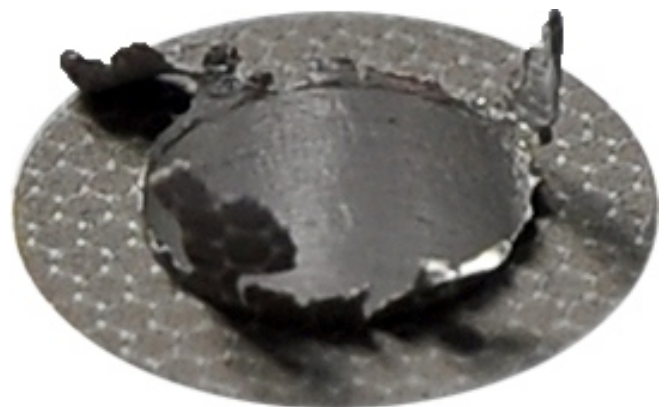






**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ  
ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΠΟΛΗΞΗΣ (BURR)  
ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ**



**ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**



στον Άρη

Στον Δρ. Αριστείδη Στουρνάρα, εξάίρετο άνθρωπο και επιστήμονα  
ως απείρως ελάχιστο ευχαριστώ για την αγάπη του, τα εφόδια και τη δύναμη  
που με γέμισε και με ακολουθούν πάντα





Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας η οποία υπήρξε περισσότερο αφορμή και μέσο για ένα ταξίδι γνώσης και επιμόρφωσης γεμάτο καινούριες εμπειρίες, ανθρώπους, στιγμές και προπάντων ευκαιρία για να διεισδύσω βαθύτερα στον αγαπημένο μου και συναρπαστικό κόσμο της Μηχανολογίας και ειδικότερα των κατεργασιών, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την *οικογένεια* και τους *φίλους μου* για την υπομονή τους, την εμπιστοσύνη τους σε εμένα και τις αποφάσεις μου, καθώς και τις θετικές τους σκέψεις όλον αυτόν τον καιρό.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα την ψυχή του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, δηλαδή τους φοιτητές, φίλους και συνεργάτες του, όσους πέρασαν άλλα και όσους παραμένουν, τον *Αντώνη Λυρώνη*, τη *Μαρία Παππά* και τον *Κώστα Σοφιάκη* για όλες τις ξεχωριστές στιγμές και ιδιαίτερα το *Δημήτρη Βακόνδιο* και τον *Ταξιάρχη Μπελή* για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρήχαν κάθε φορά που τη χρειάστηκα.

Τέλος, τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου, *Δρ. Αριστομένη Αντωνιάδη* στο πρόσωπο του οποίου είχα την τύχη να βρω τον καλύτερο δυνατό σύμμαχο και συνεργάτη στην προσπάθεια υλοποίησης των στόχων και των ονείρων μου. Τον ευχαριστώ για τη στήριξη, την καθοδήγηση και την υπομονή του. Ακόμα περισσότερο, για την ιδιαιτερότητά του ως άνθρωπος και εκπαιδευτικός, η οποία έδωσε στη δική μου ιδιαιτερότητα τον απαραίτητο χώρο ώστε να αναπτυχθεί και να εκφραστεί ελεύθερα. Η συνεργασία μαζί του και όλες οι δραστηριότητες στις οποίες συμμετείχα στα πλαίσια αυτής, ξεπέρασαν κατά πολύ τις προσδοκίες μου.

Χαρά Ευσταθίου  
Χανιά, Σεπτέμβριος 2015



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	7
1.2 Δομή εργασίας.....	7
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	9
2.1 Απόληξη Διάτρησης (Drilling Burr).....	9
2.1.1 Η κατεργασία διάτρησης και η κινηματική της.....	9
2.1.2 Αρνητικές επιπτώσεις και ανάγκη ελαχιστοποίησης της απόληξης διάτρησης.....	11
2.1.3 Γεωμετρία και μορφολογία της απόληξης διάτρησης.....	12
2.1.4 Τύποι απόληξης διάτρησης και επίδραση των παραμέτρων.....	14
2.1.5 Μηχανισμός σχηματισμού απόληξης διάτρησης.....	15
2.1.6 Μέτρηση της Απόληξης Διάτρησης.....	17
2.2 Πειραματικές μελέτες του σχηματισμού απόληξης διάτρησης.....	18
2.2.1 Μείωση της θερμότητας στην περιοχή σχηματισμού της απόληξης.....	22
2.2.2 Διάτρηση σύνθετων υλικών.....	25
2.3 Διαγράμματα ελέγχου της απόληξης διάτρησης (Drilling Burr Control Charts).....	26
2.4 Σχηματισμός απόληξης σε κατεργασίες διάτρησης σε μικροκλίμακα.....	27
2.5 Αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης του σχηματισμού απόληξης διάτρησης.....	31
2.5.1 Αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού - πρόβλεψης δυνάμεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης.....	31
2.5.2 Αναλυτικό μοντέλο διάτρησης με παλμική υποβοήθηση (vibration assisted model).....	32
2.5.3 Αναλυτική μοντελοποίηση δυνάμεων κοπής κατά τη διάτρηση για την ανάλυση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης.....	34
2.6 Απόληξη διάτρησης σε διασταυρούμενες οπές και καμπυλωτές επιφάνειες.....	35
2.7 Διάτρηση υλικών πολλαπλών στρωμάτων.....	37
2.8 Προσομοίωση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	40
2.9 Εναλλακτικές Προσεγγίσεις μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης του σχηματισμού απόληξης διάτρησης.....	41
2.9.1 Μεθοδος επιφανειών Αποκρισης (RSM) και Βελτιστοποίηση με Γενετικό Αλγόριθμο.....	41
2.9.2 Προσομοίωση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης με Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο και βελτιστοποίηση με τη Μέθοδο Σμήνους Σωματιδίων (PSO).....	43
2.9.3 Χρήση σημάτων από τους κινητήρες πρόωσης και περιστροφής για τον εντοπισμό των μη αποδεκτών απολήξεων διάτρησης.....	45
3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	47
3.1 Εισαγωγή.....	47
3.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος.....	48
3.2.1 Καθορισμός και εισαγωγή γεωμετρίας τμημάτων.....	49

3.2.2	Επιλογή των υλικών και καθορισμός των ιδιοτήτων τους .....	50
3.2.3	Δημιουργία συναρμολογ/νης διάταξης-τοποθέτηση επί μέρους τμημάτων ..	52
3.2.4	Γεωμετρικοί περιορισμοί συναρμολόγησης .....	53
3.2.5	Προσδιορισμός χρονικού βήματος ανάλυσης (Analysis Time Step) .....	54
3.2.6	Καθορισμός συνωριακών συνθηκών (Boundary Conditions) .....	58
3.2.6	Πλεγματοποίηση εργαλείου και δοκιμίου .....	60
3.2.7	Ορισμός επαφής μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου .....	67
3.2.8	ALE – Arbitrary Lagrangian Eulerian method .....	69
3.2.9	Δημιουργία, υποβολή αρχείου ανάλυσης και παρακολούθησή της.....	73
3.3	Παραδοχές για την απλοποίηση του μοντέλου.....	74
3.4	Αξιολόγηση και μεθεπεξεργασία των αποτελεσμάτων της επίλυσης (post-processing).....	76
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ.....	79
4.1	Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας.....	79
4.2	Χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων και πειραματικός εξοπλισμός.....	79
4.3	Σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας .....	81
4.3.1	Δοκίμια διάτρησης.....	81
4.3.2	Κατασκευή δοκιμίων .....	83
4.3.3	Σχεδίαση βάσης συγκράτησης δοκιμίων .....	87
4.3.4	Κατασκευή βάσης συγκράτησης δοκιμίων.....	89
4.3.5	Προσδιορισμός συνθηκών πειραματικής διαδικασίας.....	90
4.4	Πειραματική διαδικασία .....	92
4.5	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	93
5.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	97
5.1	Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων .....	97
5.2	Μετρητική διαδικασία .....	98
5.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου προσομοίωσης με πειραματικά .....	107
5.3.1	Εξέλιξη φαινομένου παραμόρφωσης: Σύγκριση προσομοίωσης με βίντεο καταγραφής της κατεργασίας.....	107
5.3.2	Σύγκριση μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης .....	111
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	113
6.1	Συμπεράσματα .....	113
6.2	Προοπτικές .....	114
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	118

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται το φαινόμενο σχηματισμού απόληξης (ξεχειλίσματος υλικού) κατά την κατεργασία της διάτρησης (drilling burr). Η εργασία εστιάζει στην απόληξη που προκύπτει ως ατέλεια γύρω από την περιφέρεια της οπής στην επιφάνεια εξόδου, μετά την έξοδο του εργαλείου διάτρησης από το κατεργαζόμενο υλικό. Παρ' όλο που απόληξη εμφανίζεται και στην επιφάνεια εισόδου, η απόληξη εξόδου θεωρείται σημαντικότερη γιατί είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος και ως εκ τούτου είναι επιβεβλημένη αλλά και πιο δύσκολη η αφαίρεσή της.

Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης δημιουργήθηκε μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας διάτρησης σε ένα λογισμικό υλοποίησης της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων. Το μοντέλο έχει σκοπό να προσομοιώσει με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια ολόκληρη την κατεργασία της διάτρησης με μεταβαλλόμενες συνθήκες κοπής αλλά και ειδικότερα το μηχανισμό σχηματισμού της απόληξης διάτρησης.

Για το σκοπό της επιβεβαίωσης του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν πειράματα διάτρησης Αλουμινίου EN AW 2007 σε κέντρο κατεργασίας (φραιζαρίσματος). Τα δοκίμια διάτρησης καθώς και η βάση στην οποία αυτά στηρίχθηκαν, κατασκευάστηκαν σε κέντρο κατεργασίας και σε κέντρο τόνευσης. Μετά την κατασκευή τους, στα δοκίμια και συγκεκριμένα στην επιφάνεια εξόδου του εργαλείου, χαράχθηκε κάνναβος προκειμένου να καταστεί εφικτή η παρατήρηση και μέτρηση της παραμόρφωσης του υλικού στην επιφάνεια εξόδου, έως τη στιγμή της τελικής εξόδου του εργαλείου. Για το σκοπό αυτό, τα πειράματα διάτρησης καταγράφηκαν με μία κάμερα υψηλής ταχύτητας, ενώ η σύγκριση των πειραματικών με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου έγινε μέσω των βίντεο στα οποία αποτυπώνεται όλη η διαδικασία.

Πέρα από την επιβεβαίωση του μοντέλου, σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων κοπής, δηλαδή της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής, στην ανάπτυξη και το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης. Οι προκύπτουσες, από τα πειράματα, απολήξεις διάτρησης μετρήθηκαν για κάθε δοκίμιο σε 24 θέσεις ανά 15° στην περιφέρεια της οπής με τη χρήση ενός τριδιάστατου οπτικού προφίλομέτρου καθώς και ενός οπτικού στερεομικροσκοπίου. Από τη μετρητική διαδικασία προέκυψαν και καταγράφηκαν τα ανάλογα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν τα ύψη  $h_b$  και πλάτη της απόληξης  $w_b$  και εντοπίστηκε η επίδραση της μεταβολής της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής σε αυτά.

### 1.2 Δομή εργασίας

Το **κεφάλαιο 1** αποτελεί μια εισαγωγή στην εργασία μέσω της παρουσίασης του βασικού αντικειμένου και της δομής της.

Στο **κεφάλαιο 2** της εργασίας παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική έρευνα για τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έως τώρα και αφορούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, δηλαδή το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης.

Στο **κεφάλαιο 3** περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας διάτρησης που αναπτύχθηκε.

Το **κεφάλαιο 4** αναφέρεται στην πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, την προπαρασκευαστική διαδικασία αλλά και το σχεδιασμό των πειραμάτων καθώς και στα αποτελέσματα αυτών.

Στο **κεφάλαιο 5** περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης των απολήξεων διάτρησης καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν. Παρουσιάζεται ακόμα η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 6** αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη όπως επίσης και οι μελλοντικές προοπτικές για περαιτέρω εξέλιξή της με ταυτόχρονη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Απόληξη Διάτρησης (Drilling Burr)

#### 2.1.1 Η κατεργασία διάτρησης και η κινηματική της

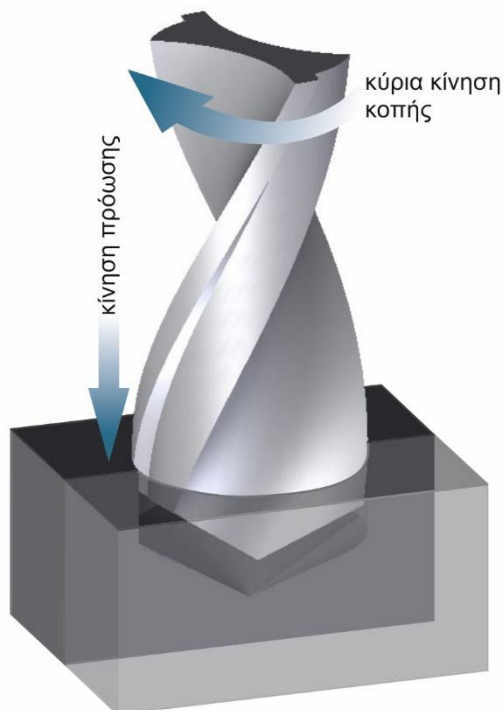
Ο όρος διάτρηση στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού αναφέρεται στη διαδικασία διάνοιξης οπών σε ένα τεμάχιο ή εξάρτημα προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ποικίλους σκοπούς. Οι οπές χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων, τη ροή ρευστών, τη μείωση βάρους κ.ά..

Η διάτρηση ανήκει στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και κατέχει σπουδαία θέση μεταξύ των μηχανουργικών διεργασιών καθώς είναι μία από τις πιο κοινά εφαρμοζόμενες κατεργασίες στη βιομηχανία. Η κατεργασία διάτρησης συνήθως πραγματοποιούνται στα τελικά στάδια της διαδικασίας παραγωγής ενός κομματιού ή προϊόντος.



