματικών μοντέλων στο πλήρες παραγοντικό πείραμα

Στα σχήματα 5.9, 5.10, 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων που προέκυψαν τόσο από την χρήση του DRILL3D, όσο και των μαθηματικών μοντέλων που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για τα τρυπάνια των 10mm, 12mm, 14mm και 16mm αντίστοιχα. Όλα τα ψηφιακά πειράματα προσομοιώθηκαν με το DRILL3D, ώστε να υπάρχουν όλα τα στοιχεία για ένα πλήρες παραγοντικό σχεδιασμό. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές των αντίστοιχων δυνάμεων από τα μαθηματικά μοντέλα που προκύψαν από την χρήση μόνο 16 πειραμάτων σύμφωνα με τον πίνακα L_{16} του Taguchi.

Φαίνεται καθαρά ότι τα αποτελέσματα των μαθηματικών μοντέλων είναι πολύ ακριβή. Ο αριθμός των πειραμάτων είναι 128 για κάθε περίπτωση (256 συνολικά) και η μέγιστη διαφορά που εμφανίζεται μεταξύ των δύο τρόπων υπολογισμού είναι ίση με ±5% για την συνολική μέγιστη δύναμη κοπής και περίπου ±6.5% για τη δύναμη κοπής εξαιτίας της εγκάρσιας κόψης. Η μέση τιμή των αποκλίσεων και για τις δύο περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στο 0 (0.1888% και 0.8106% αντίστοιχα), ενώ η τυπική απόκλιση περιορίζεται σε 1.657% και 2.127% αντίστοιχα (σχήμα 5.13).

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	% σφάλμα	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)	% σφάλμα
10	0,125	0,2	15	1916	1925	-0,46	1072	1076	-0,45
			20	2011	1995	0,76	1166	1180	-1,27
		0,3	15	2458	2466	-0,32	1380	1394	-0,98
			20	2579	2536	1,65	1501	1498	0,23
		0,4	15	2822	2906	-2,97	1640	1664	-1,48
			20	2966	2976	-0,35	1784	1768	0,87
		0,5	15	3289	3245	1,34	1901	1889	0,62
			20	3456	3315	4,06	2067	1993	3,61
	0,13	0,2	15	1927	1933	-0,32	1098	1091	0,66
			20	2023	2022	0,07	1194	1208	-1,19
		0,3	15	2510	2489	0,84	1436	1427	0,66
			20	2636	2577	2,23	1562	1544	1,15
		0,4	15	2903	2944	-1,40	1726	1717	0,55
			20	3055	3032	0,73	1878	1834	2,31
		0,5	15	3394	3298	2,84	2012	1960	2,60
			20	3570	3386	5,16	2189	2078	5,08
	0,145	0,2	15	2089	2061	1,31	1271	1185	6,74
			20	2200	2203	-0,15	1382	1343	2,83
		0,3	15	2673	2662	0,44	1614	1578	2,21
			20	2815	2804	0,40	1755	1736	1,10
		0,4	15	3108	3161	-1,71	1904	1925	-1,11
			20	3275	3303	-0,87	2071	2083	-0,58
		0,5	15	3586	3559	0,77	2225	2225	0,01
			20	3782	3701	2,13	2421	2383	1,55
	0,15	0,2	15	2088	2138	-2,42	1274	1234	3,14
			20	2200	2298	-4,49	1385	1405	-1,42
		0,3	15	2722	2753	-1,16	1667	1646	1,27
			20	2868	2914	-1,59	1813	1817	-0,22
		0,4	15	3146	3267	-3,87	1993	2011	-0,91
			20	3321	3428	-3,22	2168	2183	-0,68
		0,5	15	3662	3680	-0,51	2309	2331	-0,96
			20	3864	3840	0,62	2511	2502	0,35

Σχήμα 5.9. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και RSM για εργαλείο D=10mm

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	% σφάλμα	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)	% σφάλμα
12	0,125	0,2	15	2284	2306	-0,95	1297	1283	1,06
			20	2398	2444	-1,94	1410	1445	-2,46
		0,3	15	2978	2973	0,17	1699	1679	1,16
			20	3127	3111	0,50	1848	1841	0,36
		0,4	15	3544	3538	0,15	2030	2029	0,06
			20	3722	3677	1,20	2208	2191	0,78
		0,5	15	3963	4003	-1,00	2337	2332	0,23
			20	4168	4141	0,65	2542	2494	1,89
	0,13	0,2	15	2351	2323	1,16	1368	1318	3,66
			20	2471	2480	-0,37	1488	1493	-0,37
		0,3	15	3057	3005	1,68	1783	1733	2,80
			20	3213	3161	1,60	1939	1908	1,59
		0,4	15	3650	3586	1,76	2143	2101	1,95
			20	3838	3742	2,50	2331	2277	2,32
		0,5	15	4076	4065	0,26	2459	2424	1,44
			20	4291	4221	1,63	2675	2599	2,82
	0,145	0,2	15	2553	2480	2,86	1584	1474	6,91
			20	2692	2690	0,07	1722	1690	1,88
		0,3	15	3271	3206	1,99	2015	1946	3,42
			20	3448	3416	0,92	2192	2162	1,35
		0,4	15	3862	3831	0,82	2376	2372	0,21
			20	4071	4041	0,74	2585	2588	-0,10
		0,5	15	4337	4354	-0,40	2747	2751	-0,12
			20	4578	4565	0,30	2988	2967	0,72
	0,15	0,2	15	2588	2566	0,86	1624	1543	4,96
			20	2731	2794	-2,32	1766	1773	-0,38
		0,3	15	3349	3307	1,24	2099	2034	3,07
			20	3533	3535	-0,06	2283	2264	0,83
		0,4	15	3958	3947	0,27	2480	2479	0,03
			20	4175	4175	0,01	2697	2708	-0,42
		0,5	15	4417	4485	-1,55	2842	2877	-1,24
			20	4666	4713	-1,01	3091	3106	-0,50

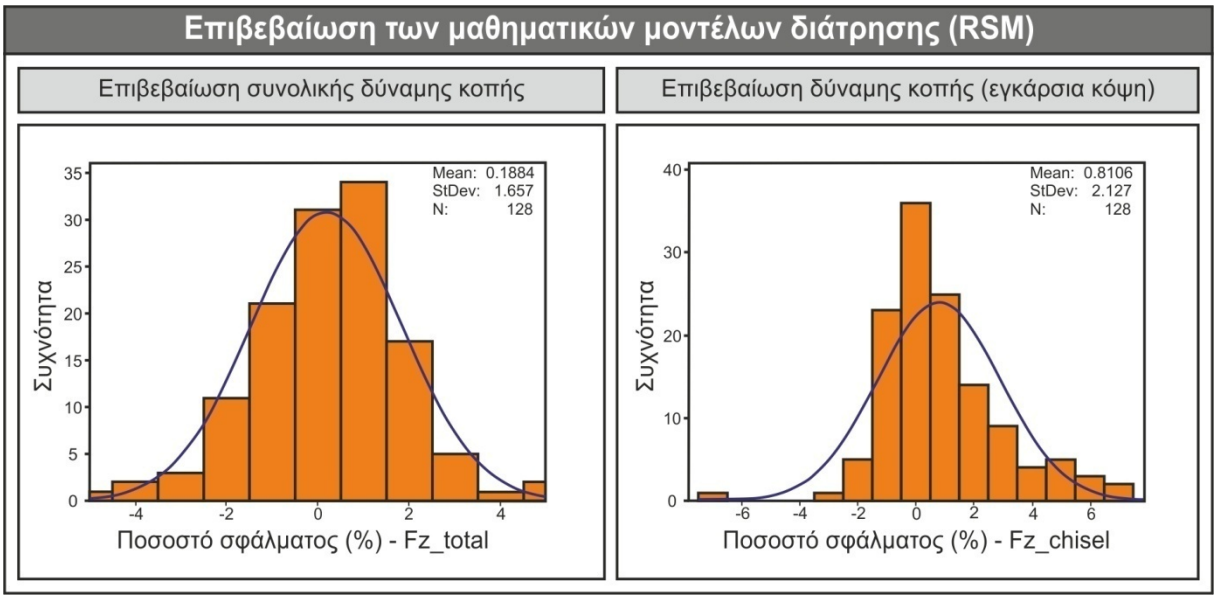
Σχήμα 5.10. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και RSM για εργαλείο D=12mm

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	% σφάλμα	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)	% σφάλμα
14	0,125	0,2	15	2727	2728	-0,01	1586	1526	3,78
			20	2866	2934	-2,36	1725	1746	-1,23
		0,3	15	3527	3520	0,19	2047	2000	2,27
			20	3706	3727	-0,55	2226	2221	0,26
		0,4	15	4204	4212	-0,18	2428	2429	-0,02
			20	4417	4418	-0,02	2641	2649	-0,30
		0,5	15	4742	4802	-1,26	2775	2811	-1,30
			20	4985	5008	-0,46	3018	3031	-0,43
	0,13	0,2	15	2806	2755	1,84	1670	1581	5,32
			20	2953	2979	-0,88	1817	1815	0,09
		0,3	15	3631	3562	1,91	2159	2075	3,87
			20	3821	3786	0,90	2348	2309	1,67
		0,4	15	4301	4268	0,75	2534	2522	0,45
			20	4523	4492	0,67	2756	2756	0,00
		0,5	15	4876	4873	0,06	2918	2923	-0,17
			20	5132	5098	0,68	3174	3157	0,55
	0,145	0,2	15	3079	2939	4,55	1921	1799	6,33
			20	3248	3217	0,94	2089	2073	0,76
		0,3	15	3886	3791	2,44	2435	2350	3,47
			20	4099	4069	0,74	2648	2624	0,90
		0,4	15	4634	4541	1,99	2893	2854	1,33
			20	4888	4819	1,40	3147	3128	0,58
		0,5	15	5292	5191	1,91	3363	3312	1,51
			20	5587	5469	2,11	3658	3586	1,96
	0,15	0,2	15	3131	3035	3,05	2016	1889	6,32
			20	3307	3331	-0,71	2193	2177	0,76
		0,3	15	3964	3901	1,57	2519	2459	2,41
			20	4185	4197	-0,30	2740	2746	-0,22
		0,4	15	4595	4667	-1,56	2918	2982	-2,20
			20	4851	4963	-2,30	3174	3270	-3,02
		0,5	15	5256	5331	-1,43	3420	3459	-1,14
			20	5556	5627	-1,28	3720	3747	-0,72

Σχήμα 5.11. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και RSM για εργαλείο D=14mm

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	% σφάλμα	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)	% σφάλμα
16	0,125	0,2	15	3192	3190	0,05	1896	1804	4,86
			20	3358	3465	-3,17	2063	2083	-0,96
		0,3	15	4084	4109	-0,61	2405	2358	1,94
			20	4295	4383	-2,05	2616	2636	-0,79
		0,4	15	4872	4926	-1,10	2857	2865	-0,27
			20	5123	5200	-1,51	3108	3144	-1,14
		0,5	15	5641	5642	-0,01	3323	3326	-0,09
			20	5933	5916	0,28	3615	3604	0,28
	0,13	0,2	15	3296	3227	2,08	2006	1881	6,27
			20	3472	3519	-1,37	2182	2172	0,46
		0,3	15	4196	4160	0,85	2525	2453	2,85
			20	4417	4452	-0,79	2747	2745	0,06
		0,4	15	4997	4992	0,11	2993	2979	0,44
			20	5260	5284	-0,46	3255	3271	-0,50
		0,5	15	5754	5723	0,54	3448	3459	-0,34
			20	6056	6015	0,68	3750	3751	-0,03
	0,145	0,2	15	3543	3439	2,93	2274	2160	5,00
			20	3743	3785	-1,14	2474	2493	-0,77
		0,3	15	4455	4417	0,85	2810	2790	0,71
			20	4701	4763	-1,31	3057	3122	-2,15
		0,4	15	5366	5293	1,36	3392	3373	0,56
			20	5663	5639	0,43	3690	3706	-0,43
		0,5	15	6114	6068	0,75	3843	3910	-1,73
			20	6451	6414	0,58	4181	4242	-1,48
	0,15	0,2	15	3520	3545	-0,71	2257	2271	-0,61
			20	3718	3908	-5,13	2455	2617	-6,58
		0,3	15	4587	4537	1,10	2951	2919	1,07
			20	4846	4901	-1,12	3210	3265	-1,73
		0,4	15	5523	5428	1,72	3560	3522	1,07
			20	5835	5792	0,75	3872	3867	0,12
		0,5	15	6283	6218	1,03	4024	4077	-1,32
			20	6636	6582	0,82	4377	4423	-1,05

Σχήμα 5.12. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και RSM για εργαλείο D=16mm



Σχήμα 5.13. Κατανομές σφαλμάτων των μαθηματικών μοντέλων

Τα αποτελέσματα και η σύγκριση τους αποδεικνύουν την εγκυρότητα της ακολουθούμενης μεθοδολογίας και επιβεβαιώνει την ορθότητα της χρήσης κατάλληλα επιλεγμένων ψηφιακών πειραμάτων, με στόχο να αναπτυχθεί ένα έγκυρο μαθηματικό μοντέλο.