Σχήμα 2.1: Κατεργασία διάτρησης ή διάνοιξη οπών

Οι βασικές κινήσεις οι οποίες εκτελούνται από το κοπτικό εργαλείο κατά την κατεργασία της διάτρησης είναι η κύρια κίνηση κοπής (περιστροφική) και η κίνηση πρόωσης (γραμμική μεταφορική), όπως φαίνονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Κινηματική της διάτρησης

Η κινηματική της διάτρησης, δηλαδή οι κινήσεις κοπής και πρόωσης περιγράφονται από δύο μεγέθη τα οποία αποτελούν τις βασικές παραμέτρους της κατεργασίας. Αυτές είναι η



ταχύτητα κοπής  $v_c$  και η ταχύτητα πρόωσης  $v_f$ , οι οποίες δίδονται από τους παρακάτω τύπους

$v_c = \frac{\pi d n}{1000}$	[m/min]	Εξίσωση 2.1
------------------------------	---------	-------------

και

$V_f = f_n \times n$	[mm/min]	Εξίσωση 2.2
----------------------	----------	-------------

Όπου:  $d$ , η διάμετρος του εργαλείου σε mm  
 $n$ , η ταχύτητα περιστροφής σε rpm  
 $f$ , η πρόωση ανά περιστροφή σε mm/rev

Οι παραπάνω παράμετροι της διάτρησης είναι αυτές που κυρίως ελέγχουν και επηρεάζουν την κατεργασία και τα αποτελέσματά της, δηλαδή:

- την ποιότητα της επιφάνειας της οπής,
- την κυλινδρικότητα και ομοαξονικότητά της καθώς και
- τη δημιουργία της απόληξης διάτρησης κατά την είσοδο του εργαλείου διάτρησης στο τεμάχιο καθώς και κατά την έξοδο του από αυτό.

Άλλες συνθήκες που επηρεάζουν τα παραπάνω αποτελέσματα είναι:

- η χρήση ή μη ψυκτικού υγρού (υγρή και ξηρή κοπή),
- το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου,
- το βάθος της οπής,
- το υλικό κατασκευής και η γεωμετρία του εργαλείου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διάνοιξη οπών σε εξαρτήματα και κατασκευές κατά το πλείστον εφαρμόζεται στα τελευταία στάδια της παραγωγής ενός προϊόντος και ως εκ τούτου σφάλματα και αστοχίες που εν δυνάμει προκύπτουν, μπορεί να αυξήσουν το κόστος του κομματιού σε μεγάλο βαθμό. Για το λόγο αυτό, η βελτίωση ή και βελτιστοποίηση των κατεργασιών διάτρησης είναι ιδιαίτερα σημαντική και έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον μεγάλου αριθμού ερευνητών επί πολλές δεκαετίες.

Τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά τις κατεργασίες διάτρησης είναι αυξημένης πολυπλοκότητας λόγω του θερμο-ελαστο-πλαστικού τους χαρακτήρα και των ιδιαίτερα μεγάλων παραμορφώσεων του υλικού με πολύ υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, η σε βάθος διερεύνηση και εξήγησή τους και ακόμα περισσότερο η μοντελοποίηση ή και προσομοίωσή τους αποτελούν πρόκληση για τους επιστήμονες. Στα πλαίσια αυτού, έχουν γίνει πολλές και εκτεταμένες έρευνες εύρεσης προσεγγιστικών μοντελοποιήσεων της κατεργασίας διάτρησης και των φαινομένων που παρουσιάζονται σε αυτήν.

Κάποια από τα προβλήματα, που αναπόφευκτα μέχρι τώρα υπεισέρχονται στις κατεργασίες διάτρησης, είναι:

- η φθορά του κοπτικού εργαλείου,
- οι αποκλίσεις στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και

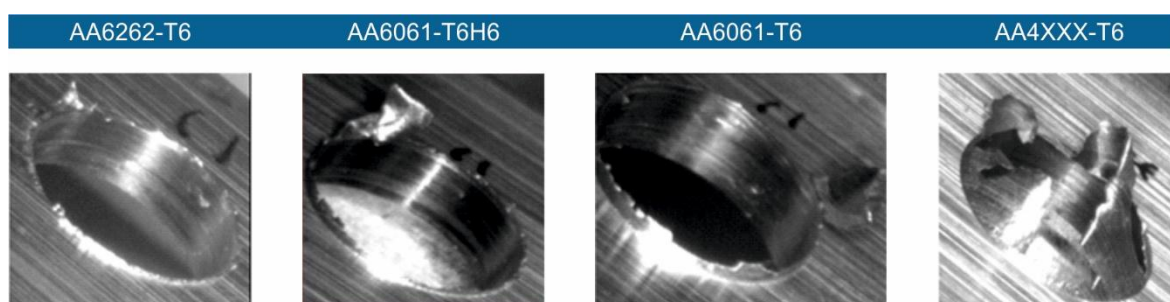
- ο σχηματισμός της χαρακτηριστικής απόληξης διάτρησης (drilling burr) στην είσοδο και έξοδο της οπής.

Αντικείμενο και στόχος λοιπόν των περισσότερων μελετών είναι η επαρκής και πλήρης πειραματική διερεύνηση και μοντελοποίηση της διάτρησης με όλα τα φαινόμενα που αυτή περιλαμβάνει, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών και παραμέτρων που εξαλείφουν ή κατά το δυνατό ελαχιστοποιούν τα πιο πάνω αναφερθέντα φαινόμενα.

### 2.1.2 Αρνητικές επιπτώσεις και ανάγκη ελαχιστοποίησης της απόληξης διάτρησης

Οι απολήξεις διάτρησης εμφανίζονται τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της οπής και αποτελούν αποκλίσεις από την επιθυμητή γεωμετρία και ατέλεια στην επιφάνεια των κομματιών, υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητά τους. Οι απολήξεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια εξόδου είναι ως επί το πλείστον μεγαλύτερες σε μέγεθος αλλά και πιο ανομοιόμορφες από τις απολήξεις εισόδου και ως εκ τούτου η έρευνα για ελαχιστοποίηση του μεγέθους και εξομάλυνση της μορφολογίας τους, έχει επικεντρωθεί στις απολήξεις εξόδου στις οποίες κυρίως εστιάζει και η παρούσα εργασία.

Λόγω της αυξημένης απαίτησης για διαστασιακή ακρίβεια των παραγόμενων κομματιών και προϊόντων, η αφαίρεση των απολήξεων και επίτευξη της ακριβούς επιθυμητής γεωμετρίας μετά το πέρας της κατεργασίας, είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων επιβεβλημένη. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτών των διαδικασιών μετά-κατεργασίας του προϊόντος αυξάνει το κόστος και το χρόνο παραγωγής του. Αυτή η αύξηση γίνεται εντονότερη όσο μεγαλώνει ο βαθμός πολυπλοκότητας των κομματιών, ο αριθμός των οπών τις οποίες περιλαμβάνουν και όσο μειώνεται ο βαθμός αυτοματοποίησης της διαδικασίας απομάκρυνσης των απολήξεων διάτρησης (deburring). Έχει διαπιστωθεί ότι ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης, η διαδικασία απομάκρυνσης των απολήξεων μπορεί να συμβάλει στην αύξηση του συνολικού κόστους κατεργασίας από 5% έως 30% (για τα πλέον πολύπλοκα κομμάτια, π.χ. κινητήρες αεροσκαφών). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι απόληξης οι οποίοι παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες εξόδου κατά τη διάτρηση κομματιών από διαφορετικό κράμα αλουμινίου.



Σχήμα 2.3: Διάφοροι τύποι απόληξης διάτρησης

Αν και η διαδικασία απομάκρυνσης έχει και αυτή ερευνηθεί και μελετηθεί σε ένα βαθμό και μάλιστα έχουν κατασκευαστεί τόσο αυτοματοποιημένες μέθοδοι όσο και ειδικά εργαλεία για αυτόν το σκοπό, τις περισσότερες φορές γίνεται χειροκίνητα, ίσως λόγω των ιδιομορφιών και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κάθε περίπτωσης όπου παρουσιάζεται η ανάγκη αυτή. Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις η απομάκρυνση της απόληξης έχει μεγάλο βαθμό δυσκολίας ή είναι ακόμα και αδύνατη λόγω π.χ. πολύπλοκης γεωμετρίας του κομματιού, ύπαρξης διασταυρούμενων οπών ή διάτρησης σε μικρο-κλίμακα.

Άλλες αρνητικές επιπτώσεις της δημιουργίας απόληξης διάτρησης είναι:

- Κίνδυνος για την ασφάλεια των εργαζομένων λόγω αιχμηρότητας της απόληξης.
- Προβλήματα στη συναρμολόγηση (μπλοκαρίσματα, αστοχίες).
- Μείωση της αντοχής του κομματιού σε κόπωση, λόγω της σκλήρυνσης παραμόρφωσης και της πιο ψαθυρής συμπεριφοράς της απόληξης. Η απόληξη πολλές φορές μπορεί να λειτουργήσει ως σημείο δημιουργίας ρωγμών οι οποίες κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος και τη συνεχή καταπόνησή του διαδίδονται και μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία.
- Λόγω μη επαρκούς συνδετικής ζώνης με το υπόλοιπο κομμάτι, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του, η απόληξη μπορεί να αποχωριστεί κατά τη λειτουργία και να δημιουργήσει από μικρές έως μεγάλες ανεπιθύμητες βλάβες.

### 2.1.3 Γεωμετρία και μορφολογία της απόληξης διάτρησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με τη διερεύνηση της διαδικασίας σχηματισμού απόληξης στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και ειδικότερα στη διάτρηση. Στα πλαίσια αυτού έχει πραγματοποιηθεί, με διάφορους τρόπους, ο χαρακτηρισμός της απόληξης και προσδιορισμός της μορφολογίας της, δηλαδή όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που την ορίζουν. Ο χαρακτηρισμός και η αναλυτική περιγραφή της γεωμετρίας διαφέρει σε κάποιο βαθμό από ερευνητή σε ερευνητή, ανάλογα με τον τρόπο παρατήρησης και μοντελοποίησης που έχει χρησιμοποιήσει (απλή παρατήρηση, αναλυτική μαθηματική μοντελοποίηση ή με πεπερασμένα στοιχεία) αλλά και την ακρίβεια και πληρότητα των διαθέσιμων μεθόδων καταγραφής και μέτρησης (απλή οπτική καταγραφή, μικροσκοπία, καταγραφή εικόνας, βίντεο υψηλών ταχυτήτων).

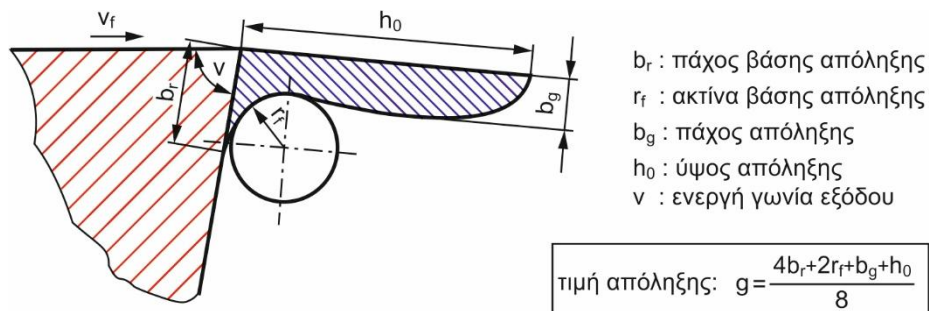
Πρώτος ο **Gillespie** [1] το 1976 έδωσε έναν γενικό ορισμό της απόληξης κατεργασίας διατυπώνοντας ότι η απόληξη που δημιουργείται σε κατεργασίες κοπής περιλαμβάνει όλο το υλικό που προεξέχει πέραν της θεωρητικής τομής των δύο εφαπτόμενων επιφανειών (του κομματιού) που την περικλείουν.



Σχήμα 2.4: Παραδείγματα χαρακτηριστικών απολήξεων σύμφωνα με τον Gillespie [1]

Λίγο αργότερα ο **Schäfer** [2] το 1978 δίνει ίσως την πρώτη αναλυτική τεχνική περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης. Περιγράφει την απόληξη ως μέρος ενός κατεργαζόμενου κομματιού το οποίο παράγεται μέσω μηχανουργικών κατεργασιών σε μία ακμή ή επιφάνεια του κομματιού και προεξέχει της επιθυμητής ή προβλεπόμενης γεωμετρίας. Ο Schäfer στη μελέτη του χρησιμοποίησε μία τομή της απόληξης προκειμένου να περιγράψει τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της, ορίζοντας τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη:

- το πάχος της βάσης  $b_r$
- το ύψος της απόληξης  $h_0$ , το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της ιδανικής επιφάνειας του κομματιού και του υψηλότερου σημείου προεξοχής της απόληξης
- την ακτίνα της βάσης  $r_f$  (φαίνεται στο σχήμα 2.5, προσδιορίζεται από έναν κύκλο ακτίνας  $r_f$ )
- το πάχος της απόληξης  $b_g$ , το οποίο είναι το πάχος παράλληλα στη βάση και σε απόσταση  $r_f$



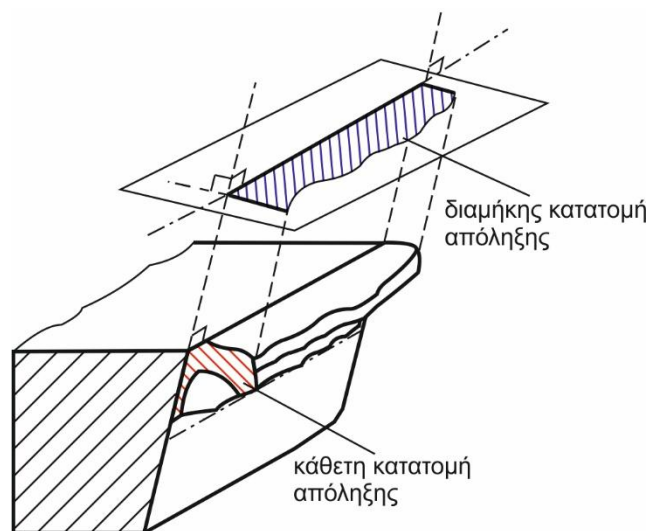
Σχήμα 2.5: Γεωμετρία της απόληξης κατεργασίας σύμφωνα με τον Schäfer [2]

Είναι αξιοσημείωτο ότι η συγκεκριμένη περιγραφή και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που απέδωσε ο Schäfer στην απόληξη, έχουν χρησιμοποιηθεί και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται ευρύτατα από μεγάλο αριθμό ερευνητών που ασχολούνται με τη μελέτη της απόληξης κατεργασίας. Προκειμένου να υπάρχει μία ενοποιημένη και αναλυτική έκφραση του μεγέθους της απόληξης ο Schäfer πρότεινε τη σχέση:

$$g = \frac{4b_r + 2r_f + b_g + h_0}{8}$$

Εξίσωση 2.3

χαρακτηρίζοντας το μέγεθος  $g$  ως **τιμή της απόληξης**.