Στην συνέχεια τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν τα σχήματα 5.14 και 5.15 στα οποία φαίνονται οι 3D επιφάνειες απόκρισής τους (συνολική δύναμη κοπής και δύναμη κοπής λόγω της εγκάρσιας κόψης). Στα διαγράμματα αυτά μπορεί κανείς να ανατρέξει για ένα γρήγορο υπολογισμό των αντίστοιχων δυνάμεων, γνωρίζοντας τις παραμέτρους των εργαλείων, όπως: διάμετρο (mm), λόγο μεγέθους πυρήνα προς διάμετρο, πρόωση ((mm/rev) και ταχύτητα κοπής (m/min) και για συνδυασμό υλικών εργαλείου-τεμαχίου HSS-CK60.

5.4. Εφαρμογή της μεθοδολογίας RSM στη διάτρηση με 128 πειράματα

5.4.1. Δημιουργία μαθηματικών μοντέλων από το πλήρες παραγοντικό πείραμα

Με την χρήση όλων των αποτελεσμάτων του DRILL3D που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 5.9 - 5.12 (256 πειράματα συνολικά) και με τη χρήση του μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, υπολογίζονται τα μαθηματικά μοντέλα για την συνολική δύναμη κοπής του εργαλείου και την δύναμη κοπής εξαιτίας του πυρήνα του. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση όλων των ψηφιακών πειραμάτων, με στόχο να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, ενώ οι εξισώσεις που προκύπτουν δίνονται στη συνέχεια:

$$F_{z_total}=-96-266.8D-28895\left(W/_D\right)-2775.9f-76.69V+3.3379D^2-173594\left(W/_D\right)^2-4868f^2+$$
$$+1670.8D\left(W/_D\right)+627.84Df+3.6606DV+25470\left(W/_D\right)f+319.2\left(W/_D\right)V+71.76fV$$

και

$$F_{z_chisel}=1425.6-291.92D-7314\left(W/_D\right)-4463.9f-76.97V+2.4629D^2-104844\left(W/_D\right)^2-$$
$$-2041.4f^2+1860D\left(W/_D\right)+359.731Df+3.6744DV+30774\left(W/_D\right)f+319.34\left(W/_D\right)V+71.987fV$$

όπου:

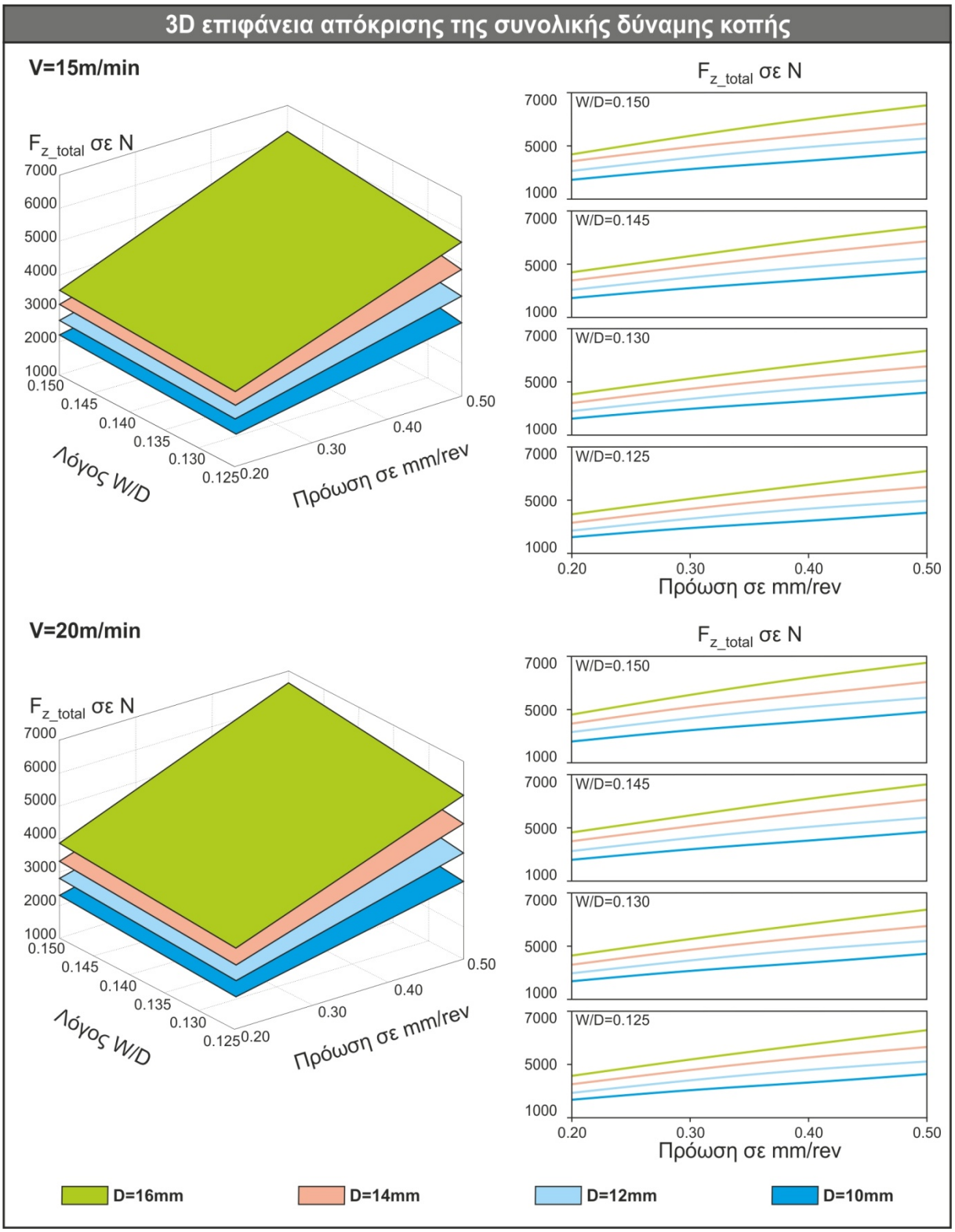
D: η διάμετρος του εργαλείου σε mm

W/D: ο λόγος μεγέθους του πυρήνα προς την διάμετρο του εργαλείου

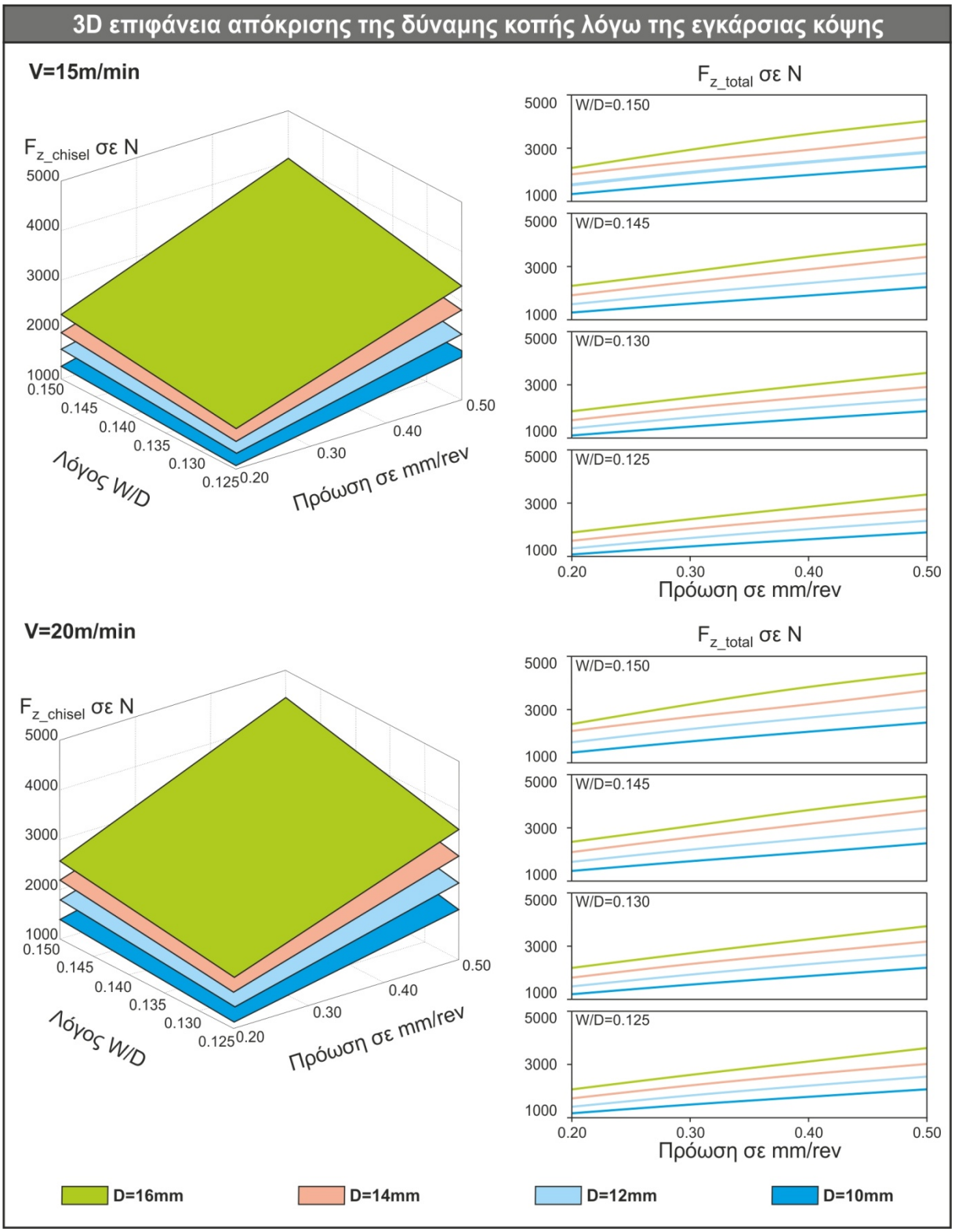
f: η πρόωση σε mm/rev

V: η ταχύτητα κοπής σε m/min

(οι τιμές που παραλείπονται εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με άλλες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο)



Σχήμα 5.14. 3D επιφάνειες απόκρισης της συνολικής δύναμης κοπής για σειρά εργαλείων και συνθηκών κοπής



Σχήμα 5.15. 3D επιφάνειες απόκρισης της δύναμης κοπής λόγω της εγκάρσιας κόψης για σειρά εργαλείων και συνθηκών κοπής

Οι αντίστοιχοι έλεγχοι και σε αυτή την περίπτωση επιβεβαίωσαν την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων, κάτι που ήταν αναμενόμενο, αφού χρησιμοποιήθηκαν 128 πειράματα για κάθε ένα από αυτά (σχεδιασμός πλήρους παραγοντικού). Η μεγάλη ακρίβεια των υπολογισμών προκύπτει και με τον υπολογισμό της μέσης τιμής (0.002 και -0.017% αντίστοιχα) και της τυπικής απόκλισης (1.028 και 1.118% αντίστοιχα) των σφαλμάτων που αποδεικνύουν την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτή που υπολογίσθηκε προηγουμένως (σχήμα 5.16).

5.4.2. Δημιουργία μαθηματικών μοντέλων από το πλήρες παραγοντικό πείραμα μόνο με τους σημαντικότερους στατιστικά παράγοντες

Έχοντας τα αποτελέσματα του DRILL3D για όλα τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση ANOVA, ώστε να βρεθούν οι στατιστικά σημαντικοί παράγοντες στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης (σχήμα 5.17). Αυτοί περιλαμβάνουν πέρα από την απαραίτητη σταθερά της εξίσωσης, τις τιμές των συντελεστών για τους παράγοντες: D, f, D^2, $(W/D)^2$, f^2, V^2, D*(W/D), D*f, D*V, (W/D)*f, (W/D)*V και f*V. Αυτοί και μόνο οι παράγοντες, όταν χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μαθηματικών μοντέλων, δίνουν της επόμενες εξισώσεις αντίστοιχα:

$$F_{z_total}=1250-269.92D-2809.5f+3.3379D^2-71493\left(W/D\right)^2-4868f^2-2.2873V^2+1693.6D\left(W/D\right)+$$
$$+627.84Df+3.6606DV+25714\left(W/D\right)f+343.7\left(W/D\right)V+71.76fV$$

και

$$F_{z_chisel}=1272.8-292.71D-4472.4f+2.4629D^2-79001\left(W/D\right)^2-2041.4f^2-2.2236V^2+$$
$$+1865.8D\left(W/D\right)+359.731Df+3.6744DV+30836\left(W/D\right)f+325.53\left(W/D\right)V+71.988fV$$

όπου:

D: η διάμετρος του εργαλείου σε mm

W/D: ο λόγος μεγέθους του πυρήνα προς την διάμετρο του εργαλείου

f: η πρόωση σε mm/rev

V: η ταχύτητα κοπής σε m/min

(οι τιμές που παραλείπονται εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με άλλες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο)

Επειδή χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικά σημαντικοί παράγοντες στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης και ταυτόχρονα το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι μεγάλο (N=128), η ακρίβεια των υπολογισμών αποδεικνύεται και πάλι μεγάλη, αφού η μέση τιμή των σφαλμάτων που προκύπτει είναι -0,015 και -0,017% αντίστοιχα, ενώ η τυπική τους απόκλιση για κάθε περίπτωση είναι ίση με 1.036 και 1.121% αντίστοιχα (σχήμα 5.18).

Με την τελευταία αυτή ανάλυση, δίνεται έμφαση στους στατιστικά σημαντικούς παράγοντες των εξισώσεων, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό και την εμπειρία των μελετητών της κατεργασίας της διάτρησης, όταν εκτιμούν τους παράγοντες που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν, στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα πολύ λιγότερα πειράματα.

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)
10	0,125	0,2	15	1916	1913	1072	1079
			20	2011	1984	1166	1150
		0,3	15	2458	2446	1380	1383
			20	2579	2552	1501	1490
		0,4	15	2822	2881	1640	1646
			20	2966	3024	1784	1789
		0,5	15	3289	3219	1901	1869
			20	3456	3398	2067	2047
	0,13	0,2	15	1927	1969	1098	1130
			20	2023	2048	1194	1209
		0,3	15	2510	2515	1436	1449
			20	2636	2629	1562	1564
		0,4	15	2903	2963	1726	1728
			20	3055	3113	1878	1878
		0,5	15	3394	3314	2012	1966
			20	3570	3500	2189	2152
	0,145	0,2	15	2089	2085	1271	1250
			20	2200	2188	1382	1353
		0,3	15	2673	2669	1614	1616
			20	2815	2808	1755	1754
		0,4	15	3108	3155	1904	1941
			20	3275	3330	2071	2115
		0,5	15	3586	3544	2225	2224
			20	3782	3755	2421	2435
	0,15	0,2	15	2088	2106	1274	1280
			20	2200	2217	1385	1390
		0,3	15	2722	2703	1667	1661
			20	2868	2850	1813	1807
		0,4	15	3146	3202	1993	2001
			20	3321	3385	2168	2183
		0,5	15	3662	3604	2309	2300
			20	3864	3822	2511	2519
12	0,125	0,2	15	2284	2305	1297	1323
			20	2398	2412	1410	1430
		0,3	15	2978	2963	1699	1699
			20	3127	3106	1848	1842
		0,4	15	3544	3524	2030	2034
			20	3722	3703	2208	2213
		0,5	15	3963	3988	2337	2328
			20	4168	4203	2542	2543
	0,13	0,2	15	2351	2378	1368	1392
			20	2471	2493	1488	1508
		0,3	15	3057	3049	1783	1784
			20	3213	3200	1939	1935
		0,4	15	3650	3623	2143	2134
			20	3838	3810	2331	2321
		0,5	15	4076	4099	2459	2444
			20	4291	4322	2675	2667
	0,145	0,2	15	2553	2544	1584	1569
			20	2692	2683	1722	1708
		0,3	15	3271	3253	2015	2006
			20	3448	3428	2192	2181
		0,4	15	3862	3865	2376	2403
			20	4071	4076	2585	2614
		0,5	15	4337	4380	2747	2758
			20	4578	4627	2988	3005
	0,15	0,2	15	2588	2582	1624	1617
			20	2731	2729	1766	1764
		0,3	15	3349	3304	2099	2070
			20	3533	3487	2283	2253
		0,4	15	3958	3929	2480	2482
			20	4175	4148	2697	2701
		0,5	15	4417	4456	2842	2853
			20	4666	4711	3091	3108

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)
14	0,125	0,2	15	2727	2723	1586	1586
			20	2866	2867	1725	1730
		0,3	15	3527	3507	2047	2034
			20	3706	3687	2226	2214
		0,4	15	4204	4194	2428	2441
			20	4417	4410	2641	2657
		0,5	15	4742	4783	2775	2807
			20	4985	5035	3018	3059
	0,13	0,2	15	2806	2813	1670	1674
			20	2953	2965	1817	1826
		0,3	15	3631	3610	2159	2137
			20	3821	3798	2348	2325
		0,4	15	4301	4309	2534	2560
			20	4523	4533	2756	2784
		0,5	15	4876	4911	2918	2941
			20	5132	5171	3174	3201
	0,145	0,2	15	3079	3029	1921	1906
			20	3248	3205	2089	2082
		0,3	15	3886	3864	2435	2416
			20	4099	4076	2648	2628
		0,4	15	4634	4602	2893	2884
			20	4888	4850	3147	3132
		0,5	15	5292	5242	3363	3312
			20	5587	5526	3658	3596
	0,15	0,2	15	3131	3084	2016	1973
			20	3307	3268	2193	2157
		0,3	15	3964	3932	2519	2498
			20	4185	4152	2740	2718
		0,4	15	4595	4682	2918	2982
			20	4851	4938	3174	3238
		0,5	15	5256	5335	3420	3425
			20	5556	5627	3720	3717
16	0,125	0,2	15	3192	3169	1896	1870
			20	3358	3349	2063	2050
		0,3	15	4084	4078	2405	2389
			20	4295	4295	2616	2606
		0,4	15	4872	4890	2857	2868
			20	5123	5143	3108	3121
		0,5	15	5641	5605	3323	3306
			20	5933	5894	3615	3595
	0,13	0,2	15	3296	3275	2006	1976
			20	3472	3464	2182	2165
		0,3	15	4196	4197	2525	2511
			20	4417	4422	2747	2736
		0,4	15	4997	5022	2993	3005
			20	5260	5283	3255	3266
		0,5	15	5754	5750	3448	3459
			20	6056	6046	3750	3756
	0,145	0,2	15	3543	3541	2274	2264
			20	3743	3754	2474	2476
		0,3	15	4455	4502	2810	2845
			20	4701	4750	3057	3094
		0,4	15	5366	5365	3392	3386
			20	5663	5649	3690	3670
		0,5	15	6114	6131	3843	3885
			20	6451	6451	4181	4206
	0,15	0,2	15	3520	3613	2257	2349
			20	3718	3834	2455	2570
		0,3	15	4587	4586	2951	2946
			20	4846	4843	3210	3202
		0,4	15	5523	5462	3560	3502
			20	5835	5754	3872	3794
		0,5	15	6283	6241	4024	4017
			20	6636	6569	4377	4345

Fz_total με πλήρη εξίσωση και 128 δείγματα: μέση τιμή σφάλματος: 0.002% & τυπική απόκλιση σφάλματος: 1.028%

Fz_chisel με πλήρη εξίσωση και 128 δείγματα: μέση τιμή σφάλματος: -0.017% & τυπική απόκλιση σφάλματος: 1.118%

Σχήμα 5.16. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και πλήρων μαθηματικών μοντέλων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα όλων των ψηφιακών πειραμάτων

Source of variation for Fz_total	DF	SS	MS	F	P
Regression	12	153086502	12757208	7702,37	0.000
Residual error	115	190471	1656		
Total	128	153276973			
R-sq(adj)	99.9%				

Predictor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	1250	247,3	5,05	0,000
D	-269,92	34,02	-7,93	0,000
f	-2809,5	577,8	-4,86	0,000
D^2	3,3379	0,8993	3,71	0,000
$(W/D)^2$	-71493	12102	-5,91	0,000
f^2	-4868	359,7	-13,53	0,000
V^2	-2,2873	0,6096	-3,75	0,000
D*(W/D)	1693,6	155,3	10,91	0,000
D*f	627,84	14,39	43,63	0,000
D*V	3,6606	0,6435	5,69	0,000
(W/D)*f	25714	3117	8,25	0,000
(W/D)*V	343,7	138,6	2,48	0,015
f*V	71,76	12,87	5,58	0,000

Source of variation for Fz_chisel	DF	SS	MS	F	P
Regression	12	67485646	5623804	7240,95	0.000
Residual error	115	89317	777		
Total	128	67574962			
R-sq(adj)	99.9%				

Predictor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	1272,8	169,3	7,52	0,000
D	-292,71	23,3	-12,57	0,000
f	-4472,4	395,6	-11,3	0,000
D^2	2,4629	0,6158	4	0,000
$(W/D)^2$	-79001	8287	-9,53	0,000
f^2	-2041,4	246,3	-8,29	0,000
V^2	-2,2236	0,4175	-5,33	0,000
D*(W/D)	1865,8	106,3	17,55	0,000
D*f	359,731	9,853	36,51	0,000
D*V	3,6744	0,4406	8,34	0,000
(W/D)*f	30836	2134	14,45	0,000
(W/D)*V	325,53	94,88	3,43	0,001
f*V	71,988	8,813	8,17	0,000

F-table $_{(12,\ 115,\ 0.05)}$= 1.8375

Σχήμα 5.17. Ανάλυση διασποράς των στατιστικά σημαντικών παραγόντων και αλληλεπιδράσεων

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)
10	0,125	0,2	15	1916	1921	1072	1081
			20	2011	1990	1166	1151
		0,3	15	2458	2453	1380	1385
			20	2579	2558	1501	1491
		0,4	15	2822	2888	1640	1648
			20	2966	3029	1784	1790
		0,5	15	3289	3226	1901	1870
			20	3456	3403	2067	2048
	0,13	0,2	15	1927	1966	1098	1129
			20	2023	2043	1194	1207
		0,3	15	2510	2511	1436	1448
			20	2636	2625	1562	1563
		0,4	15	2903	2959	1726	1727
			20	3055	3109	1878	1877
		0,5	15	3394	3310	2012	1964
			20	3570	3495	2189	2151
	0,145	0,2	15	2089	2079	1271	1249
			20	2200	2183	1382	1351
		0,3	15	2673	2663	1614	1614
			20	2815	2803	1755	1753
		0,4	15	3108	3150	1904	1939
			20	3275	3325	2071	2114
		0,5	15	3586	3539	2225	2223
			20	3782	3750	2421	2433
	0,15	0,2	15	2088	2110	1274	1281
			20	2200	2222	1385	1392
		0,3	15	2722	2707	1667	1662
			20	2868	2855	1813	1808
		0,4	15	3146	3206	1993	2002
			20	3321	3390	2168	2185
		0,5	15	3662	3608	2309	2301
			20	3864	3828	2511	2520
12	0,125	0,2	15	2284	2312	1297	1325
			20	2398	2418	1410	1432
		0,3	15	2978	2970	1699	1701
			20	3127	3112	1848	1843
		0,4	15	3544	3531	2030	2036
			20	3722	3708	2208	2214
		0,5	15	3963	3994	2337	2330
			20	4168	4208	2542	2544
	0,13	0,2	15	2351	2374	1368	1391
			20	2471	2488	1488	1506
		0,3	15	3057	3045	1783	1782
			20	3213	3195	1939	1933
		0,4	15	3650	3618	2143	2133
			20	3838	3805	2331	2320
		0,5	15	4076	4095	2459	2442
			20	4291	4317	2675	2665
	0,145	0,2	15	2553	2538	1584	1567
			20	2692	2679	1722	1706
		0,3	15	3271	3248	2015	2004
			20	3448	3424	2192	2180
		0,4	15	3862	3860	2376	2401
			20	4071	4072	2585	2612
		0,5	15	4337	4375	2747	2757
			20	4578	4623	2988	3004
	0,15	0,2	15	2588	2586	1624	1618
			20	2731	2735	1766	1765
		0,3	15	3349	3308	2099	2071
			20	3533	3493	2283	2254
		0,4	15	3958	3933	2480	2483
			20	4175	4154	2697	2702
		0,5	15	4417	4461	2842	2854
			20	4666	4717	3091	3109