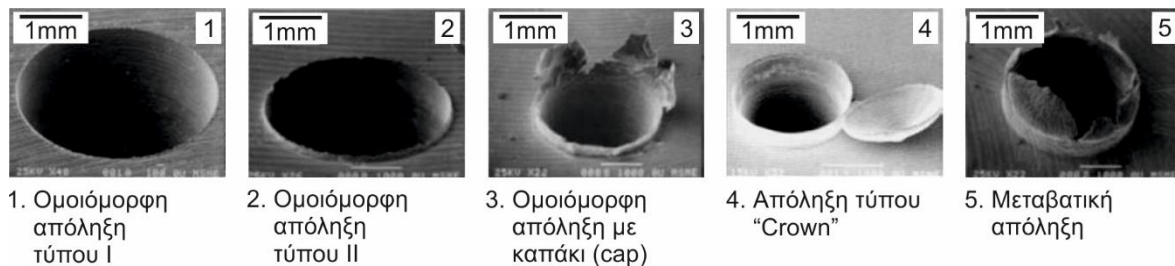


Σχήμα 2.6: Τομή απόληξης και προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τον Schäfer [2]

### 2.1.4 Τύποι απόληξης διάτρησης και επίδραση των παραμέτρων

Η μορφή των απολήξεων διάτρησης μπορεί να διαφέρει πολύ ανάλογα με τις μεταβλητές παραμέτρους που επιδρούν στη δημιουργία τους. Οι **Kim et al.** [3] μετά από πειράματα διάτρησης χάλυβα AISI 304L και AISI 4118 παρατήρησαν και διαχώρισαν τέσσερις διαφορετικούς τύπους απολήξεων διάτρησης οι οποίοι φαίνονται στο σχήμα:

Ομοιόμορφη απόληξη, Ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους, Ομοιόμορφη απόληξη με το χαρακτηριστικό καπάκι (cap), Απόληξη τύπου "Crown" (ανομοιόμορφη), Μεταβατική απόληξη (ενδιάμεσο στάδιο ομοιόμορφης και "crown")



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικοί τύποι απολήξεων εξόδου διάτρησης κατά τον Kim [3] (CODEF, University of Berkeley)

#### Επίδραση των παραμέτρων στο μέγεθος της απόληξης διάτρησης:

Ο παραπάνω διαχωρισμός της μορφολογίας της απόληξης σε τύπους έχει γίνει γενικά αποδεκτός και χρησιμοποιείται αφού έχει επαληθευτεί κατ' επανάληψη από τους περισσότερους ερευνητές. Βέβαια όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ανάλογα με το χαρακτήρα της μελέτης (πειραματική, αναλυτική, προσομοίωση), τη ρύθμιση των επιδρώντων παραγόντων αλλά και τη μέθοδο παρατήρησης και μέτρησης της απόληξης, οι παραπάνω μορφολογίες και η αντίστοιχη ονομασία τους μπορεί να παρουσιάζει μικρότερες ή μεγαλύτερες διαφορές.

Ο λόγος που κατά τις κατεργασίες διάτρησης παράγονται τόσο διαφορετικές σε μορφή (σχήμα) και μέγεθος απολήξεις είναι η υψηλού βαθμού επίδραση που έχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την κατεργασία. Έχουν γίνει πολλές μελέτες σε αυτό το πεδίο, της διερεύνησης δηλαδή του βαθμού επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στο σχηματισμό της απόληξης διάτρησης. Κάποιες από αυτές έχουν περιοριστεί σε πειραματικό επίπεδο και άλλες έχουν ενσωματώσει προχωρημένα στατιστικά και μαθηματικά μοντέλα όπως η Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA-Analysis of Variance). Οι βασικότεροι παράγοντες (παραμέτροι) που έχει διαπιστωθεί ότι επιδρούν στο σχηματισμό της απόληξης διάτρησης είναι:

- **Συνθήκες κοπής:** Πρόωση, ταχύτητα κοπής, χρήση ή μη ψυκτικού υγρού.
- **Υλικό κατεργαζόμενου τεμαχίου:** Θερμοεξαρθρώμενες μηχανικές ιδιότητες, όπως η ολκιμότητα και το όριο πλαστικής διαρροής.
- **Γεωμετρία εργαλείου διάτρησης (τρυπανιού):** ο τύπος του τρυπανιού (ελικοειδές, διπλής ή τριπλής ελίκωσης κ.λπ.), η διάμετρος του τρυπανιού και οι χαρακτηριστικές γωνίες του τρυπανιού (γωνία ελίκωσης, γωνία κορυφής, γωνία ανακούφισης, γωνία κλιμάκωσης).
- **Βασικό υλικό ή/και επικάλυψη εργαλείου διάτρησης:** HSS, καρβιδίου, επικάλυψη TiN, κ.λπ.
- **Κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή της κοπής.**

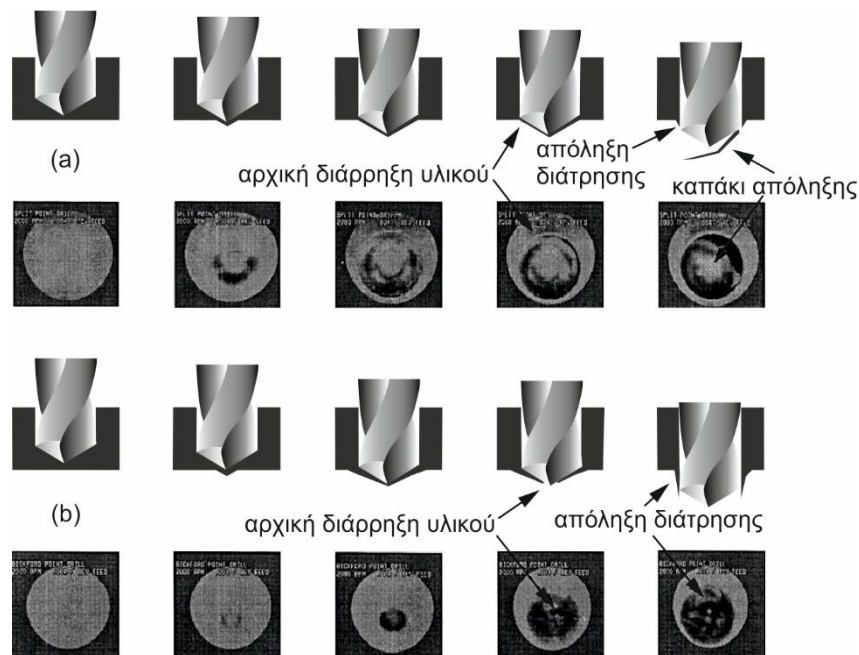
### 2.1.5 Μηχανισμός σχηματισμού απόληξης διάτρησης

Ο μηχανισμός δημιουργίας της απόληξης διάτρησης έχει μελετηθεί ενδελεχώς τόσο με πειραματική-οπτική παρατήρηση όσο και με προσομοίωση της διαδικασίας διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία. Αν και πιθανά να διαφοροποιούνται λίγο από τη μία μελέτη στην άλλη, τα στάδια ανάπτυξης της απόληξης διάτρησης είναι γενικά τα παρακάτω:

- συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady-state drilling),
- εκκίνηση προεξοχής της απόληξης από την επιφάνεια εξόδου (εκκίνηση δημιουργίας καπακιού – “cap”),
- ανάπτυξη καπακιού,
- αρχική διάρρηξη του υλικού,
- σχηματισμός τελικής απόληξης με ή χωρίς καπάκι.

Τα παραπάνω στάδια σχηματισμού της απόληξης διάτρησης φαίνονται στο σχήμα 2.8, με τις αντίστοιχες εικόνες από κάμερα υψηλής ταχύτητας. Στο σχήμα φαίνονται τα στάδια σχηματισμού ομοιόμορφης απόληξης με ή χωρίς καπάκι (cap) (a) και τα αντίστοιχα για το σχηματισμό απόληξης τύπου "crown" (b). Πιο αναλυτικά:

**Συνθήκες σταθερής κατάστασης:** Στο αρχικό στάδιο το τρυπάνι εισέρχεται στο κομμάτι και διεισδύει βαθύτερα κόβοντας συνεχώς υλικό και δημιουργώντας το απόβλιτο της διάτρησης. Αυτές είναι οι συνθήκες σταθερής κατάστασης.



Σχήμα 2.8: Μηχανισμός δημιουργίας απόληξης διάτρησης

**Εκκίνηση πλαστικής παραμόρφωσης:** Το παραπάνω στάδιο προχωρά μέχρι ένα κρίσιμο σημείο (σημείο εκκίνησης) όπου λόγω του πολύ λεπτού πάχους του εναπομείναντος ακατέργαστου υλικού το οποίο δεν μπορεί να δεχτεί άλλα φορτία (δύναμη ώθησης) από το τρυπάνι, περνά το όριο πλαστικής παραμόρφωσης και αρχίζει να κάμπτεται προς την επιφάνεια εξόδου του κομματιού.


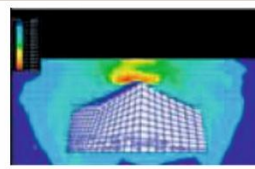


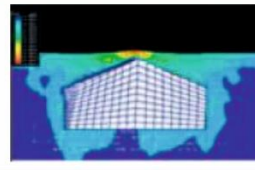


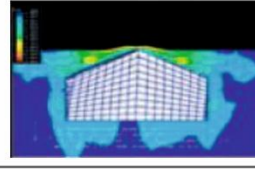


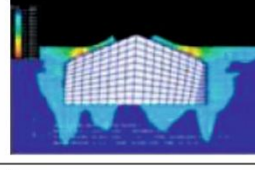


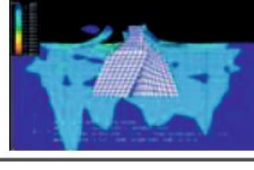

**Ανάπτυξη καπακιού:** Όσο το τρυπάνι προχωρά ωθώντας το υλικό προς τα έξω, η πλαστική περιοχή αρχίζει να επεκτείνεται από την κορυφή προς την περιφέρεια του τρυπανιού



και να αναπτύσσεται το χαρακτηριστικό καπάκι της διάτρησης. Παράλληλα ξεκινά μία ρωγμή η οποία διαδίδεται όσο το τρυπάνι προχωρά.

**Αρχική διάρρηξη υλικού:** Το σημείο στο οποίο δημιουργείται η ρωγμή και ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή και το μέγεθος της τελικής απόληξης διάτρησης. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το υλικό παραμορφωθεί στο μέγιστο βαθμό και τελικά αποχωριστεί από το κομμάτι, δημιουργώντας την απόληξη της διάτρησης.

**Τελικός σχηματισμός απόληξης - Δημιουργία και διάδοση ρωγμής:** Το σημείο δημιουργίας και ο τρόπος διάδοσης της ρωγμής επάνω στο καπάκι είναι που καθορίζουν στο τελικό στάδιο το αν θα δημιουργηθεί ομοιόμορφη απόληξη με ή χωρίς καπάκι ή απόληξη τύπου “crown”. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, όταν η ρωγμή δημιουργείται λόγω διάτμησης στη βάση του καπακιού, κοντά στην περιφέρεια της οπής, τότε διαδίδεται περιφερειακά του καπακιού και η τελική απόληξη είναι ομοιόμορφη με ή χωρίς καπάκι. Το μέγεθός της εξαρτάται από την απόσταση του σημείου στο οποίο ξεκινάει η ρωγμή από την επιφάνεια του τεμαχίου. Αν όμως η ρωγμή δημιουργηθεί στο υλικό μπροστά από τη μύτη του τρυπανιού τότε το υλικό αποχωρίζεται στην κορυφή του καπακιού και δημιουργείται ένα κενό από το οποίο περνάει το τρυπάνι διευρύνοντάς το. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η χαρακτηριστική μορφή απόληξης τύπου “crown”.

Μηχανισμός σχηματισμού απόληξης	Προτεινόμενος μηχανισμός σχηματισμού απόληξης	Προσομοίωση με τη Μ.Π.Σ.	Εικόνα απο κάμερα υψηλής ταχύτητας
(α) Συνθήκες σταθερής κατάστασης			
(β) Εκκίνηση πλαστικής παραμόρφωσης			
(γ) Ανάπτυξη “cap”			
(δ) Αρχική διάρρηξη υλικού			
(ε) Τελικός σχηματισμός απόληξης			

Σχήμα 2.9: Προσομοίωση διάτρησης και δημιουργίας απόληξης εξόδου από τον Guo et al. [4]

Στο σχήμα 2.9 φαίνεται ο μηχανισμός δημιουργίας απόληξης εξόδου κατά τη διάτρηση, όπως αυτή προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία και αποτυπώθηκε με κάμερα υψηλής ταχύτητας από τον Guo et al. [4].