D (mm)	W/D	f (mm/rev)	V (m/min)	DRILL3D F_{z_total} (N)	RSM F_{z_total} (N)	DRILL3D F_{z_chisel} (N)	RSM F_{z_chisel} (N)
14	0,125	0,2	15	2727	2730	1586	1588
			20	2866	2873	1725	1732
		0,3	15	3527	3514	2047	2036
			20	3706	3692	2226	2215
		0,4	15	4204	4200	2428	2443
			20	4417	4414	2641	2658
		0,5	15	4742	4789	2775	2809
			20	4985	5039	3018	3060
	0,13	0,2	15	2806	2809	1670	1673
			20	2953	2960	1817	1825
		0,3	15	3631	3605	2159	2136
			20	3821	3792	2348	2324
		0,4	15	4301	4305	2534	2559
			20	4523	4527	2756	2782
		0,5	15	4876	4906	2918	2940
			20	5132	5165	3174	3200
	0,145	0,2	15	3079	3024	1921	1905
			20	3248	3201	2089	2081
		0,3	15	3886	3859	2435	2414
			20	4099	4072	2648	2626
		0,4	15	4634	4597	2893	2883
			20	4888	4846	3147	3131
		0,5	15	5292	5237	3363	3311
			20	5587	5522	3658	3595
	0,15	0,2	15	3131	3089	2016	1974
			20	3307	3274	2193	2158
		0,3	15	3964	3937	2519	2499
			20	4185	4158	2740	2719
		0,4	15	4595	4687	2918	2983
			20	4851	4944	3174	3239
		0,5	15	5256	5340	3420	3426
			20	5556	5633	3720	3718
16	0,125	0,2	15	3192	3175	1896	1871
			20	3358	3354	2063	2051
		0,3	15	4084	4084	2405	2391
			20	4295	4299	2616	2607
		0,4	15	4872	4896	2857	2869
			20	5123	5147	3108	3122
		0,5	15	5641	5610	3323	3308
			20	5933	5897	3615	3596
	0,13	0,2	15	3296	3271	2006	1975
			20	3472	3458	2182	2163
		0,3	15	4196	4193	2525	2510
			20	4417	4416	2747	2734
		0,4	15	4997	5017	2993	3004
			20	5260	5277	3255	3265
		0,5	15	5754	5745	3448	3458
			20	6056	6040	3750	3754
	0,145	0,2	15	3543	3537	2274	2262
			20	3743	3750	2474	2475
		0,3	15	4455	4497	2810	2844
			20	4701	4747	3057	3093
		0,4	15	5366	5361	3392	3384
			20	5663	5646	3690	3669
		0,5	15	6114	6126	3843	3884
			20	6451	6448	4181	4205
	0,15	0,2	15	3520	3618	2257	2350
			20	3718	3840	2455	2571
		0,3	15	4587	4592	2951	2947
			20	4846	4850	3210	3204
		0,4	15	5523	5468	3560	3503
			20	5835	5762	3872	3796
		0,5	15	6283	6247	4024	4018
			20	6636	6576	4377	4347

Fz_total με στατιστικά σημαντικούς παράγοντες και 128 δείγματα: μέση τιμή σφάλματος: 0.015% & τυπική απόκλιση σφάλματος: 1.036%

Fz_chisel με στατιστικά σημαντικούς παράγοντες και 128 δείγματα: μέση τιμή σφάλματος: -0.017% & τυπική απόκλιση σφάλματος: 1.121%

Σχήμα 5.18. Σύγκριση αποτελεσμάτων DRILL3D και μαθηματικών μοντέλων μόνο των στατιστικά σημαντικών παραγόντων και αλληλεπιδράσεων, που προέκυψαν από τα αποτελέσματα όλων των ψηφιακών πειραμάτων

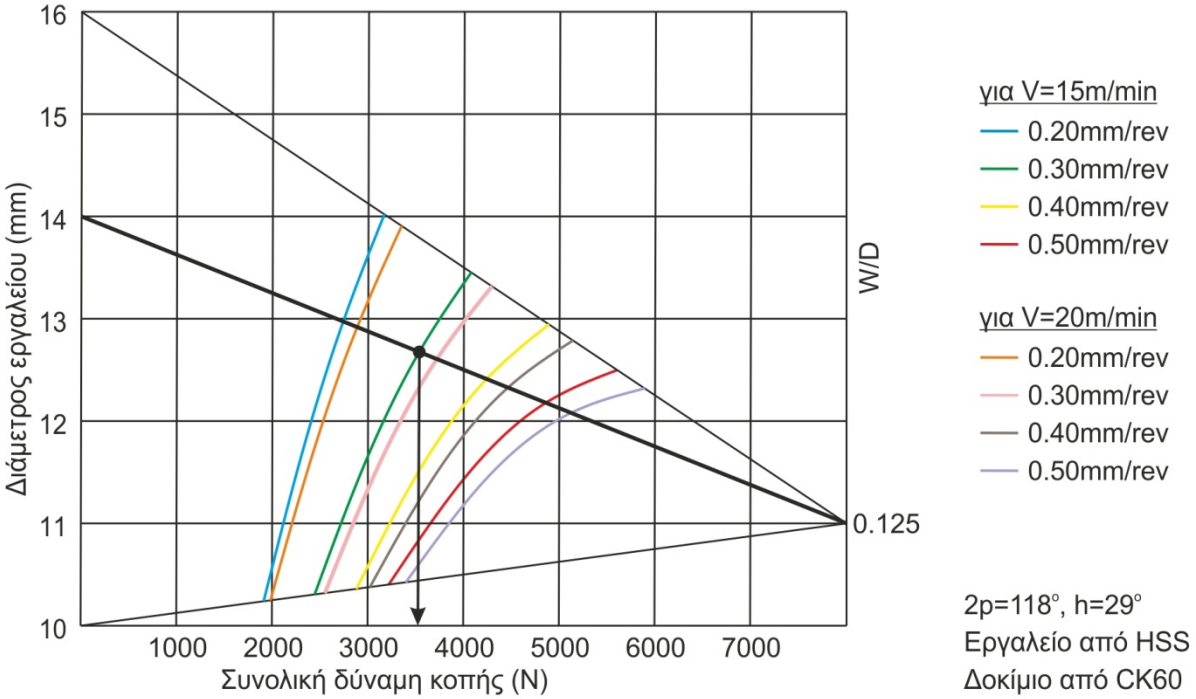
5.5. Δημιουργία νομογραφημάτων

Με την χρήση των παραπάνω μαθηματικών μοντέλων, δημιουργήθηκαν τα νομογραφήματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.19 έως 5.22. Ο χρήστης των νομογραφημάτων αυτών μπορεί να υπολογίσει γραφικά με μεγάλη ευκολία την συνολική δύναμη κοπής για εργαλεία διάτρησης, με διαφορετική διάμετρο (10 έως 16mm) και λόγο του μεγέθους του πυρήνα προς τη διάμετρο (0.125 έως 0.150), για μια σειρά συνθηκών κοπής (πρόωση από 0.20 έως 0.50mm/rev και ταχύτητα από 15 έως 20 m/min), όταν το υλικό του εργαλείου είναι HSS και του δοκιμίου CK60.

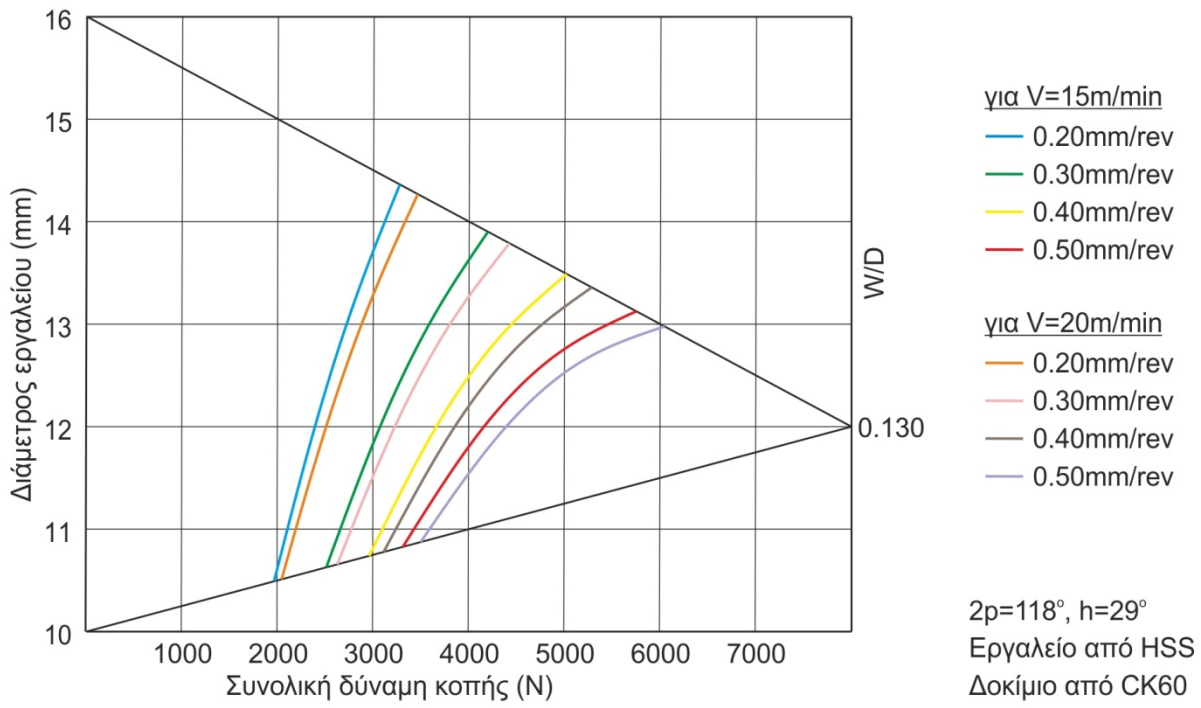
Για να βρεθεί η συνολική δύναμη κοπής πρέπει να ακολουθηθούν τα επόμενα βήματα:

- επιλέγεται το κατάλληλο διάγραμμα ανάλογα με το μέγεθος του λόγου του πυρήνα προς τη διάμετρο του εργαλείου,
- φέρεται ευθεία που να ενώνει την διάμετρο με τον λόγο του πυρήνα προς τη διάμετρο του εργαλείου,
- στο σημείο που αυτή η ευθεία τέμνει τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις διάφορες συνθήκες κοπής, φέρεται κάθετη στον οριζόντιο άξονα του νομογραφήματος. Το σημείο τομής με τον οριζόντιο άξονα δίνει το μέγεθος της συνολικής δύναμης κοπής.

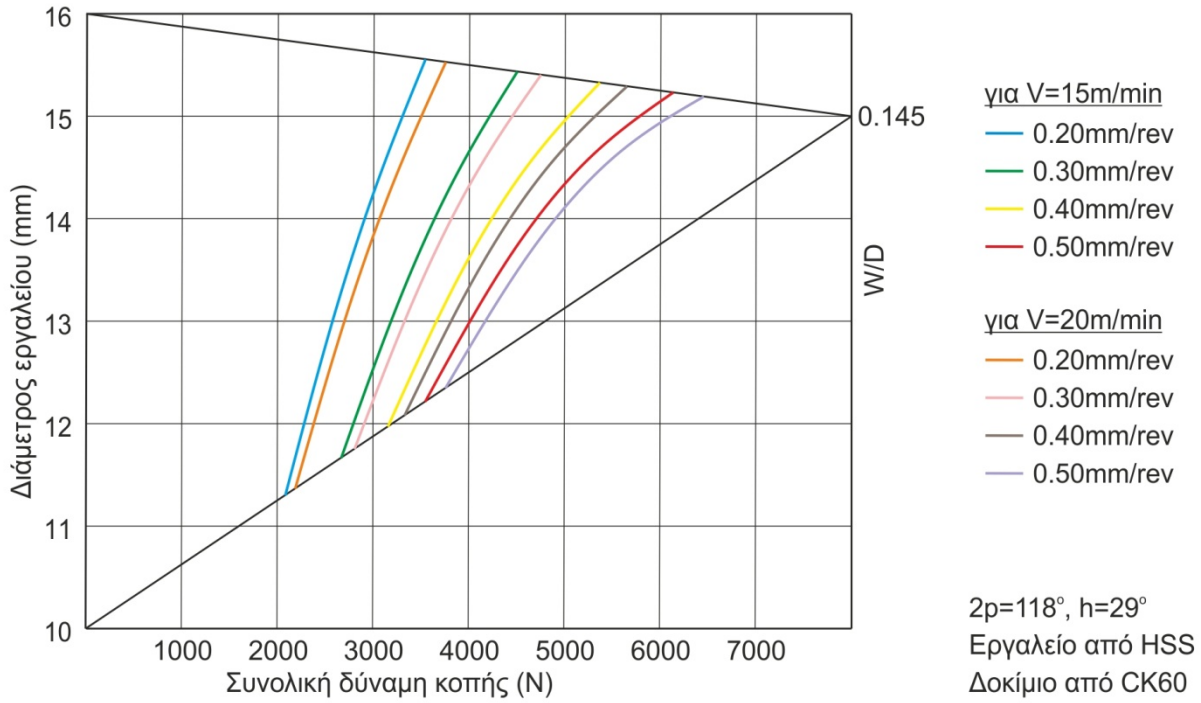
Έστω ότι απαιτείται η εύρεση της συνολικής δύναμης κοπής για ένα εργαλείο διαμέτρου 14mm, με λόγο μεγέθους του πυρήνα προς τη διάμετρο ίσο με 0.125, ταχύτητα κοπής 15m/min και πρόωση 0.30mm/min (εργαλείο από HSS και δοκίμιο CK60). Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το σχήμα 5.19 που αφορά την περίπτωση όπου αντιστοιχεί στο δεδομένο λόγο μεγέθους του πυρήνα προς τη διάμετρο του εργαλείου. Στη συνέχεια φέρεται η ευθεία που ενώνει τη διάμετρο των 14mm με την τιμή 0.125. Χρησιμοποιώντας την τομή αυτής της ευθείας με την πράσινη καμπύλη του σχήματος, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα κοπής V=15m/min και πρόωση f=0.30mm/rev, μπορεί κανείς να διαβάσει ότι η ζητούμενη συνολική δύναμη κοπής κατά τη διάτρηση είναι περίπου 3500N. Η τιμή αυτή επιβεβαιώνεται και από τους προηγούμενους αναλυτικούς υπολογισμούς.



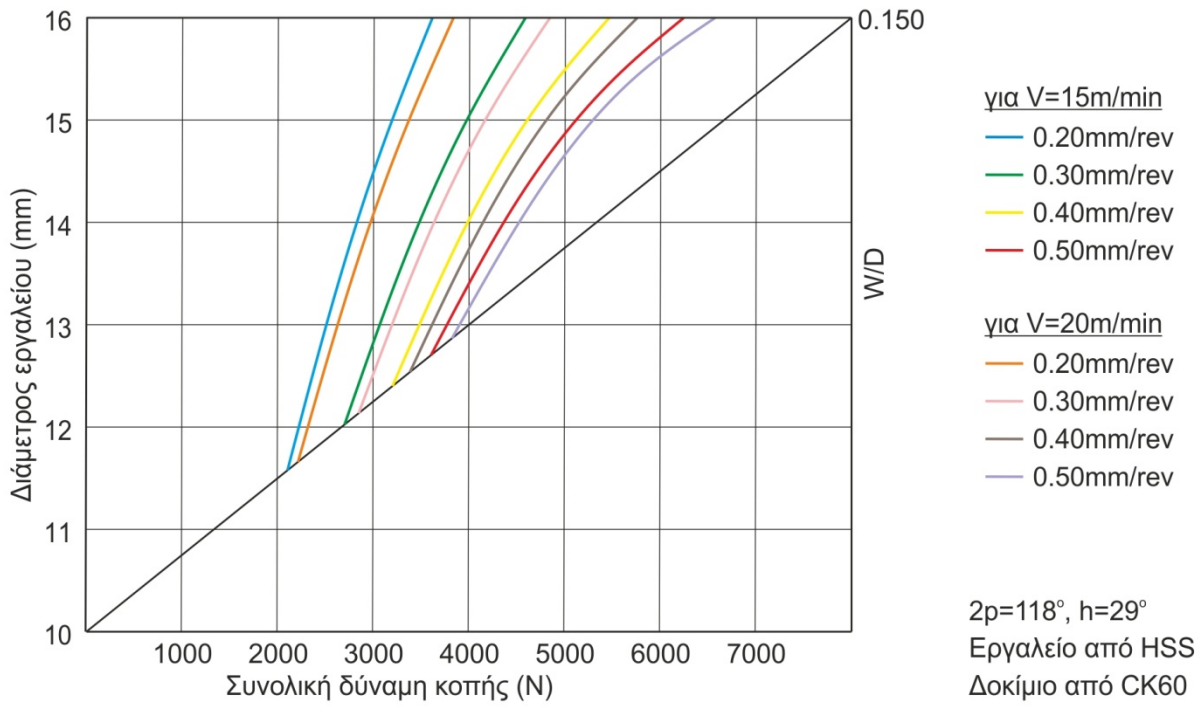
Σχήμα 5.19. Υπολογισμός συνολικής δύναμης κοπής για W/D=0.125



Σχήμα 5.20. Υπολογισμός συνολικής δύναμης κοπής για W/D=0.130



Σχήμα 5.21. Υπολογισμός συνολικής δύναμης κοπής για W/D=0.145



Σχήμα 5.22. Υπολογισμός συνολικής δύναμης κοπής για W/D=0.150

6. Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η μηχανουργική κατεργασία της διάτρησης με προσομοιώσεις που βασίζονται σε 3D στερεά CAD μοντέλα όλων των εμπλεκόμενων γεωμετριών. Τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής, σε αντιστοιχία με τους στόχους που τέθηκαν στο κεφάλαιο 2 (Στάθμη των Γνώσεων), σχετίζονται με τα μοντέλα προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν, και περιλαμβάνουν:

1. Την υλοποίηση της εφαρμογής DRILL3D για την προσομοίωση της διάτρησης. Η εφαρμογή DRILL3D χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες στερεάς μοντελοποίησης του Autodesk Inventor™, συνδύασε με ολοκληρωμένο τρόπο όλες τις απαραίτητες ενέργειες για την εκτέλεση των προσομοιώσεων διάτρησης.
   - ✓ Η δημιουργία ενός 3D στερεού μοντέλου του εργαλείου διάτρησης επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των απαιτούμενων παραμέτρων (γεωμετρικών και κατασκευαστικών), ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση του. Αυτή βασίζεται στην χρήση των αρχών κατασκευής και τροχίσματος ενός πραγματικού εργαλείου, όπως αυτές λαμβάνουν χώρα από τον κατασκευαστή. Το εργαλείο που προσομοιώνεται είναι ένα εργαλείο διάτρησης γενικής χρήσης (ελικοειδές, με κωνική κορυφή και ευθείες κύριες κόψεις) και είναι δυνατή η μοντελοποίηση πολλών διαφορετικών από αυτά, με πολύ μεγάλη ακρίβεια εξαιτίας της χρήσης του συστήματος CAD/CAM. Σε αντίθεση με τις μαθηματικές περιγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, όλες οι γεωμετρικές ιδιότητες των κόψεων, είναι ενσωματωμένες στο στερεό μοντέλο και δεν απαιτούνται επιπλέον υπολογισμοί για να προσδιοριστούν, αλλά μόνο αυτόματη αναγνώριση των μεγεθών τους από το ίδιο το σύστημα.
   - ✓ Μέσω αυτόματης αναγνώρισης χαρακτηριστικών του εργαλείου είναι δυνατή η δημιουργία 3D στερεών μοντέλων των απαραίτητων τεμαχίων, ξεχωριστά για την δράση των κυρίων κόψεων και της εγκάρσιας κόψης:
     - o Με τη χρήση της γωνίας κορυφής και το μέγεθος του πυρήνα του εργαλείου είναι εφικτή η δημιουργία αυτόματα προδιαμορφωμένων τεμαχίων για την μελέτη των κυρίων κόψεων. Έτσι είναι δυνατή η επίτευξη της μόνιμης κατάστασης όσο το δυνατόν γρηγορότερα (αμέσως μετά την συμπλήρωση 180° περιστροφής του εργαλείου) και να αποφευχθούν χρονοβόρες διαδικασίες υπολογισμού περισσότερων χρονικών στιγμών.
     - o Με παρόμοιο τρόπο και τη χρήση του μεγέθους του πυρήνα δημιουργείται αυτόματα και το τεμάχιο που χρησιμοποιείται για την μελέτη της κοπής της εγκάρσιας κόψης.
   - ✓ Το σύστημα CAD/CAM αναλαμβάνει, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, να κάνει όλους εκείνους τους απαραίτητους υπολογισμούς για τις διαστάσεις του εργαλείου, των κατεργαζόμενων τεμαχίων και των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Έτσι τοποθετεί με συνέπεια στο 3D χώρο τα μοντέλα του εργαλείου και των κατεργασμένων τεμαχίων, σε κάθε χρονική στιγμή, ώστε να υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια τόσο η γεωμετρία των επόμενων τεμαχίων, όσο και των απαραμόρφωτων αποβλίττων. Τα δεδομένα που αφορούν την κινηματική και την αρχική τοποθέτηση των μοντέλων χρησιμοποιούνται απ' ευθείας από την φόρμα εισαγωγής δεδομένων του DRILL3D. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να εκτελεστεί η εφαρμογή εξολοκλήρου με μία εντολή ή ο χρήστης να εκτελέσει κάθε φάση της προσομοίωσης ξεχωριστά, παρακολουθώντας τα ενδιάμεσα και επιμέρους αποτελέσματα. Επίσης, υπάρχει η επιλογή να επιλέγεται ο φάκελος στον οποίο είναι αποθηκευμένα παλαιότερα αρχεία προσομοιώσεων και να είναι

διαθέσιμα τα στοιχεία εισόδου και τα αναλυτικά αποτελέσματα σε μια επιπλέον φόρμα αποτελεσμάτων.

- ✓ Οι γεωμετρίες των απαραμόρφωτων αποβλίττων διακριτοποιούνται σε μικρά κομμάτια, ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών. Στην περίπτωση των κύριων κόψεων, τα απόβλιττα που υπολογίζονται διακριτοποιούνται σε 20 μέρη, ενώ στην περίπτωση των αποβλίττων της εγκάρσιας κόψης σε 16 μέρη. Σε όλους τους υπολογισμούς, αποδείχθηκε ότι η εγκάρσια κόψη, παρά το σημαντικά μικρότερο μήκος της, είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος της δύναμης κοπής που υπολογίζεται.
- ✓ Ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων είναι της τάξεων των ωρών, αντί των ημερών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση πόρων και αναδεικνύεται ένα ακόμα πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.
- ✓ Η ακρίβεια των υπολογισμών του DRILL3D επιβεβαιώθηκε με την εκτέλεση ικανού αριθμού πειραμάτων. Έτσι παρέχεται πλέον η δυνατότητα εκτέλεσης ψηφιακών πλέον πειραμάτων, η ακρίβεια των οποίων είναι αποδεδειγμένα μεγάλη, αντικαθιστώντας σε πολύ μεγάλο βαθμό τα εργαστηριακά πειράματα. Ταυτόχρονα, η εκτέλεση των ψηφιακών πειραμάτων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία εμπειρικών εξισώσεων υπολογισμού δυνάμεων κοπής, με σημαντικά μειωμένο κόστος, σε σχέση με αυτές που προτείνονται μετά από την εκτέλεση εργαστηριακών πειραμάτων.