### 2.1.6 Μέτρηση της Απόληξης Διάτρησης

Η απόληξη διάτρησης έχει ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Προκειμένου να προσδιορισθεί το αν οι διαστάσεις αυτών των χαρακτηριστικών βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια των ανοχών που προσδιορίζονται από τη λειτουργία για την οποία προορίζεται το κομμάτι, πρέπει να μετρηθούν. Ένας ακόμη λόγος είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων και συνθηκών της διάτρησης στις διαστάσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των απολήξεων. Έτσι για κάθε πείραμα με δεδομένες συνθήκες, οι διαστάσεις αυτές είναι αναγκαίο να μετρώνται. Η επιλογή της μεθόδου μέτρησης εξαρτάται από τις συνθήκες μέτρησης, την επιθυμητή ακρίβεια στο αποτέλεσμα αλλά και από το ποιο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης πρέπει να μετρηθεί [5].

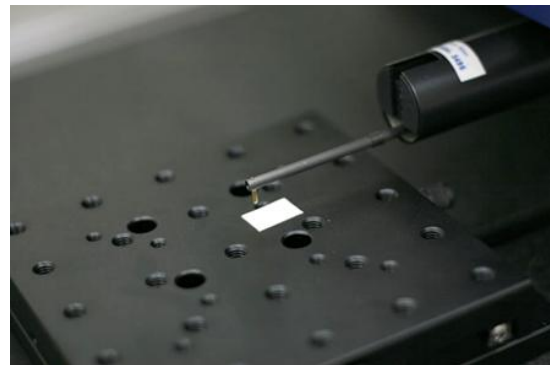
Οι διάφορες κατηγορίες μεθόδων μέτρησης, είναι:

- Μονοδιάστατες-δι-τριδιάστατες
- Καταστροφικές ή μη
- Με ή χωρίς επαφή
- Κατά τη διαδικασία ή εκτός διαδικασίας

Βασικές μέθοδοι μέτρησης του μεγέθους της απόληξης:

- **Οπτικές Μέθοδοι:** Κάμερες, Οπτικά Μικροσκόπια, Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια (SEM), Laser, Ιντερφερόμετρα, Επεξεργασία εικόνας (CCD camera).
- **Μέθοδοι με επαφή:** Πιο διαδεδομένη μέθοδος ο στυλίσκος, ο οποίος μπορεί να δώσει πληροφορίες μόνο για το ύψος της απόληξης. Σε μη ομοιόμορφες απολήξεις απαιτούνται πολλές μετρήσεις. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι μπορεί η επαφή να καταστρέψει είτε την απόληξη ή το στυλίσκο
- **Θερμογραφικές:** Θερμικές κάμερες.
- **Καταστροφικές:** Μεταλλογραφικές τομές. Αξιόπιστες μέθοδοι, δίνουν πληροφορίες για όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης. Στα

αρνητικά των μεθόδων συγκαταλέγονται ότι απαιτεί χρονοβόρα προετοιμασία και η μέτρηση γίνεται κάθε φορά σε ένα μόνο σημείο [5].



Σχήμα 2.10: Προφیلόμετρο στυλίσκου



Σχήμα 2.11: Οπτικό στερεο-μικροσκόπιο

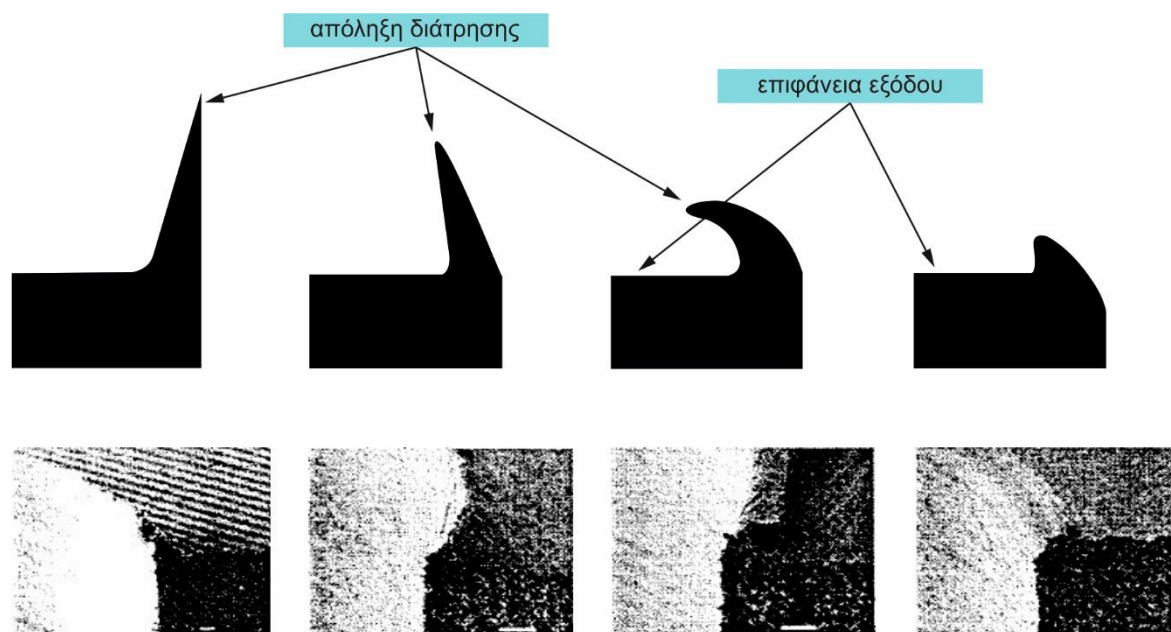


Οι **Franke et al.** [5] παρουσίασαν ένα πείραμα σύγκρισης έξι διαφορετικών μεθόδων μέτρησης. Στην έρευνα συμμετείχαν επτά διαφορετικά πανεπιστημιακά ιδρύματα καθένα από τα οποία εφάρμοσε μία μη καταστροφική μέθοδο μέτρησης της απόληξης ώστε να καλυφθούν όλες και τέλος εφαρμόστηκε η μέθοδος των μεταλλογραφικών τομών. Τα κομμάτια που διατρήθηκαν για το σκοπό της έρευνας ήταν δύο κομμάτια χάλυβα AISI4140H, με ελικοειδές τρυπάνι καρβιδίου ( $\varnothing 6\text{mm}$  και  $\varnothing 8\text{mm}$ ) με δύο διαφορετικούς συνδυασμούς ταχύτητας κοπής και πρόωσης. Στα δύο τεμάχια διατρήθηκαν οπές με επιφάνειες εξόδου κλίσεων  $90^\circ$  και  $60^\circ$ .

## 2.2 Πειραματικές μελέτες του σχηματισμού απόληξης διάτρησης

Λόγω της πολυπλοκότητάς της, η ακριβής μοντελοποίηση της κατεργασίας διάτρησης και ειδικά της δημιουργίας του αποβλίττου και της απόληξης έχει αυξημένο βαθμό δυσκολίας. Για το λόγο αυτό οι περισσότερες μελέτες έχουν βασιστεί σε πειραματική διερεύνηση των παραπάνω φαινομένων. Τα πειράματα εφαρμόζονται με μεταβλητές παραμέτρους κοπής, μεταβλητές γεωμετρίες και υλικά τρυπανιών αλλά και κατεργαζόμενων κομματιών και οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στην εύρεση της επίδρασης όλων των παραπάνω παραμέτρων στο μέγεθος και σχήμα της παραγόμενης απόληξης με απώτερο στόχο τη βελτιστοποίηση και ελαχιστοποίησή της.

Οι **Dornfeld et al.** [6] έκαναν πειράματα ξηρής διάτρησης και διάτρησης με ψυκτικό υγρό σε πλάκες κράματος Ti-6Al-4V με τρυπάνια καρβιδίου και HSS-Co διπλής και τριπλής αυλάκωσης για να διερευνήσουν την επίδραση της γεωμετρίας του τρυπανιού και των συνθηκών κοπής στο σχηματισμό της απόληξης στην επιφάνεια εξόδου του τρυπανιού από το κομμάτι. Κατά την ξηρή διάτρηση παρατηρήθηκε ο σχηματισμός τεσσάρων τύπων ομοιόμορφης απόληξης, όπως παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.12](#), οι τρεις από τους οποίους παρουσίασαν επιπλέον πλαστική παραμόρφωση μετά τη δημιουργία τους, στα πειράματα όπου εφαρμόστηκαν υψηλές προώσεις και ταχύτητες.



Σχήμα 2.12: Τέσσερις τύποι απολήξεων σε πειράματα ξηρής διάτρησης σύμφωνα με τον Dornfeld et al. [6]

Όλοι οι τύποι απόληξης περιελάμβαναν τη δημιουργία του χαρακτηριστικού καπακιού το οποίο όμως τις περισσότερες φορές αποχωρίστηκε. Ο πρώτος τύπος ομοιόμορφης απόληξης μετρήθηκε με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου όπου εντοπίστηκε μικρότερο ύψος και πάχος βάσης των απολήξεων που είχαν προκύψει από τα τρυπάνια τριπλής σε σχέση με τα διπλής αυλάκωσης. Αναφορικά με τα πειράματα διάτρησης με τη χρήση ψυκτικού υγρού, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13, παρατηρήθηκε η δημιουργία τριών τύπων απόληξης: με δαχτυλίδι, ομοιόμορφης χωρίς καπάκι και με καπάκι, με την τελευταία να παρατηρείται στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε χαμηλότερη πρόωση. Η απόληξη με δαχτυλίδι είναι ουσιαστικά μια ενδιάμεση μορφή ανάμεσα στην ομοιόμορφη και την ομοιόμορφη με καπάκι.



Σχήμα 2.13: Τρεις τύποι απολήξεων στα πειράματα διάτρησης με ψυκτικό υγρό σύμφωνα με τον Dornfeld et al. [6]











Αντίθετα με την ξηρή, στην υγρή διάτρηση δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση της απόληξης μετά τη δημιουργία της, λόγω καλύτερης απαγωγής της θερμότητας από το υλικό μέσω του ψυκτικού υγρού. Η ταχύτητα πρόωσης και περιστροφής δεν εντοπίστηκαν να έχουν σημαντική επίδραση στο φαινόμενο, διότι το εύρος τιμών τους ήταν μικρό και μέσα στις βέλτιστες συνθήκες για το συγκεκριμένο συνδυασμό υλικών. Μείωση του ύψους και πάχους της απόληξης παρατηρήθηκε για τρυπάνια με μεγαλύτερη γωνία κορυφής και μικρότερη γωνία ελίκωσης. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι τα τρυπάνια με ελικοειδή κορυφή (helical point drills) μειώνουν το ύψος και πάχος της απόληξης κατά 51% και 20% αντίστοιχα σε σχέση με τα τρυπάνια με διαιρετή κορυφή (split point drills). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι συνθήκες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

	Ξηρή διάτρηση		Διάτρηση με ψυκτικό
Κατεργαζόμενο υλικό	Ti-6Al-4V- 125x100x6mm		
Τύπος τρυπανιού	HSS-Co, Ø6,35mm		HSS-Co, Carbide Ø10mm
Γωνία κορυφής	2 flutes 118°	3 flutes 150°	118°,130°,135°
Γωνία ελίκωσης	25°	25°	30°,35°
Ταχύτητα κοπής	36.6, 42.7 [mm/min]		6, 7, 8, 9, 10 [m/min] (0.12mm/rev)
Πρόωση	0.0254, 0.0508, 0.0762 [mm/rev]		0.04 → 0.2 / 0.04 (8m/min)

Πίνακας 2.1: Συνθήκες πειραματικής διαδικασίας διάτρησης, Dornfeld [6]

**Οι Κο και Chang [7]** στην εργασία τους μελέτησαν την επίδραση της γεωμετρίας και του υλικού του εργαλείου διάτρησης στο σχηματισμό απόληξης εξόδου καθώς και τη δυνατότητα ελαχιστοποίησής της. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποίησαν πειράματα ξηρής διάτρησης με σταθερή ταχύτητα και μεταβαλλόμενη πρόωση χρησιμοποιώντας τρυπάνια πέντε διαφορετικών γεωμετριών, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.14:

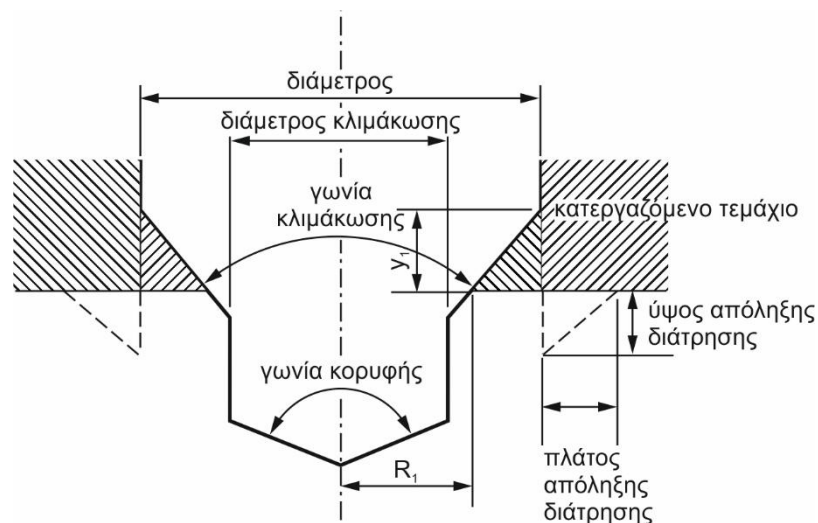
- συμβατικό ελικοειδές τρυπάνι HSS,
- ελικοειδές τρυπάνι καρβιδίου (carbide drill) ,
- τρυπάνι με λοξοτόμηση (chamfer drill),
- τρυπάνι με στρογγυλή διαμόρφωση (round drill) και
- κλιμακωτό τρυπάνι (step drill).

Τύπος	Γεωμετρία	Κορυφή
HSS		
Καρβιδίου		
Με λοξοτόμηση		
Σφαιρικό		
Κλιμακωτό		

Σχήμα 2.14: Εναλλακτικές γεωμετρίες εργαλείων διάτρησης, Ko και Chang [7]

Για το τρυπάνι με λοξοτόμηση παρατηρήθηκε ότι παράγει απόληξη μικρότερου ύψους σε σχέση με τα συμβατικά τρυπάνια, καθώς και ότι όσο αυξάνεται η γωνία της λοξοτόμησης, αυξάνεται και το ύψος της απόληξης (λόγω μικρότερης δυσκαμψίας του εναπομείναντος ακατέργαστου υλικού). Το τρυπάνι με στρογγυλή διαμόρφωση επίσης βελτίωσε το ύψος της απόληξης εξόδου σε σχέση με τα συμβατικά. Καλύτερα αποτελέσματα από όλα τα τρυπάνια έδωσαν τα κλιμακωτά, υποδεικνύοντας ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της απόληξης διάτρησης, γι' αυτό η χρήση τους διερευνήθηκε και σε επόμενα πειράματα. Χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια διαφορετικής γωνίας κλιμάκωσης (step angle) για τη μελέτη της επίδρασης και αυτής της παραμέτρου.

Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός κλιμακωτού τρυπανιού. Αποδείχθηκε ότι για μεγάλες γωνίες κλιμάκωσης ( $100^\circ$ ,  $130^\circ$ ) παράγεται σχεδόν ίδιου μεγέθους απόληξη με τα συμβατικά. Όταν όμως η γωνία κλιμάκωσης κατεβαίνει κάτω από ένα όριο, περίπου στις  $75^\circ$ , η απόληξη ελαχιστοποιείται (λόγω μεγαλύτερης δυσκαμψίας του ακατέργαστου υλικού). Τέλος, στα πλαίσια της παραπάνω πειραματικής διερεύνησης εξετάστηκε η αλληλεπίδραση κατεργαζόμενου υλικού - τρυπανιού μέσω της διάτρησης διάφορων υλικών με όλα τα προαναφερθέντα τρυπάνια.



Σχήμα 2.15: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κλιμακωτού τρυπανιού, Ko και Chang [7]

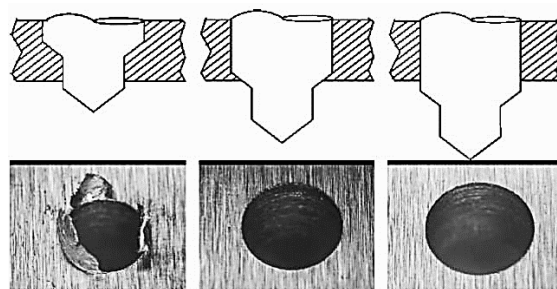
Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι χάλυβες SM45C και SS200 και τα αλουμίνια Al6061, Al2024 και προσδιορίστηκε η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων τους στη δημιουργία της απόληξης καθώς και η βέλτιστη επιλογή γεωμετρίας τρυπανιού για το κάθε υλικό.

Ο **Kilickap** [8] διερεύνησε την επίδραση των παραμέτρων κοπής (ταχύτητα και πρόωση) και της γωνίας κορυφής του τρυπανιού στο ύψος της απόληξης και την τραχύτητα της επιφάνειας σε διάτρηση κράματος Al 7075 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi και πραγματοποιώντας Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) για τον προσδιορισμό της επίδρασης και κρισιμότητας του κάθε παράγοντα (παραμέτρου) αλλά και τη σύνδεσή του με το ύψος της απόληξης. Έτσι προσδιορίστηκε η σχέση που συνδέει τις προαναφερθείσες εισόδους και εξόδους καθώς και ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων για μείωση του ύψους της απόληξης που ποιοτικά ήταν η χαμηλή πρόωση και ταχύτητα κοπής και μεγάλη γωνία κορυφής. Όπως προέκυψε από την ανάλυση διακύμανσης, η πρόωση και η γωνία κορυφής επιδρούν στο ύψος της απόληξης κατά 30%, ενώ η ταχύτητα κοπής αντίστοιχα κατά 15%.

Κατεργαζόμενο υλικό	Al 7075 (150x100x3mm)
Τύπος τρυπανιού	HSS Ø5mm
Γωνία κορυφής τρυπανιού	90° , 118° , 135°
Ψυκτικό υγρό	Ξηρή διάτρηση
Ταχύτητα κοπής	$v_c = 4, 12, 20$ [m/min]
Πρόωση	$f_z = 0.1, 0.2, 0.3$ [mm/rev]
Μετρήσεις	Οπτικό Μικροσκόπιο Τέσσερις μετρήσεις ανά 90° σε κάθε οπή

Πίνακας 2.2: Πειραματικές συνθήκες, Kilickap [8]

Οι **Ko et al.** [9] διερεύνησαν τη χρήση κλιμακωτού τρυπανιού (step drill) για την ελαχιστοποίηση της απόληξης εξόδου. Το κλιμακωτό τρυπάνι χωρίζει την κατεργασία διάτρησης σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη συμβατική διάτρηση οπής μικρότερης διαμέτρου από την επιθυμητή. Σε αυτό το στάδιο δημιουργείται απόληξη η οποία διαφέρει σε μορφή και μέγεθος ανάλογα με τις συνθήκες, τη γωνία κορυφής κ.λπ. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη διάτρηση του υπολοιπούμενου ακατέργαστου υλικού και τη διάνοιξη της οπής στην επιθυμητή διάμετρο. Στο δεύτερο στάδιο, απομακρύνεται το υλικό που έχει παραμείνει και μένει στην περιφέρεια της οπής πολύ μικρότερη και πιο ομοιόμορφη απόληξη.



Σχήμα 2.16: Στάδια διάτρησης με κλιμακωτό τρυπάνι και χαρακτηριστικές απολήξεις κατά τους Ko et al. [9]

Το μέγεθος και σχήμα αυτής της τελικής απόληξης εξαρτάται κατά πολύ από τη γωνία κλιμάκωσης ( $\theta_2$ ) και το μέγεθος κλιμάκωσης  $(D_1 - D_2)/2$  (step angle, step size). Στα πλαίσια της



μελέτης, έγιναν πειράματα σύγκρισης των δύο τύπων τρυπανιών (συμβατικού και κλιμακωτού) με μεταβαλλόμενη πρόωση, προκειμένου να ενσωματωθεί και η συμπεριφορά των τρυπανιών σε διαφορετικές προώσεις. Επιβεβαιώθηκε ότι τα κλιμακωτά τρυπάνια παράγουν πολύ μικρότερη απόληξη εξόδου και μόνο ομοιόμορφη, χωρίς το χαρακτηριστικό καπάκι εκτός από την περίπτωση της εφαρμογής μέγιστης πρόωσης.



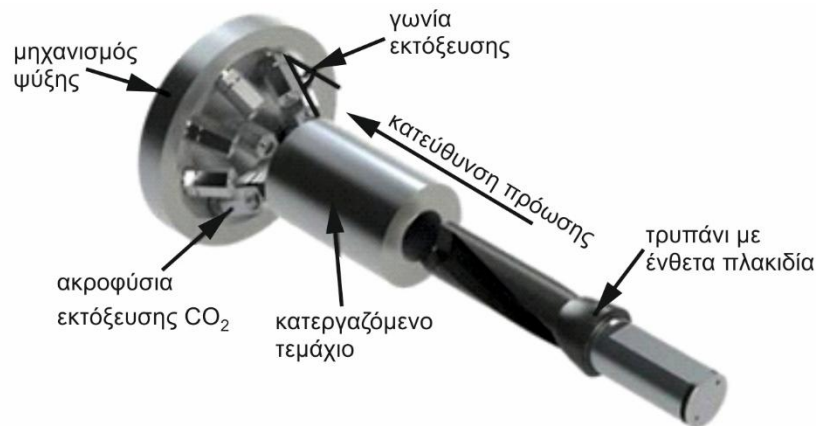
Σχήμα 2.17: Γεωμετρία κλιμακωτού εργαλείου διάτρησης (step drill), Ko et al. [9]

Επιπλέον έγινε σύγκριση διάφορων κλιμακωτών τρυπανιών, που έδειξε ότι η γωνία κλιμάκωσης έχει μεγάλη επίδραση στην ανάπτυξη της απόληξης. Συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η γωνία κλιμάκωσης, τόσο μικρότερη σε μέγεθος και η απόληξη διάτρησης. Η εξήγηση για αυτό βρίσκεται στο ότι όταν η διάτρηση γίνεται με μικρή γωνία κλιμάκωσης το υπολοιπόμένο ακατέργαστο υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία, επιτρέποντας την κοπή και αποτρέποντας την παραμόρφωσή του - σε ένα βαθμό - μέχρι το τέλος της διάτρησης. Αντίθετα, το μέγεθος κλιμάκωσης βρέθηκε ότι δεν έχει μεγάλη επίδραση παρά μόνο σε μεγάλες γωνίες κλιμάκωσης. Τέλος, έγινε μία μελέτη περίπτωσης διάτρησης εγκάρσιων οπών ενός άξονα συστήματος διεύθυνσης που επιβεβαίωσε όλα τα παραπάνω.

### 2.2.1 Μείωση της θερμότητας στην περιοχή σχηματισμού της απόληξης

Λόγω του ότι η διάτρηση είναι μία κλειστή διαδικασία όπου το εργαλείο περικλείεται εξ' ολοκλήρου από το τεμάχιο, η θερμότητα δύσκολα διαχέεται σε αυτό και έτσι σε πολλές μελέτες θεωρείται αδιαβατική ή ψευδο-αδιαβατική διαδικασία. Για τον ίδιο λόγο, η θερμότητα δεν απάγεται επαρκώς από το ψυκτικό υγρό το οποίο φτάνει σε πολύ μικρό βαθμό ή καθόλου στην περιοχή της διάτρησης, λόγω της συνεχούς πλήρωσης των αυλακώσεων του τρυπανιού με απόβλιπτο. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στη διαδικασία σχηματισμού της απόληξης διάτρησης αφού η θερμότητα συγκεντρώνεται στην απόληξη πριν ή κατά τη δημιουργία της, επιδρώντας στις θερμοεξαρτώμενες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, μειώνοντας τοπικά το όριο πλαστικής διαρροής και επιταχύνοντας την εκκίνηση της πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί το υλικό το οποίο υπόκειται σε αυτήν και να αυξηθούν οι διαστάσεις της απόληξης. Η συγκέντρωση της θερμότητας όμως στην περιοχή της κοπής επηρεάζει και έμμεσα την απόληξη διάτρησης λόγω της φθοράς του εργαλείου που δέχεται μεγάλα ποσά αυτής της θερμότητας. Όσο αυξάνει η φθορά του εργαλείου διάτρησης, δεν υπάρχει ικανοποιητική δημιουργία αποβλίπτου και μειώνεται η ποιότητα της κατεργασίας από την άποψη ότι το τρυπάνι δυσκολεύεται ακόμα περισσότερο να κόψει το υλικό και απλά το ωθεί.

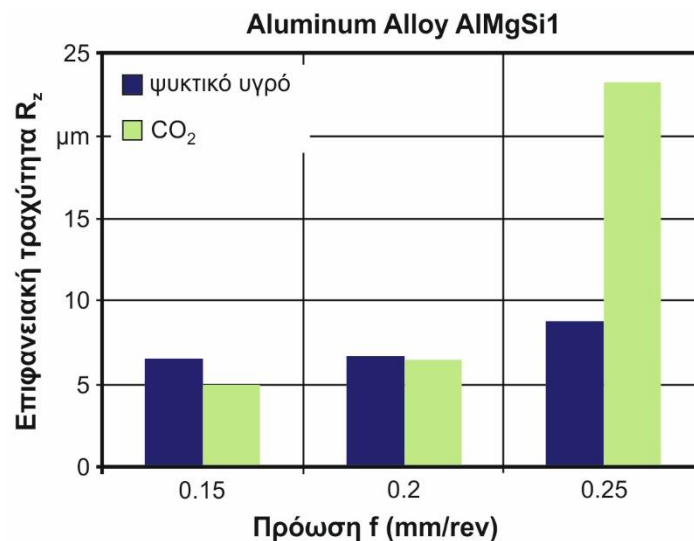
Οι **Biermann και Hartmann** [10] πραγματοποίησαν πειράματα διάτρησης χάλυβα 34CrNiMo6 και αλουμινίου AlMgSi1 για τη μελέτη σχηματισμού της απόληξης διάτρησης και εφαρμογή της μεθόδου κρυογενικής ψύξης με CO<sub>2</sub> στην επιφάνεια εξόδου και συγκεκριμένα στην περιοχή διαμόρφωσης της απόληξης. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.18. Η ψυκτική ικανότητα του CO<sub>2</sub> εξηγείται από το φαινόμενο Joule-Thomson που περιγράφει την ψύξη ενός αερίου όταν εκτονώνεται.



Σχήμα 2.18: Κρυογενικό σύστημα εκτόξευσης CO<sub>2</sub> από τους Biermann και Hartmann [10]

Διερευνήθηκε η επίδραση της μεθόδου στο ύψος της απόληξης μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων με δεδομένα που προέκυψαν από πειράματα ξηρής και συμβατικής υγρής διάτρησης. Παράλληλα μελετήθηκε και η επίδραση του ρυθμού ροής του CO<sub>2</sub> καθώς και της γωνίας εκτόξευσής του. Από τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε πως ο μικρότερος ρυθμός ροής του CO<sub>2</sub> δίνει σχετικά καλύτερα αποτελέσματα αντίθετα με τη μεταβολή της γωνίας εκτόξευσης η οποία δεν είχε κάποια σταθερή επίδραση στη διαμόρφωση της απόληξης

Από τη σύγκριση της ξηρής με τη συμβατική υγρή και τη διάτρηση με κρυογενική ψύξη της εξόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19, προέκυψε ότι και για τα δύο υλικά που εξετάστηκαν η ξηρή διάτρηση παρήγαγε, όπως ήταν αναμενόμενο, πολύ μεγαλύτερες απολήξεις εξόδου ενώ στα αποτελέσματα της συμβατικής υγρής με τη διάτρηση με κρυογενική ψύξη παρατηρήθηκαν μικρότερες αποκλίσεις. Στα 2/3 των περιπτώσεων (διαφορετικής πρόωσης) η διάτρηση με κρυογενική ψύξη παρήγαγε ελαφρώς μικρότερες απολήξεις από τη συμβατική.