2. Με την διαδοχική χρήση του DRILL3D δόθηκε η δυνατότητα να καταγραφούν οι σχέσεις που έχουν οι τιμές των παραμέτρων του εργαλείου, με το μέγεθος των απαραμόρφωτων αποβλίττων και επομένως με τις αντίστοιχες δυνάμεις κοπής:
   - ✓ Το μήκος όλων των αποβλίττων δεν επηρεάζεται από την αλλαγή στην χρησιμοποιούμενη πρόωση, αφού τα εργαλεία παραμένουν με σταθερό μήκος κόψης. Επίσης, όλες οι τιμές του πάχους ακολουθούν την αύξηση της πρόωσης.
   - ✓ Το μέσο πάχος του αποβλίττου των κύριων κόψεων εξαρτάται από την αλληλεπίδραση δύο βασικών χαρακτηριστικών: τις συνεχώς μεταβαλλόμενες γωνίες αποβλίττου και ελευθερίας κατά μήκος της κύριας κόψης (εξαρτώνται από τη διάμετρο το εργαλείου) και την τιμή της πρόωσης που χρησιμοποιήθηκε.
   - ✓ Καθώς οι τιμές της διαμέτρου του εργαλείου αυξάνουν, το μήκος του αποβλίττου των κύριων κόψεων μεγαλώνει κι αυτό.
   - ✓ Στην περίπτωση της εγκάρσιας κόψης, το μέγιστο πάχος του αποβλίττου επηρεάζεται κυρίως από τον λόγο W/D που ισχύει για κάθε εργαλείο.
   - ✓ Όταν ο πυρήνας μεγαλώνει η κοπτική δράση των κύριων κόψεων παραμένει σχεδόν σταθερή, αφού δεν υπάρχει σημαντική επίδραση αυτής της παραμέτρου στη γεωμετρία τους. Αντίθετα στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης, το μέγεθος του αποβλίττου αυξάνεται σημαντικά.
   - ✓ Το μέγεθος των αποβλίττων των κύριων κόψεων δεν επηρεάζονται από την αλλαγή της ημιγωνίας κορυφής, αφού δεν επηρεάζεται σημαντικά η γεωμετρία των κόψεων. Από την άλλη, εμφανίζεται μια μεγάλη αλλαγή στο απόβλιττο της εγκάρσιας κόψης, καθώς το εργαλείο γίνεται λιγότερο μυτερό.
   - ✓ Η αύξηση της γωνίας ελίκωσης δεν δημιουργεί γεωμετρική αλλαγή στην περιοχή της εγκάρσιας κόψης, ενώ εμφανίζεται περιορισμένη αύξηση του πάχους στα απόβλιττα των κύριων κόψεων. Αυτό συμβαίνει καθώς η γωνία αποβλίττου των κύριων κόψεων εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της γωνίας ελίκωσης.

3. Επίσης, δόθηκε η δυνατότητα εκτέλεσης κατάλληλα επιλεγμένων ψηφιακών πειραμάτων, μέσα από την συνδυασμένη χρήση του DRILL3D και της μεθοδολογίας σχεδιασμού πειραμάτων, με αποτέλεσμα να:
   - ✓ υπολογιστούν μαθηματικές σχέσεις για την δύναμη κοπής εξαιτίας της εγκάρσιας κόψης, αλλά και της συνολικής δύναμης κοπής. Αυτό σε πρώτη φάση έγινε χρησιμοποιώντας τον πίνακα L_{16} της μεθοδολογίας Taguchi και εκτελώντας μόνο 16 πειράματα. Στη συνέχεια η εκτέλεση όλων των πειραμάτων του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού (128 πειράματα για κάθε μελετώμενη δύναμη), απέδειξε ότι η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε ήταν πολύ ακριβής (αποκλίσεις ±5% για την συνολική μέγιστη δύναμη κοπής και ±6.5% για τη δύναμη κοπής εξαιτίας της εγκάρσιας κόψης).
   - ✓ χρησιμοποιηθεί η ίδια μεθοδολογία, αλλά με όλα τα διαθέσιμα πειράματα (128+128), ώστε οι μαθηματικές σχέσεις που υπολογίστηκαν για τις δύο δυνάμεις να έχουν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια (μέση τιμή σφάλματος 0,002% και -0,017% αντίστοιχα & τυπική απόκλιση σφάλματος 1,025% και 1,118% αντίστοιχα).
   - ✓ χρησιμοποιηθεί η ανάλυση διασποράς με τα δεδομένα του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού, με σκοπό να αποδειχθεί ότι μια σειρά παραγόντων που συμμετείχαν στην ανάλυση και των ανά δύο αλληλεπιδράσεών τους είναι στατιστικά σημαντικοί. Αυτοί οι παράγοντες αποδείχθηκαν ότι είναι οι D, f, D^2, $(W/D)^2$, f^2, V^2, D*(W/D), D*f, D*V, (W/D)*f, (W/D)*V και f*V, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στην δημιουργία μαθηματικών σχέσεων μεγαλύτερης ακρίβειας σε περιπτώσεις με λιγότερα διαθέσιμα πειράματα.
   - ✓ σχεδιαστούν κατάλληλα νομογραφήματα, ώστε να είναι εύκολος και γρήγορος ο υπολογισμός της συνολικής δύναμης κοπής μιας σειράς εργαλείων διάτρησης, με αντίστοιχα χαρακτηριστικά αυτών που χρησιμοποιήθηκαν και σε μια σειρά από συνθήκες κοπής που αναφέρονται.

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

- επιτευχθεί με παρόμοιο τρόπο ο υπολογισμός και η πειραματική επιβεβαίωση της απαιτούμενης ροπής κατά τη διάτρηση. Αυτή η πρόταση απαιτεί προφανώς την ύπαρξη δυναμομέτρου, που να έχει τη δυνατότητα μέτρησης της ροπής στην άτρακτο της εργαλειομηχανής,
- δοκιμαστεί η μοντελοποίηση και άλλων ειδών τρυπανιών, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής και σε άλλες εφαρμογές,
- εκτελεστεί μεγαλύτερος αριθμός προσομοιώσεων για περισσότερες συνθήκες κοπής και επιπλέον συνδυασμούς υλικών εργαλείου-δοκιμίων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία μιας τεχνικής βάσεως δεδομένων προσβάσιμη από κάθε ενδιαφερόμενο.
- συνδυαστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία και με άλλες τεχνικές στατιστικές ή τεχνητής νοημοσύνης.
- επεκταθεί η προτεινόμενη μεθοδολογίας και σε άλλες μηχανουργικές κατεργασίες και να δημιουργηθεί μια κοινή πλατφόρμα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για πολλές διαφορετικές μηχανουργικές κατεργασίες.

7. Βιβλιογραφία

1. Kyratsis P., Bilalis N., Dimitriou V. and Antoniadis, A., “CAD based drilling using conventional twist drills”, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 1, pp. 202-209, 2008. (επαναδημοσίευση στο 2nd International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering - COSME 08, Brasov, Romania)
2. Kyratsis P., Bilalis N. and Antoniadis A., 'CAD based predictive models of the undeformed chip geometry in drilling', *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 129-135, 2009. (επαναδημοσίευση στο 6th International Conference in Manufacturing Systems Engineering - ICMSE 09, Rome, Italy)
3. Kyratsis P., Tapoglou N., N. Bilalis and A. Antoniadis, “Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface”, Int. J. Machining and Machinability of Materials (in press).
4. Kyratsis P. and Antoniadis A., “Analysis of parametric influence on drilling using cad based simulation and design of experiments”, 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics (ICAMEM2010), Hammamet, Tunisia, 2010.
5. Shaw M. “Metal cutting principles”, Oxford Series on Advance Manufacturing, New York, 2005.
6. Sandvik Coromant, “Modern metal cutting”, ISBN: 91-972299-3-0, 1996.
7. Chapman, W. “Handbook for the metalworking industry”, Hansen Gardner Publications, 1-56990-345-X, Cincinati, Ohio, 2002.
8. Oberg E., Jones F.D., Horton H.L. and Ryffel H.H. “Machinery’s handbook”, 28th Edition, Industrial Press, 2008.
9. ASM International, “ASM Handbook – Machining”, Volume 16, ASM International, 1997.
10. Armarego E.J.A “Some fundamentals and practical aspects of twist drills and drilling”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 44, pp. 189-198, 1994.
11. Armarego E.J.A. and Wright J.D. “Manufactured general purpose twist drill point geometry – I. Preliminary appraisal of variation”, J. Engg. Prod., Vol. 2, pp. 1-19, 1978.
12. Armarego E.J.A. and Wright J.D. “Manufactured general purpose twist drill point geometry – II. Sources of variation and process capability estimates”, J. Engg. Prod., Vol. 2, pp. 59-76, 1978.
13. Watson A.R. “Geometry of drill elements”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, pp. 209-227, 1985.
14. Galloway D., “Some experiments on the influence of various factors on drill performance”, *Trans. A.S.M.E.*, Vol. 79, pp. 191-231, 1957.
15. Fujii S., DeVries M.F. and Wu S.M., “An analysis of drill geometry for optimum drill design by computer. Part I-Drill geometry analysis”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 92, No. 3, pp. 647-656, 1970.
16. Fujii S., DeVries M.F. and Wu S.M. “An analysis of drill geometry for optimum drill design by computer. Part II-Computer aided design”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 92, No. 4, pp. 657-666, 1970.
17. Fujii S., DeVries M.F. and Wu, S.M. “Analysis of the chisel edge and the effect of the d-theta relationship on drill point geometry”, *Journal of Engineering for Industry*, Paper No 70, pp. 1093-1105, 1971.

18. Fujii S., DeVries M.F. and Wu, S.M. “Analysis and design of a drill grinder and evaluation of grinding parameters”, *Journal of Engineering for Industry*, Paper No 71, pp. 1093-1105, 1972.
19. Tsai W. and Wu S.M. “A mathematical drill point design and grinding”, Journal of Engineering for Industry, Vol. 101, pp.333–340, 1979.
20. Tsai W. and Wu S.M. “Computer analysis of drill point geometry”, Int. J. Mach. Tool Des. Res, Vol 19, pp. 95-108, 1979.
21. Tsai W. and Wu S.M. “Measurement and control of the drill point grinding process”, Int. J. Mach. Tool Des. Res, Vol 19, pp. 109-120, 1979.
22. Armarego E.J.A. and Rotenberg A. “An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method – I. Basic analysis”, Int. J. Mach. Tool des. Res., Vol. 13, pp. 155-164, 1973.
23. Armarego E.J.A. and Rotenberg A. “An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method – II. A criterion for selecting a solution”, Int. J. Mach. Tool des. Res., Vol. 13, pp. 165-182, 1973.
24. Armarego E.J.A. and Rotenberg A. “An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method – III. Drill point grinder design features”, Int. J. Mach. Tool des. Res., Vol. 13, pp. 233-241, 1973.
25. Fugelso M.A. “A standard conical point drill grinding machine”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 915-922, 2001.
26. Vangsness J.D., Fugelso M.A. and Lindeke R.R. “Closed form solution of kinematic equations for the mechanism of a twist drill grinding machine”, Mech. Mach. Theory, Vol. 30, pp. 193-199, 1995.
27. Hsieh J.F. and Lin P.D. “Mathematical model of multiflute drill point” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 1181-1193, 2002.
28. Hsieh J.F. and Lin P.D. “Production of multifluted drills on six-axis CNC tool-grinding machine” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1117-1127, 2003.
29. Hsieh J.F. “Mathematical model for helical drill point” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, pp. 967-977, 2005.
30. Hsieh J.F. and Lin P.D. “Drill point geometry of multi-fluted drills” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 26, pp. 466-476, 2005.
31. Li B., Hu X. and Wang H. “Analysis and simulation for a parallel drill point grinder Part 1: kinematics, workspace and singularity analysis”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, pp. 915-925, 2006.
32. Li B., Hu X. and Wang H. “Analysis and simulation for a parallel drill point grinder Part 2: grinding kinematics modeling and simulation”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 30, pp. 221-226, 2006.
33. Zhang W., He F. and Xiong D. “Parameterized geometric design for complex helical drill point”, Journal of Manufacturing science and Engineering, Vol. 127, pp. 319-327, 2005.
34. Ren K. and Ni J. “Analyses of drill flute and cutting angles”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 546-553, 1999.
35. Chen W.C., Fuh K.H., Wu C.F. and Chang B.R. “Design optimization of a split-point drill by force analysis”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 58, pp. 314-322, 1996.
36. Wang J. and Zhang Q. “A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp. 1276-1285, 2008.