Σχήμα 2.19: Σύγκριση ύψους απόληξης σε συμβατική υγρή και διάτρηση με κρυογενική ψύξη κατά τους Biermann και Hartmann [10]

Οι **Pilny et al.** [11] έκαναν μία πειραματική διερεύνηση της δημιουργίας απόληξης εξόδου σε διάτρηση φύλλων αλουμινίου Al99.7Mg0.5Cu-H24 (50x50x2mm) με μεταβλητές συνθήκες (πρόωση, ταχύτητα), μεταβλητή γεωμετρία εργαλείου καθώς και τρόπο συγκράτησης

του κομματιού. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα αξιολόγησης της επίδρασης των παραπάνω παραμέτρων, μετέπειτα κατασκευάστηκε σύστημα συγκράτησης του κομματιού για την ελαχιστοποίηση της απόληξης εξόδου και διερευνήθηκε η επίδρασή του και τέλος προσδιορίστηκε η επίδραση της γεωμετρίας του τρυπανιού. Παρατηρήθηκε μείωση του ύψους και πάχους της απόληξης με αύξηση της ταχύτητας κοπής και αύξησή τους με αύξηση της πρόωσης. Γενικά οι μεταβολές στο μέγεθος της απόληξης μειώθηκαν με μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής, πράγμα που δείχνει ότι η κατεργασία ήταν πιο σταθερή. Η εφαρμογή του νέου συστήματος συγκράτησης (σύστημα αναρρόφησης και στεγανωτικά δαχτυλίδια) επέφερε τη μείωση της απόληξης εξόδου κατά 50%. Μάλιστα, όσο αυξανόταν η πρόωση η μείωση αυτή γινόταν εντονότερη.

<b>Μετρήσεις</b>	CCD Camera, Πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο	Ύψος Απόληξης	Τριδιάστατο μικροσκόπιο
		Πάχος απόληξης	Οπτικός μετρητής συντεταγμένων

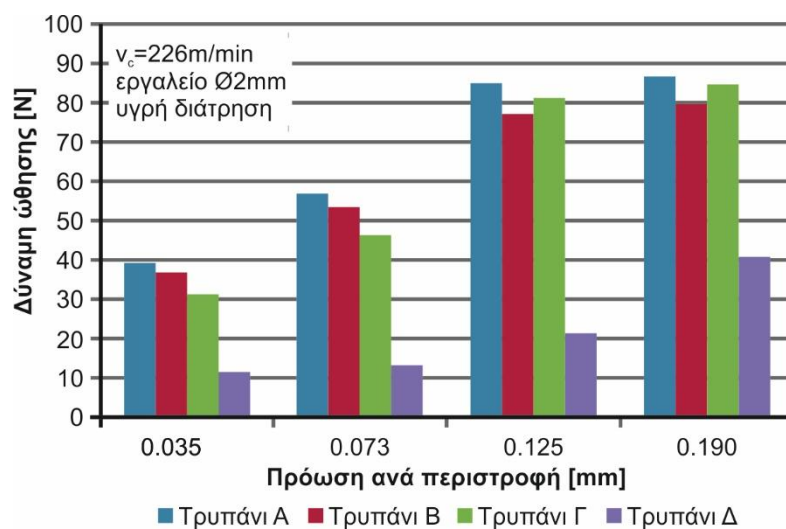
Πίνακας 2.3: Τρόπος μέτρησης, Pilny et al [11]

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της γεωμετρίας του εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια τεσσάρων διαφορετικών γεωμετριών, όλα διαμέτρου Ø2mm, διαφορετικών υλικών και επικαλύψεων. Στον πίνακα 2.4 φαίνεται η γεωμετρία των τεσσάρων εργαλείων.

Τρυπάνι	Αυλάκωση	Υλικό/επικάλυψη	Γωνία κορυφής	Γωνία ελίκωσης
A	διπλή	carbide/χωρίς	140 / λοξοτόμηση	30
B	διπλή	carbide/TiAlN	140	30
Γ	διπλή	carbide/χωρίς	140	30
Δ	τριπλή	carbide alloy/επικάλυψη	140	30

Πίνακας 2.4: Γεωμετρία εργαλείων, Pilny et al [11]

Εφαρμόστηκαν είκοσι διαφορετικοί συνδυασμοί των συνθηκών κοπής και διατρήθηκαν 4400 οπές από κάθε τρυπάνι. Η ταχύτητα κοπής ήταν 226m/min και εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές προώσεις (0.035 → 0.190mm/rev). Διαπιστώθηκε ότι με το τρυπάνι Δ (το μόνο τριπλής αυλάκωσης) παρατηρήθηκαν οι μικρότερες δυνάμεις ώθησης σε όλες τις προώσεις με πολύ μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα τρυπάνια. Στο σχήμα 2.20 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της μεταβολής της δύναμης ώθησης συναρτήσει της πρόωσης για τις τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες τρυπανιών.



Σχήμα 2.20: Μεταβολή δύναμης ώθησης συναρτήσει της πρόωσης και της γεωμετρίας και υλικού του τρυπανιού κατά τους Pilny et al. [11]

### 2.2.2 Διάτρηση σύνθετων υλικών

Η διάτρηση σύνθετων υλικών πρέπει να μελετάται ξεχωριστά λόγω του ότι τα σύνθετα υλικά είναι ετερογενή ανισοτροπικά υλικά και συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα μέταλλα κατά την κατεργασία τους. Έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται περισσότερο η θερμοκρασία στην περιοχή της διάτρησης (λόγω του εγκλωβισμού της θερμότητας και μη – διάχυσής της). Επιπλέον παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων με κίνδυνο τη δημιουργία ρωγμών και τελικά την αστοχία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάτρηση σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας (MMC-Metal Matrix Composites), λόγω των προοπτικών χρήσης τους στην αυτοκινητική και αεροδιαστημική βιομηχανία [36].

Οι **P. Shanmunghasundaram και R. Subramanian** [12] διερεύνησαν την επίδραση της γεωμετρίας του κλιμακωτού τρυπανιού (γωνία και μέγεθος κλιμάκωσης) και των παραμέτρων κοπής (πρόωση, ταχύτητα περιστροφής), στη διαμόρφωση απόληξης διάτρησης συνθετικού κράματος αλουμινίου πυριτίου (Al-Si) – γραφίτη (Gr). Στη συνέχεια και με βάση τα πειραματικά δεδομένα εφαρμόστηκε η μέθοδος Taguchi για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων καθώς και ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για τη διερεύνηση της επίδρασης στο ύψος της απόληξης.

Κατεργαζόμενο υλικό	Al-Si Gr (50x40x25 mm)	
Τύπος τρυπανιού	Multi-faceted carbide Ø 6 mm	
Γωνία κορυφής τρυπανιού	118°	
Γωνία κλιμάκωσης	40°, 70°, 130°	
Μέγεθος κλιμάκωσης	0.5, 1, 1.5 [mm]	
Ψυκτικό υγρό	Ξηρή διάτρηση	
Ταχύτητα περιστροφής	n=600, 852, 1100 [rpm]	
Πρόωση	f <sub>z</sub> = 0.06, 0.08, 0.1 [mm/rev]	
Μετρήσεις	Ύψος απόληξης	Στυλίσκος. Μέτρηση σε 4 θέσεις/90°
	Δύναμη ώθησης	Δυναμόμετρο

Πίνακας 2.5: Πειραματικές συνθήκες, P. Shanmunghasundaram και R. Subramanian [12]



Αφού ολοκληρώθηκε το μοντέλο, έγιναν πειράματα επαλήθευσής του. Σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης, οι παράγοντες επιδρούν στην απόληξη διάτρησης με την παρακάτω σειρά ξεκινώντας από το σημαντικότερο: 1. Πρόωση, 2. Γωνία κλιμάκωσης, 3. Μέγεθος κλιμάκωσης, 4. Ταχύτητα περιστροφής.

Τέλος, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (multiple linear regression) το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την εύρεση μιας εξίσωσης παλινδρόμησης που δίνει το ύψος της απόληξης συναρτήσει των παραμέτρων.

$$H = -0.390 + 9.25(A) + 0.000503(B) + 0.00357(C) + 0.0056(D)$$

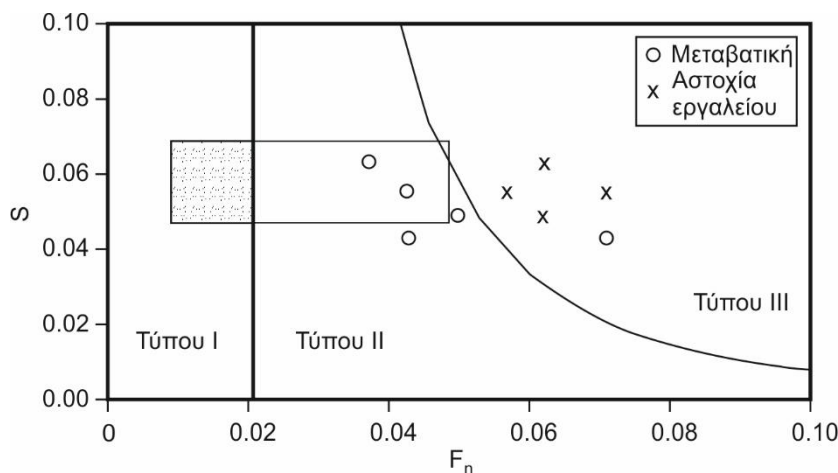
όπου  $H$ : ύψος απόληξης εξόδου,  $A$ : πρόωση,  $B$ : ταχ. περιστροφής,  $C$ : γωνία κλιμάκωσης,  $D$ : μέγεθος κλιμάκωσης [28].

Οι συντελεστές όλων των παραμέτρων είναι θετικοί, άρα το ύψος της απόληξης αυξάνει με αύξηση όλων των παραμέτρων. Μεγαλύτερο συντελεστή έχει η παράμετρος της πρόωσης επομένως έχει και τη μεγαλύτερη επίδραση στην τιμή με μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες. Σε σχέση με την ακρίβεια του μοντέλου, οι υπολογισμένες τιμές της απόληξης βρέθηκαν να ταυτίζονται με τις μετρημένες πειραματικές με σφάλμα  $\pm 2\%$ .

### 2.3 Διαγράμματα ελέγχου της απόληξης διάτρησης (Drilling Burr Control Charts)

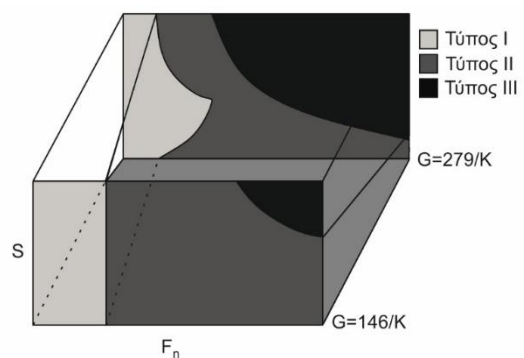
Οι Kim et al. [3] ανέπτυξαν διαγράμματα ελέγχου της απόληξης διάτρησης (σχήμα 2.21) χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από πειράματα διάτρησης AISI 304L και AISI 4118, τα οποία δίνουν τη σχέση των παραμέτρων της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής με τους διαφορετικούς τύπους απόληξης (Μικρή Τύπου I, μεγάλη ομοιόμορφη Τύπου II, απόληξη τύπου "Crown" Τύπου III) που παρατηρήθηκαν στα πειράματα. Διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα κοπής (παράμετρος  $S$ ) επηρεάζει το σχηματισμό της απόληξης μόνο όταν εφαρμόζεται μεγάλη πρόωση (παράμετρος  $F_n$ ). Στις υψηλότερες ταχύτητες κοπής ο βασικότερος παράγοντας που επιδρά στο σχήμα και το μέγεθος της απόληξης είναι η φθορά του εργαλείου, ενώ στις χαμηλές ταχύτητες, η δύναμη ώθησης.

Η μετάβαση από την ομοιόμορφη στην απόληξη τύπου "crown" παρουσιάζεται σε χαμηλές και υψηλές προώσεις στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Το ύψος της απόληξης αυξάνεται πολύ με αύξηση της πρόωσης. Η φθορά του εργαλείου επιδρά πιο πολύ στην περίπτωση διάτρησης του 304L λόγω του ότι είναι πιο δύσκολο κατεργάσιμο υλικό, ενώ και το ύψος και το πάχος της απόληξης βρέθηκε ότι είναι ανεξάρτητα της διαμέτρου του τρυπανιού. Τέλος, τα διαγράμματα δίνουν τη δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων συνθηκών ώστε να προκύπτει η επιθυμητή σε μορφή και μέγεθος απόληξη.



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης για τα πειράματα διάτρησης AISI 4118 από τον Kim et al. [3]

Οι **C. Reich-Weiser** και **D. Dornfeld** [13] διερεύνησαν τη δυνατότητα προσθήκης ενός τρίτου άξονα υλικών στα διαγράμματα ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22, ώστε να ενσωματωθεί η επίδραση των θερμοεξαρτώμενων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών στο σχήμα και μέγεθος των απολήξεων, με τη χρήση μιας παραμέτρου που αναφέρεται στην ολκιμότητα του υλικού και τη σύνδεσή της με τις μεταβολές των ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.22: Προσθήκη άξονα υλικών στο Διάγραμμα ελέγχου απόληξης διάτρησης από τους C. Reich-Weiser και D. Dornfeld [13]

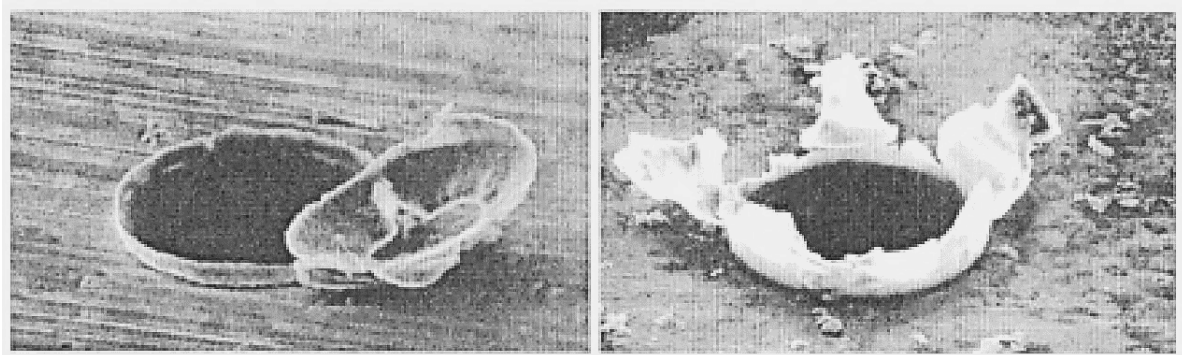
## 2.4 Σχηματισμός απόληξης σε κατεργασίες διάτρησης σε μικροκλίμακα

Ιδιαίτερης σημασίας είναι οι απολήξεις οι οποίες προκύπτουν σε κατεργασίες μικρο-διάτρησης των υλικών. Ο λόγος είναι ότι οι συγκεκριμένες απολήξεις είναι εξαιρετικά δύσκολο να αφαιρεθούν ακόμα περισσότερο δε, χωρίς να επηρεαστεί η διαστασιακή ακεραιότητα της περιφέρειας της οπής και του κατεργαζόμενου κομματιού σε εκείνη την περιοχή. Η απομάκρυνσή τους είναι δε σχεδόν αδύνατη όταν γίνεται χειροκίνητα. Επιπροσθέτως, αυτού του τύπου οι οπές γίνονται πολλές φορές σε διάτρηση κομματιών πολύπλοκων γεωμετριών, διασταυρούμενων οπών, όπου η προσβασιμότητα για οποιοδήποτε εργαλείο αφαίρεσης είναι απαγορευτικά περιορισμένη.

Παρ' όλο που υπάρχουν πολλές μελέτες του σχηματισμού απόληξης σε συμβατική διάτρηση, τα δεδομένα και συμπεράσματα από αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή αντιστοιχηθούν σε μικροκλίμακα. Οι μικροκατεργασίες γενικά χαρακτηρίζονται από υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού και μεγάλη γεωμετρική ακρίβεια. Οι παράγοντες που επιδρούν στην κατεργασία αλλάζουν, τα φαινόμενα παραμόρφωσης αναπτύσσονται και εξελίσσονται διαφορετικά σε σχέση με τη συμβατική διάτρηση και ως εκ τούτου ο σχηματισμός απόληξης στη μικροδιάτρηση πρέπει να εξετάζεται μεμονωμένα ως εντελώς ξεχωριστό φαινόμενο. Επιπλέον, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της οπής στη μικροδιάτρηση (<1mm), αυξάνεται

πολύ η επίδραση της δομής του κόκκου του υλικού και οι ιδιότητες του κατεργαζόμενου κομματιού αλλάζουν από ομογενείς και ισοτροπικές σε ανισοτροπικές.

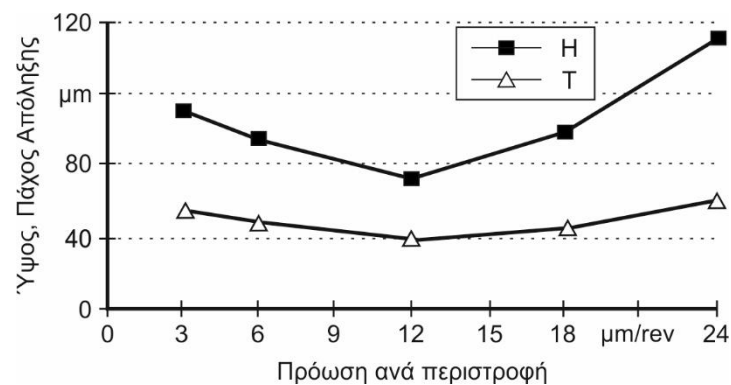
Οι **Lee et al.** [14] πραγματοποίησαν πειράματα διάτρησης σε μικροκλίμακα σε Al6061-T6 με δύο τρυπάνια διαμέτρων  $\varnothing 130\mu\text{m}$  και  $\varnothing 250\mu\text{m}$  προκειμένου να διερευνήσουν την επίδραση των συνθηκών κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής) και της διαμέτρου του τρυπανιού, στο ύψος και το πάχος της απόληξης στην έξοδο του κομματιού. Οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), φωτογραφίες από το οποίο, φαίνονται στο σχήμα 2.23. Παρατηρήθηκε η δημιουργία τριών τύπων απόληξης: I. ομοιόμορφη με καπάκι, II. Μεγάλη ομοιόμορφη με καπάκι και III. Τύπου “crown”. Το τρυπάνι με διάμετρο  $\varnothing 250\mu\text{m}$  παρήγαγε ομοιόμορφες και τύπου “crown” απολήξεις σε χαμηλές και υψηλές προώσεις αντίστοιχα, ενώ το τρυπάνι με  $\varnothing 130\mu\text{m}$  μεταβατικές και τύπου “crown” σε αντίστοιχες προώσεις. Η επίδραση της πρόωσης βρέθηκε ίδια με αυτήν που έχει παρατηρηθεί σε συμβατική διάτρηση. Το ύψος και το πάχος της απόληξης αυξάνουν με την πρόωση. Δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη επίδραση της ταχύτητας, ίσως λόγω του μικρού εύρους τιμών που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 2.23: Απόληξη εξόδου σε λόγο  $f/D=0.00625$ ,  $D=250\mu\text{m}$  (αριστερά) και  $D=130\mu\text{m}$  (δεξιά) σύμφωνα με τους Lee et al. [14]

Με πειράματα που πραγματοποίησαν οι **Stein και Dornfeld** [15] ερευνήθηκε ο σχηματισμός απόληξης σε υγρή μικρο-διάτρηση οπών  $\varnothing 0.91\text{mm}$  σε τεμάχιο ανοξείδωτου χάλυβα SS304L. Τα πειράματα είχαν ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων πρόωσης και ταχύτητας κοπής καθώς και της φθοράς του εργαλείου και της γωνίας εξόδου (exit angle) στο μέγεθος της απόληξης εξόδου. Πραγματοποιήθηκαν 40 πειράματα με διαφορετικούς συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων. Οι μετρήσεις του ύψους και του πάχους της απόληξης έγιναν με οπτικό μικροσκόπιο.

Στα συμπεράσματα που προέκυψαν, συγκαταλέγεται η μεγάλη επίδραση της φθοράς του εργαλείου στο μέγεθος της απόληξης. Επίσης, παρατηρήθηκε μείωση του ύψους με αύξηση της πρόωσης μέχρι μια οριακή τιμή πρόωσης πάνω από την οποία το ύψος αυξήθηκε. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συμβατική διάτρηση όπου στην πλειοψηφία των πειραματικών μελετών έχει διαπιστωθεί συνεχής αύξηση του ύψους της απόληξης με αύξηση της πρόωσης. Αντίθετα με το ύψος, η πρόωση δεν παρατηρήθηκε να έχει μεγάλη επίδραση στο πάχος της απόληξης. Επιπλέον παρατηρήθηκε αύξηση του ύψους με την ταχύτητα κοπής σχεδόν γραμμικά και ελαχιστοποίηση του μεγέθους της απόληξης σε θετικές γωνίες εξόδου. Τέλος, υπολογίστηκαν δύο συντελεστές αναλυτικής πρόβλεψης του μεγέθους της απόληξης συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής. Στο σχήμα 2.24 παρουσιάζεται η επίδραση της πρόωσης στη μεταβολή του ύψους (H) και του πάχους (T) της απόληξης διάτρησης, ενώ στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι πειραματικές συνθήκες.



Σχήμα 2.24: Μεταβολή του ύψους και πάχους της απόληξης με τη μεταβολή της πρόωσης κατά τους Stein και Dornfeld [15]

Κατεργαζόμενο υλικό	SS304L (25x25x3mm)
Τύπος τρυπανιού	HSS-Co Ø0,91mm
Γωνία κορυφής τρυπανιού	135°
Ψυκτικό	Διάτρηση με ψυκτικό
Ταχύτητα περιστροφής	n= 600-3600 rpm (8 τιμές)
Πρόωση	f <sub>z</sub> = 3-24 mm/rev (5 τιμές)
Μετρήσεις	Οπτικό Μικροσκόπιο

Πίνακας 2.6: Πειραματικές συνθήκες, Stein και Dornfeld [15]

Οι **Neugebauer et al.** [16] πραγματοποίησαν επίσης πειράματα συμβατικής και διάτρησης σε μικροκλίμακα διερευνώντας το σχηματισμό απόληξης διάτρησης σε ένα μεγάλο εύρος διαμέτρων (Ø10μm→Ø14mm) και την επίδραση κυρίως της πρόωσης και της ακτίνας κοπτικής ακμής. Κατά το πείραμα συμβατικής διάτρησης έγινε μέτρηση των δυνάμεων κοπής (δύναμη ώθησης, ροπή) με δυναμόμετρο, καταγραφή του μηχανισμού παραμόρφωσης στην έξοδο της διάτρησης με κάμερα υψηλής ταχύτητας καθώς και καταγραφή της κατανομής θερμότητας στην περιοχή σχηματισμού της απόληξης με θερμική κάμερα. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια HSS-E (Ø2mm→Ø14mm).

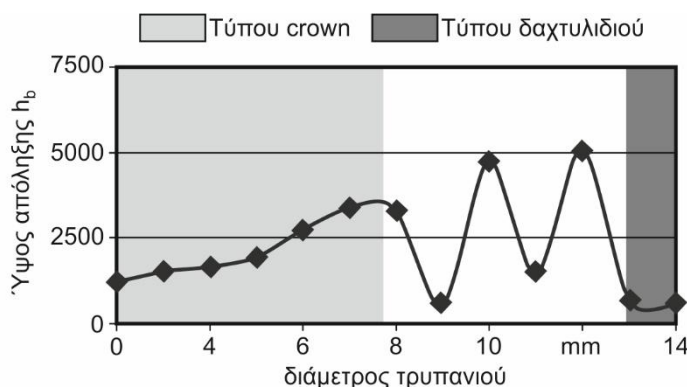
Πείραμα	Συμβατική διάτρηση	Διάτρηση σε μικρο-κλίμακα
Κατεργαζόμενο υλικό	AISI 1045	
Τύπος τρυπανιού	HSS-E Ø 2-14 mm	HSS-E Ø 0,1-1 mm
Μετρήσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οπτικό Μικροσκόπιο</li> <li>- Κάμερα υψηλής ταχύτητας</li> <li>- Δυναμόμετρο</li> <li>- Θερμική κάμερα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)</li> <li>- Μικροδυναμόμετρο</li> <li>- LCD camera</li> </ul>

Πίνακας 2.7: Μέθοδοι μέτρησης, Neugebauer et al. [16]

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα συμβατικής διάτρησης με σταθερή πρόωση (σε σχέση με τη διάμετρο) αλλά και προσαρμοσμένη στη μεταβαλλόμενη κάθε φορά διάμετρο του τρυπανιού.

Η προσαρμογή στη διάμετρο του τρυπανιού ήταν επιβεβλημένη στα πειράματα μικρο-διάτρησης.

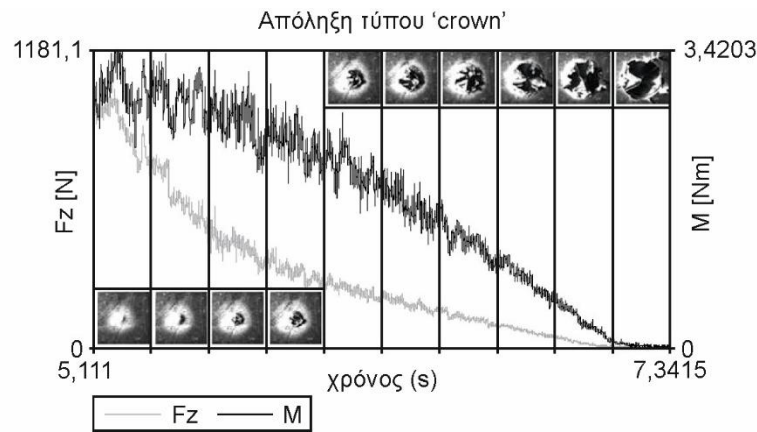
**Προσαρμοζόμενη πρόωση στη διάμετρο του εργαλείου:** Όταν η πρόωση μεταβάλλεται ανεξάρτητα με τη διάμετρο της οπής, το ύψος της απόληξης παρουσιάζει αυξομειώσεις με την αύξηση της διαμέτρου λόγω αλλαγής της απόληξης από τύπου "δαχτυλιδιού" σε τύπου "crown" και το αντίθετο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25. Όταν όμως η πρόωση προσαρμόζεται ανάλογα με τη διάμετρο, το ύψος αυξάνεται συνεχώς.



Σχήμα 2.25: Μεταβολή του ύψους της απόληξης με αύξηση της διαμέτρου του εργαλείου διάτρησης, Neugebauer et al. [16]

**Επίδραση κατανομής θερμοκρασίας:** Διαπιστώθηκε μεγάλη επίδραση της κατανομής θερμοκρασίας στην περιοχή κοπής. Το γεγονός αυτό επηρέασε σε μεγάλο βαθμό το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης, λόγω της μείωσης του ορίου αντοχής του υλικού σε ροή. Κατά τη δημιουργία της απόληξης τύπου "crown" παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το κεντρικό σπάσιμο του *cap* και στη συνέχεια μείωσή της.