37. Wang J. and Zhang Q. “A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part II: Predictive force models”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp. 1286-1295, 2008.
38. Mellinger J.C., Ozdoganlar O.B., DeVor R.E. and Kapoor S.G. “Modelling chip evacuation forces in drilling for various flute geometries”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, pp. 405-415, 2003.
39. Ehmann K.F. and DeVries M.F. “Grinding wheel profile definition for the manufacture of drill flutes”, Manufacturing Technology, Vol. 39, pp. 153-156, 1990.
40. Zhang W., Wang X. He F. and Xiong D. “A practical method of modeling and simulation for drill fluting”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 667-672, 2006.
41. Thornley R.H., El Wahab A.B.I. and Maiden J.D. “Some aspects of twist drill design”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 27, pp. 383-397, 1987.
42. Kang D. and Armarego E.J.A. “Computer-Aided geometrical analysis of the fluting operation for the twist drill design and production. I. Forward analysis and generated flute profile”, Machining Science and Technology, Vol. 7, pp. 221-248, 2003.
43. Kang D. and Armarego E.J.A. “Computer-Aided geometrical analysis of the fluting operation for the twist drill design and production. II. Backward analysis, wheel profile and simulation studies”, Machining Science and Technology, Vol. 7, pp. 249-266, 2003.
44. Armarego E.J.A. and Kang D. “Computer-Aided modeling of the fluting process for twist drill design and manufacture”, Annals of the CIRP, Vol. 47, pp. 259-264, 1998.
45. Wenjiang X, Zhixiong Z., Zhaozhan C.A.O. and Lan Y. “Design and CAD system of the tool for drill flute”, Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 20, pp. 9-12, 2007.
46. Xiong L, Fang N. and Shi H “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, Vol. 49, pp. 667-677, 2009.
47. Audy J. “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, Vol. 204, pp. 130-138, 2008.
48. Audy J. “A study of computer-assisted analysis of effects of drill point geometrical features on forces and power in drilling with general purpose twist drills”, Modern Machinery Science Journal, pp. 4-7, April 2008.
49. Puig A., Perez-Vidal L. and Tost D. “3D simulation of tool machining”, Computers and Graphics, Vol. 27, pp. 99-106, 2003.
50. Tost D., Puig A. and Perez-Vidal L. “Boolean operations for 3D simulation of CNC machining of drilling tools”, Computer and Graphics, Vol. 36, pp. 315-323, 2004.
51. Wang G.C., Fuh K.H. and Yan B.H. “A new mathematical model for multifacet drills derived by using angle-solid model”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 103-132, 2001.
52. Rincon D.M., Ulsoy A.G. and Kaftanoglu B. “Effects of vibrations on cutting forces and torque”, Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 59-62, 1994.
53. Lee S.J., Eman K.F. and Wu S.M. “An analysis of the drill wandering motion”, Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 297-305, 1987.
54. Yang J.A., Jaganathan V. and Du R. “A new dynamic model for drilling and reaming processes”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 299-311, 2002.
55. Arvajeh T. and Ismail F. “Machining stability in high speed drilling – Part 1: Modeling vibration stability in bending”, International Journal of machine tool and Manufacture, Vol. 46, pp. 1563-1572, 2006.

56. Arvajeh T. and Ismail F. “Machining stability in high speed drilling – Part 2: Time domain simulation of a bending-torsional model and experimental validations”, International Journal of machine tool and Manufacture, Vol. 46, pp. 1573-1581, 2006.
57. Roukema J.C. and Altintas Y. “Generalised modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 1455-1473, 2007.
58. Roukema J.C. and Altintas Y. “Generalised modeling of drilling vibrations. Part II: Chatter stability in frequency domain” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 1474-1485, 2007.
59. Roukema J.C. and Altintas Y. “Time domain simulation of torsional-axial vibration in drilling”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 2073-2085, 2006.
60. Gong Y, Lin C and Ehmann K.F. “Dynamics of initial penetration in drilling: Part 1 – Mechanistic model for dynamic forces”, Transactions of the ASME, Vol. 127, pp. 280-288, 2005.
61. Gong Y, Lin C and Ehmann K.F. “Dynamics of initial penetration in drilling: Part 2 – Motion models for drill skidding and wandering with experimental verification”, Transactions of the ASME, Vol. 127, pp. 289-297, 2005.
62. Gupta K., Ozdoganlar O.B., Kapoor and DeVor R.E. “Modeling and prediction of hole profile in drilling, Part 1: Modeling drill dynamics in the presence of drill alignment errors”, Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 6-13, 2003.
63. Gupta K., Ozdoganlar O.B., Kapoor and DeVor R.E. “Modeling and prediction of hole profile in drilling, Part 2: Modeling hole profile”, Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 14-20, 2003.
64. Zhang W., Peng Y He F. and Xiong D. “Drill flank measurement and flank/flute intersection determination”, International Journal of Machine Tools and manufacture, Vol. 48, pp. 666-676, 2008.
65. Peng Y., Kumehara H. and Zhang W. “Measurement of drill point geometry by using laser sensor”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 682-688, 2007.
66. Ramamoorthy B. and Radhakrishman V. “Computer aided inspection of cutting tool geometry”, Precision Engineering, Vol. 14, pp. 28-34, 1992.
67. Huang C.K., Liao C.W., Huang A.P. and Tamg Y.S. “An automatic optical inspection of drill point defects for micro-drilling”, Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 37, pp. 1133-1145, 2008.
68. Watson A.R. “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. I - Initial cutting lip model”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, pp. 347-365, 1985.
69. Watson A.R. “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. II - Revised cutting lip model”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, pp. 367-376, 1985.
70. Watson A.R. “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. III - Drilling model for chisel edge”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, pp. 377-392, 1985.
71. Watson A.R. “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. IV - Drilling tests to determine chisel edge contributions to torque and thrust”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, pp. 347-365, 1985.

72. Armarego E.J.A. and Cheng C.Y. “Drilling with flat rake face and conventional twist drills - I. Theoretical investigation”, Int. J. Mach. Tools Des. Res., Vol 12, pp. 17-35, 1972.
73. Armarego E.J.A. and Cheng C.Y. “Drilling with flat rake face and conventional twist drills - II. Experimental investigation”, Int. J. Mach. Tools Des. Res., Vol 12, pp. 37-54, 1972.
74. Agapiou J.S. “Design characteristics of new types of drill and evaluation of their performance drilling cast iron – I. Drill with four major cutting edges”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, pp. 321-341, 1993.
75. Agapiou J.S. “Design characteristics of new types of drill and evaluation of their performance drilling cast iron – II. Drill with three major cutting edges”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, pp. 343-365, 1993.
76. Paul A., Kapoor S.G. and DeVor R.E. “Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design”, International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 45, pp. 421-431, 2005.
77. Hamade R.F., Seif C.Y. and Ismail F. “Extracting cutting force coefficients from drilling experiments”, International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 387-396, 2006.
78. Armarego E.J.A. and Zhao H. “Predictive force models for point thinned and circular centre edge twist drill designs”, Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 65-70, 1996.
79. Armarego E.J.A., Pramanik D. Smith A.J.R. and Whifield R.C. “Forces and power in drilling – Computer Aided Predictions”, J. Engg. Prod., Vol. 6, pp. 149-174, 1983.
80. Sahu K.S., Ozdoganlar O.B. DeVor R.E. and Kapoor S.G. “Effect of groove-type chip breakers on twist drill performance”, International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 43, pp. 617-627, 2003.
81. Degenhardt J.A., DeVor R.E. and Kapoor S.G. “Generalised groove-type chip breaker effects on drilling for different drill diameters and flute shapes”, International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 45, pp. 1588-1897, 2005.
82. Rubenstein C., Lau W.S. and Wang M. “The torque and thrust arising from contact at the chisel edge and margins in spade drilling of ductile materials”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 29, pp.441-452, 1989.
83. Rubenstein C., Lau W.S., Pei Z.J. and Wang M. “The torque and thrust arising from contact at the lips in spade drilling of ductile materials”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 29, pp.453-467, 1989.
84. Rubenstein C. “The torque and thrust in twist drilling – I. Theory”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 31, pp.481-489, 1991.
85. Rubenstein C. “The torque and thrust in twist drilling – II. Comparison of experimental observations with deductions from theory”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 31, pp.491-504, 1991.
86. Claudin C., Poulachon G. and Lambertin M. “Correlation between drill geometry and mechanical forces in MQL conditions”. Machining Science and Technology, Vol. 12, pp. 133-144, 2008.
87. Koehler W “Analysis of the high performance drilling process: influence of shape and profile of the cutting edge of twist”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, pp. 1-7.2008.
88. DeVries M.F. and Crosheck M.K. ‘An investigation of the cutting mechanism of the new point drill”, Annals of the Chirp Vol. 37, pp. 73-78, 1998.
89. Li R., Hedge P. and Shih A.J. “High-throughput drilling of titanium alloys”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 63-74, 2007.

90. Bakkal M., Shih A.J., McSpadden S.B. and Scattergood R.O. “Thrust force, torque and tool wear in drilling the bulk metallic glass”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, pp. 863-872, 2005.
91. Bakkal M., Naksiler V. and Derin B. “Machinability of bulk metallic glass materials on milling and drilling”, Advanced Materials Research, Vols. 83-86, pp. 335-341, 2010.
92. Miller S.F., Blau P.J. and Shih A.J. “Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum and titanium”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 14, pp. 647-653. 2005.
93. Abrao A.M., Rubio J.C.C., Faria P.E. and Davim J.P. “The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite” Materials and Design, Vol. 29, pp. 508-513, 2008.
94. Chen W.C. “Some experimental investigation in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, pp.1097-1108, 1997.
95. Davim J.P. and Reis P. “Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave experimental and statistical stydy”, Materials and Design, Vol. 24, pp. 315-324, 2003.
96. Davim J.P., Reis P. and Antonio C.C. “Experimental study of drilling glass fibre reinforced plastics, manufactured by hand lay-up” Composites Science and Technology, Vol. 64, pp. 289-297, 2004.
97. Davim J.P. and Reis P. “Study of delamination in drilling carbon fibre reinforced plastics using design of experiments”, Composite Structures, Vol. 59, pp. 481-487, 2003.
98. Mohan N.S., Ramachandra A. and Kulkarni S.M. “Machining of fiber-reinforced thermoplastics: influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling” Journal of Reinforced Plastic Composites, Vol. 24, pp. 1247-1257, 2005.
99. Basavarajappa S., Chandramohan G., Davim J.P., Prabu M., Mukund K., Ashwin M. and Prasannakumar M. “Drilling of hybrid aluminium matrix composites”, International Journal of Advanced manufacturing Technology, Vol. 35, pp 1244-1250, 2008.
100. Zou P., Yang X.L. and Li X.Y. “Effect of helical drill points on delamination in drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)” Advanced Materials Research, Vols. 76-78, pp. 618-623, 2009.
101. Sedlacek J. and Slany M. “Analysis of delamination in drilling of composite materials”, Modern Machinery Science Journal, pp. 194-197, June 2010.
102. Ko S.L. and Lee J.K. “Analysis on burr formation in drilling with new concept drill”, Journal of Material Processing technology, Vol. 113, pp. 392-398, 2001.
103. Pirtini M. and Lazoglu I. “Forces and hole quality in dilling”, international Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, pp. 1271-1281, 2005.
104. Jahromi A.S., Rahman K.H.U., Bassi R. and Bahr B. “Investigation of the effect of different parameters in the drilled hole quality in composite materials”, Proceedings of the 3rd annual GRASP Symposium, pp. 219-220, 2007.
105. Ko S.L., Chang J.E. and Kalpakjian S. “Development of drill geometry for burr minimization in drilling”,CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 52, pp. 45-48, 2003.
106. Jantunen E. “A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling”, International Journal of Machine Tools and manufacture, Vol. 42, pp. 997-1010, 2002.
107. Hong S. “Knowledge-based diagnosis of drill conditions”, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 4, pp. 233-241, 1993.
108. Lin T.R. “Cutting behavior using variable feed and variable speed when drilling stainless steel with TiN-coated carbide drills”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 19, pp. 629-636, 2002.

109. Oh Y.T., Kim G.D. and Chu C.N. “Design of a drilling torque controller for a machining center”, international Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 22, pp. 329-335, 2003.
110. Ertunc H.M. and Oysu C. “Drill wear monitoring using cutting force signals”, Mechatronics, Vol. 14, pp. 533-548, 2004.
111. Byrne G. and O’Donnell G.E. “An integrated force sensor solution for process monitoring of drilling operations”, Annals of the CIRP, Vol. 56, pp. 89-92, 2007.
112. Franco-Gasca L.A., Herrera-Ruiz G., Peniche-Vera R. Romero-Tronsco R.J. and Leal-Tafolla W. “Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 381-386, 2006.
113. Jun M.B., Ozdoganlar O.B., DeVor R.E., Kapoor S.G. Kirchheim A. and Schaffner G. “Evaluation of spindle-based force sensor for monitoring and fault diagnosis of machine operations”, International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 741-751, 2002.
114. Routio M. and Saynatjoki M. “Tool wear and failure in the drilling of stainless steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 52, pp. 35-43, 1995.
115. Gao C. and li W. “Manufacture of the new drill dynamometer based on the piezoelectric deformation effect”, The 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI 2009), Vol. 4, pp. 822-826, Beijing, China, 2009.
116. Gao C., Li W. and Sun Baoyuan “Research on the piezoelectric torsional effect of rectangular quartz disc and a novel drilling dynamometer”, Measurement, Vol. 43, pp. 336-343, 2010.
117. Scientific Technical Committees of CIRP-STCC, “Recommendation of calibration and operation of machined-tool dynamometer [J]”, Vol. 23, No. 2, pp. 295-306, 1974.
118. Karabay S. “Performance testing of a constructed drilling dynamometer by deriving empirical equations for drill torque and thrust an SAE 1020 steel”, Materials and Design, Vol. 28, pp. 1780-1793, 2007.
119. Pena B., Aramendi G., Rivero A. and Lacalle L.N. “Monitoring of drilling for bur detection using spindle torque”, International Joyrnal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 1614-1621, 2005.
120. Gardner J.D, Vijayaraghavan A. and Dornfeld D. “Comparative study of finite element simulation software”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, University of California, 2005.
121. Selvam S.V.M. and Sujatha “Twist drill deformation and optimum drill geometry”, Computers & Structures, Vol. 57, pp. 903-914, 1995.
122. Hinds B.K. and Treanor G.M. “Analysis of stresses in micro-drills using the finite element method”, International Journal of machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp. 1443-1456, 2000.
123. Guo Y. and Dornfeld D.A. “Finite element analysis of drilling burr minimization with a backup material”, Transactions of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 207-212, 1998.
124. Guo Y. and Dornfeld D.A. “Finite element analysis of burr formation process in drilling 304 stainless steel”, Transaction of the ASME, Vol. 122, pp. 612-619, 2000.
125. Guo Y. and Dornfeld D.A. “Integration of CAD of drill with FEA of drilling burr formation”, Transaction of NAMRI/SME, Vol. XXVI, pp. 201-206, 1998.
126. Min D., Dornfeld D.A., Kim J. and Shyu B. “Finite element modeling of burr formation in metal cutting”, Machining Science and Technology, Vol. 5, pp. 307-322, 2001.
127. Choi J., Min S. and Dornfeld D.A. “Finite element modeling of burr formation in drilling of a multi-layered material”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, University of California, 2004.

128. Chen W.C. “Applying the finite element method to drill design based on drill deformations”, Finite Element in Analysis and Design, Vol. 26, pp. 57-81, 1997.
129. Strenkofski J.S., Hsieh C.C. and Shih A.J. “An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 1413-1421, 2004.
130. Wu J. and Han R. “A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on finite element model”, Journal of Manufacturing Processes, Vol, 11, pp. 19-30, 2009.
131. Zitoune R. and Collombet F. “Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures”, Composites: Part A 38, pp. 858-866, 2007.
132. Singh I., Bhatnagar N. and Viswanath P. “Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study”, Materials and Design, Vol. 29, pp. 546-553, 2008.
133. Miller S. and Shih A.J. “Thermo-Mechanical finite element modeling of the friction drilling process”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 129, pp. 531-538, 2007.
134. Miller S., Li R., Wang H. and Shih A.J. “Experimental and numerical analysis of the friction drilling process”, Transactions of the ASME, Vol. 128, pp. 802-810, 2007.
135. Li R. and Shih A.J. “Finite element modeling of high-throughput drilling of Ti-6Al-4V”, Transactions of NAMRI/SME, Vol. 35, pp. 73-80, 2007.
136. Li R. and Shih A.J. “Tool temperature in Titanium drilling”, Transaction of the ASME, Vol. 129, pp. 740-749, 2007.
137. Kalidas S., Kapoor S.G. and DeVor R.E. “Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 1: A thermal model of workpiece temperatures” Transactions of the ASME, Vol. 124, pp. 258-266, 2002.
138. Kalidas S., Kapoor S.G. and DeVor R.E. “Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 2: Thermo-elastic effects on hole quality” Transactions of the ASME, Vol. 124, pp. 267-274, 2002.
139. Ozcelik B. and Bagci E. “Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: a new approach”, Materials and Design, Vol. 27, pp. 920-927, 2006.
140. Bagci E. and Ozcelik B. “Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 28, pp. 680-687, 2006.
141. Han R. and Wu J. “Finite element simulation of drilling based on Third Wave Systems AdvantEdge”, Key Engineering Materials, Vol. 431-432, pp. 229-232, 2010.
142. http://www.thirdwavesys.com/pdfs/tech/finite_element_modeling.pdf (προσβάσιμο στις 15-09-2010).
143. Li X. and Liang Y. “Finite element simulation and experiment study of high manganese steel drilling”, 2nd International Conference on Computer Modeling and Simulation, IEEE Computer Society, pp. 54-58, 2010.
144. Klocke F., Lung D., Gerschwiler K. and Abouridouane M. “Scaling effects of the cutting edge rounding on the minimum uncut chip thickness and 3D FE modeling in drilling”, 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Scilla, Italy, 2007.
145. Gong Y., Ehmann K.F. and Lin C. “Analysis of dynamic characteristics of microdrills” Journal of materials Processing Technology, Vol. 141, pp. 16-28, 2003.
146. Haq A.N., Marimuthu P. and Jeyapaul R. “Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/Sic metal matrix composite using grey relational analysis in the

Taguchi method", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 37, pp. 250-255, 2008.
147. Davim J.P., Gaitonde V,N. and Karnik S.R. "An investigative study of delamination in drilling of medium density fibreboard (MDF) using response surface models", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 37, pp. 49-57, 2008.
148. Gaitonde V,N., Karnik S.R., Rubio J.C., Correia A.E. Abrao A.M. and Davim J.P. "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, pp. 431-438, 2008.
149. Palanikumar K., Rubio J.C., Abrao A., Esteve A. and Davim J.P. "Statistical Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP)", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 27, pp. 1615-1623, 2008.
150. Palanikumar K., Rubio J.C., Abrao A., Esteve A. and Davim J.P. "Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics", Journal of Composite Materials, Vol. 42, pp. 2585-2597, 2008.
151. Tsao C.C. "Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite materials", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 32, pp. 877-884, 2007.
152. Tsao C.C. "Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 37, pp. 23-28, 2008.
153. Zhang J.Z. and Chen J.C. "Surface roughness optimization in a drilling operation using the Taguchi design method", materials and Manufacturing Processes, Vol. 24, pp. 459-467, 2009.
154. Kurt M., Bagci E. and Kaynak Y. "Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 40, pp. 458-469, 2009.
155. Tsao C.C. and Hocheng H. "Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, pp. 342-348, 2008.
156. Kilickap E. "Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-009-2469-x, 2010.
157. Kilickap E. "Optimisation of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite", Expert Systems with Applications, Vol. 37, pp. 6116-6122, 2010.
158. Azmir M.A., Sivasankaran P.N. and Z. Hamedon "Experimental study on drilling process of CFRP composite laminate", Material Science Forum, Vols. 638-642, pp. 927-932, 2010.
159. Al-Sulaiman F.A., Baseer A.A. and Sheikh A.K. "Use of electrical power for online monitoring of tool condition", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, pp. 364-371, 2005.
160. Shyha I.S., Aspinwall D.K., Soo S.L. and Brandley S. "Drill geometry and operating effects when cutting small diameter hole in CFRP", International Journal of machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp. 1008-1014, 2009.
161. Bagci E. and Ozcelik B. "Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method dyring dry drilling of Al 7075-T651", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 29, pp. 629-636, 2006.

162. Khashaba U.A., Seif M.A. and Elhamid M.A. “Drilling analysis of chopped composites”, Composites: Part A, Vol. 38, pp 61-70, 2007.
163. Williams R.A. and McGilchrist C.A. “An experimental study of drill life”, Int. J. Prod. Res., Vol. 10, pp. 175-191, 1972.
164. Jalali S.A. and Kolarik W.J. “Tool life and machinability models for drilling steels”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, pp. 273-282, 1991.
165. Stone R. and Krishnamurthy “A neural network thrust force controller to minimize delaminating during drilling of graphite-epoxy laminates”, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 36, pp. 985-1003, 1996.
166. Chung B.M. and Tomizuka M. “Fuzzy logic modeling and control for drilling of composite laminates”, 10th IEEE international Conference on Fuzzy Systems, Proceedings, pp. 509-512, Melbourn, 2001.
167. Karri V. “RBF neural network for thrust and torque prediction in drilling operations”, 3rd International Conference on Computational Intelligence and Multimedia applications (ICCIMA 99), Proceedings, pp. 55-59, New Delhi, 1999.
168. Lee B.Y., Liu H.S. and Tarng Y.S. “Modeling and optimization of drilling process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol 74, pp. 149-157, 1998.
169. Sheng Y. and Tomizuka M. “Intelligent modeling of thrust force in drilling process”, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 128, pp. 846-856, 2006.
170. Panda S.S., Chakraborty D. and Pal S.K. “Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network”, Applied Soft Computing, Vol. 8, pp. 858-871, 2008.
171. Fayad R. “Tool monitoring for drilling process applying enhanced neural network”, 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering 2010, Vol. 3, pp. 200-204, Singapore, 2010.
172. Kawaji S., Arao M. and Chen Y. “Thrust force control of drilling system using neural network”, 2001 IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics, Proceedings, pp. 476-481, Italy, 2001
173. Brophy B., Kelly K. and Byrne G. “AI-based condition monitoring of the drilling process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, pp. 305-310, 2002.
174. Sanjay C. and Jyothi C. “A study of surface roughness in drilling using mathematical analysis and neural networks”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 29, pp. 846-852, 2006.
175. Hasmi K., Graham I.D. and Mills B. “Fuzzy logic based data selection for the drilling process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol 108, pp. 55-61, 2000.
176. Karnik S.R., Gaitonde V.N. and Davim J.P. “A comparative study of the ANN and RSM modeling approaches for predicting burr size in drilling”, international Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 38, pp. 868-883, 2008.
177. Autodesk Inc., “Inventor 2008 Application Programming Interface Reference”, 2008.
178. Kienzle O. and Victor H. “Spezifische Shnittkraefte bei der Metall-bearbeitung”, Werkstattstehnik und Maschinenbau, Bd.47, H.5, 1957
179. Konig W. and Essel K. “Spezifische Schnittkraftwerte fur die Zerspanung metallischer Werkstoffe”, Dusseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., 1973.
180. Cohran, W.G. and G.M. Cox (1992), Experimental Design, John Wiley and Sons, New York.
181. Montgomery, D.C. (2001), Design and analysis of experiments, John Wiley and Sons, New York.
182. Montgomery D.C., Peck E.A. and Vining G.G. “Introduction to linear regression analysis”, John Wiley & Sons, New York, 2001.

183. Myers, R.H. and D.C. Montgomery (1995), Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, John Wiley and Sons, New York.