Κατά το πείραμα διάτρησης σε μικροκλίμακα με τρυπάνια HSS-E ( $\varnothing 0.1\text{mm} \rightarrow \varnothing 1\text{mm}$ ) χρησιμοποιήθηκε κέντρο μικροκατεργασίας, λόγω της απαίτησης για υψηλή ταχύτητα περιστροφής (40000rpm). Το πάχος του κατεργαζόμενου κομματιού ήταν περιορισμένο και έπρεπε να ισούται το πολύ με το τριπλάσιο της διαμέτρου του τρυπανιού που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Οι δυναμομετρήσεις έγιναν με μικροδυναμόμετρο και χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο υψηλής ακρίβειας με ενσωματωμένη μια LCD κάμερα για την ψηφιακή καταγραφή του σχηματισμού της απόληξης. Παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ειδικές δυνάμεις κοπής από ότι στη συμβατική διάτρηση πιθανά λόγω του ότι οι ιδιότητες του υλικού έγιναν ανισοτροπικές. Με μείωση της διαμέτρου του τρυπανιού διαπιστώθηκε μείωση του ύψους της απόληξης. Στο σχήμα 2.26 παρουσιάζεται η δύναμη ώθησης  $F_z$  καθώς και η ροπή  $M$  όπως καταγράφηκαν με το μικροδυναμόμετρο καθώς και κάποιες χαρακτηριστικές φωτογραφίες της επιφάνειας εξόδου μιας οπής με απόληξη τύπου crown.



Σχήμα 2.26: Συσχετισμός μορφολογίας απόληξης με τη δύναμη ώθησης  $F_z$  και τη ροπή  $M$  στην περίπτωση απόληξης τύπου "crown" κατά τους Neugebauer et al. [16]

## 2.5 Αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης του σχηματισμού απόληξης διάτρησης

### 2.5.1 Αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού - πρόβλεψης δυνάμεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης

Οι **Kim και Dornfeld** [17] ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης όλκιμων υλικών. Στο μοντέλο δε λήφθηκαν υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός παραμόρφωσης και η φθορά του εργαλείου και επιπλέον υποτέθηκε εντελώς πλαστική συμπεριφορά. Το μοντέλο βασίστηκε στην αρχή διατήρησης της ενέργειας ως σταθερό άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την κοπή και της ενέργειας παραμόρφωσης. Ως αποτέλεσμα αυτού προσδιορίστηκαν σχέσεις που υπολογίζουν τη δύναμη ώθησης (thrust force) καθ' όλη τη διάρκεια της διάτρησης καθώς και το ύψος και πάχος της απόληξης εξόδου κατά τη διάτρηση. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν πειράματα διάτρησης AISI 304L και AISI 4118 με τρυπάνια διαιρετής κορυφής (split point drills), τα οποία μετά από δυναμομετρήσεις και μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης, επαλήθευσαν το μοντέλο. Με τη χρήση του μοντέλου διερευνήθηκε η επίδραση της πρόωσης, της γωνίας κορυφής, της γωνίας ελίκωσης καθώς και της διαμέτρου του τρυπανιού (κ.ά.) στο μέγεθος της απόληξης και προέκυψε ότι αύξηση της πρόωσης, της γωνίας κορυφής, της διαμέτρου και μείωση της γωνίας ελίκωσης, αυξάνει το μέγεθος της απόληξης.

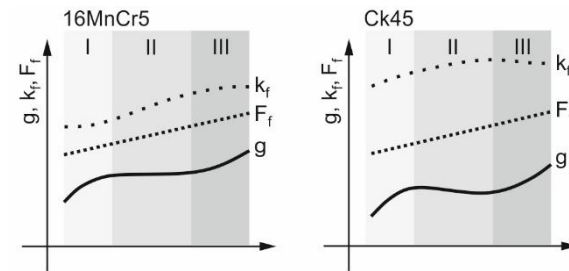
Ένα ακόμη αναλυτικό μοντέλο ανέπτυξαν οι **Heisel et al.** [18] για την πρόβλεψη των διαστάσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της τιμής  $g$  της διάτρησης απόληξης όπως αυτά ορίστηκαν από τον **Schäfer** [2] και παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.1.3. Ο Schäfer συνέδεσε αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα ενοποίησε σε μία κοινή τιμή της διάτρησης απόληξης.

$$g = \frac{4b_f + 2r_f + b_g + h_0}{8}$$

Η πρόβλεψη γίνεται μέσω των ενσωματωμένων στο μοντέλο παραμέτρων της πρόωσης (μέσω της δύναμης ώθησης) και του ορίου διαρροής του υλικού. Η ταχύτητα κοπής δε βρέθηκε να επηρεάζει την τιμή του  $g$  και για τα δύο υλικά που εξετάστηκαν. Τα αποτελέσματα υπολογισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τελικά της τιμής  $g$  επιβεβαιώθηκαν από πειράματα ξηρής διάτρησης 16MnCr5 και Ck45.



Διαπιστώθηκε ότι λόγω αλλαγής του ορίου διαρροής του υλικού με την πρόωση και της σχέσης που πρότεινε ο Link [35]  $g \approx 1/k_f$ , δεν υπάρχει γραμμική σχέση της πρόωσης με την τιμή  $g$  της απόληξης. Στα δύο υλικά που χρησιμοποιήθηκαν εντοπίστηκαν τρεις χαρακτηριστικές περιοχές του εύρους προώσεων που εφαρμόστηκαν. Στο σχήμα 2.27 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή  $k_f$ , της δύναμης ώθησης  $F_f$  και της τιμής  $g$  της απόληξης με αύξηση της πρόωσης.



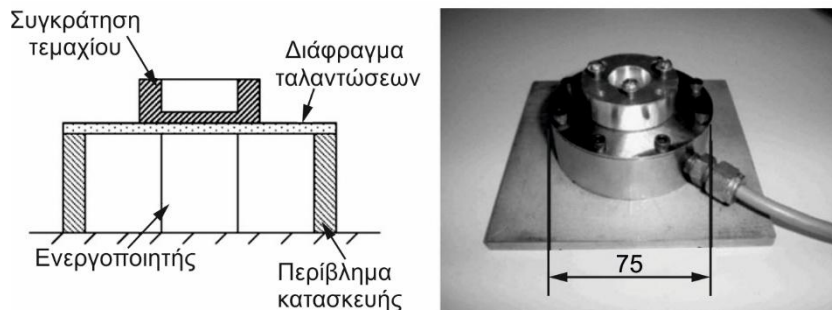
Σχήμα 2.27: Μεταβολή της τιμής  $g$  της απόληξης με αύξηση της πρόωσης κατά τους Heisel et al. [18]

Αναλυτικότερα, για χαμηλές προώσεις υπήρχε αύξηση της δύναμης ώθησης η οποία παρέμεινε για όλο το εύρος των τιμών των προώσεων. Παράλληλα υπήρχε μείωση του συντελεστή  $k_f$ . Και οι δύο αυτοί παράγοντες επέφεραν την αύξηση της τιμής  $g$  της απόληξης. Στην περιοχή των μεσαίων προώσεων υπήρχε αλληλοεξουδετέρωση της επίδρασης αύξησης της πρόωσης και του  $k_f$ , οπότε η τιμή  $g$  της απόληξης παρέμεινε περίπου σταθερή, ενώ στις υψηλές, ομοίως με τις χαμηλές αυξήθηκε. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση ήταν ότι η θερμοκρασία στην περιοχή σχηματισμού της απόληξης μειώθηκε με αύξηση της πρόωσης.

## 2.5.2 Αναλυτικό μοντέλο διάτρησης με παλμική υποβοήθηση (vibration assisted model)

Η παλμική υποβοήθηση βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου στη διάτρηση, δημιουργούνται δονήσεις υψηλής συχνότητας και μικρού εύρους στην κατεύθυνση της πρόωσης, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα μείωσης των δυνάμεων ώθησης και του ύψους της απόληξης διάτρησης. Οι **Chang και Bone** [19] εφάρμοσαν ένα αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης του ύψους της απόληξης εξόδου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση συμβατικής αλλά και παλμικά υποβοηθούμενης διάτρησης. Επιπλέον αναπτύχθηκε μια αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των βέλτιστων παραμέτρων της δόνησης.

Αρχικά μοντελοποιήθηκε ο υπολογισμός των δυνάμεων ώθησης μέσω του υπολογισμού του στιγμιαίου απαραμόρφωτου αποβλήτου. Στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε ο υπολογισμός του ύψους της απόληξης με βάση το αρχικό μοντέλο των Kim και Dornfeld [17] με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των θετικών μόνο δυνάμεων ωθήσεων (για να μην υποεκτιμηθεί το ύψος της απόληξης λόγω αρνητικών δυνάμεων) και επίσης ενσωματώθηκε η ελαστική παραμόρφωση. Τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου είναι ο υπολογισμός του ύψους και του πάχους της απόληξης διάτρησης. Ως σύστημα δονήσεων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε μια πιεζοηλεκτρική βάση συγκράτησης του κομματιού με παλμική υποβοήθηση, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.28.

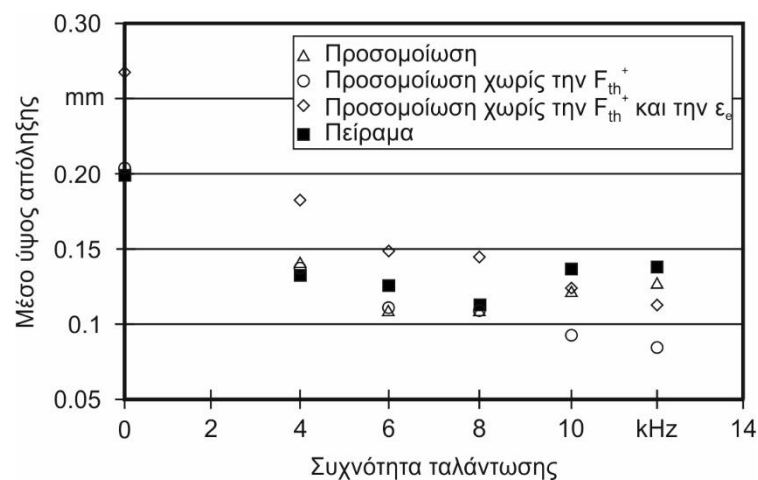


Σχήμα 2.28: Πιεζοηλεκτρική βάση συγκράτησης του κομματιού με παλμική υποβοήθηση από τους Chang και Bone [19]

Κατεργαζόμενο υλικό	Al 6061-T6 (25x25x3.18mm)
Τύπος τρυπανιού	Ελικοειδές με επικάλυψη TiN Ø3.35mm , Ø4mm
Ταχύτητα περιστροφής	$n = 1000, 1300, 4000$ [rpm]
Πρόωση	$F = 1, 1, 1.3$ [mm/sec]
Συχνότητα ταλάντωσης	$4 \rightarrow 12$ kHz με βήμα 2kHz
Εύρος ταλάντωσης	0.002 [mm]
Μετρήσεις	Μικροσκόπιο

Πίνακας 2.8: Πειραματικές συνθήκες, Chang και Bone [19]

Πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες πειραμάτων ώστε να επαληθευτεί το αναλυτικό μοντέλο. Τα πειραματικά αποτελέσματα (μέσες τιμές ύψους απόληξης) συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αναλυτικά όπου παρατηρήθηκε μέγιστη απόκλιση πειραματικών από αναλυτικά  $\pm 16\%$  και η αντίστοιχη απόκλιση για τις μέσες τιμές  $\pm 10\%$ . Αναφορικά με τη συμβατική διάτρηση, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του προηγούμενου μοντέλου των Kim και Dornfeld [17], με του παρόντος μοντέλου και τα πειραματικά όπου διαπιστώθηκε αύξηση της ακρίβειας κατά 32%. Το αντίστοιχο ποσοστό για παλμικά υποβοηθούμενη διάτρηση ανέρχεται στο 31%. Τέλος, διερευνήθηκε και προσδιορίστηκε η βέλτιστη συχνότητα ταλάντωσης με συγκεκριμένο εύρος ταλάντωσης, για την οποία η απόληξη ελαχιστοποιείται. Η τιμή αυτή επιβεβαιώθηκε και πειραματικά. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα ταλάντωσης άρχισε να δημιουργείται αρνητική δύναμη ώθησης.



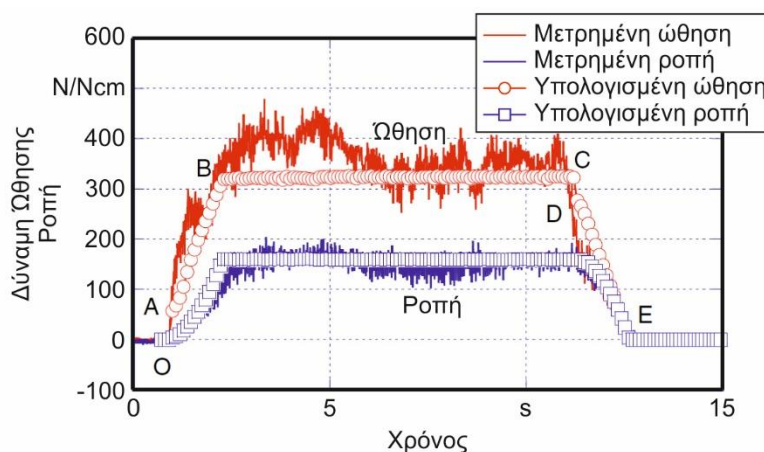
Σχήμα 2.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικού μοντέλου και πειραμάτων, Chang και Bone [19]



Στο σχήμα 2.29 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά του μοντέλου, αναφορικά με τη μεταβολή του μέσου ύψους απόληξης με τη συχνότητα ταλάντωσης.

### 2.5.3 Αναλυτική μοντελοποίηση δυνάμεων κοπής κατά τη διάτρηση για την ανάλυση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης

Οι **Matsamura** και **Leopold** [20] ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης και πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής, λόγω του ότι η διαμόρφωση της απόληξης εξόδου στη διάτρηση σχετίζεται με την αξονική συνιστώσα της δύναμης, στην έξοδο του τρυπανιού από το κομμάτι καθώς και την κατεύθυνση ροής του αποβλίττου κατά τη μεταβατική κοπή στην είσοδο ή έξοδο από το κομμάτι. Μέσω της ανάλυσης της γεωμετρίας του τρυπανιού και των δυνάμεων, δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμού των αξονικών και ακτινικών συνιστωσών καθώς και της ροπής. Στο σχήμα 2.30 φαίνεται η μεταβολή της δύναμης ώθησης καθώς και της ροπής με το χρόνο σύμφωνα με τα πειραματικά αλλά και τα θεωρητικά αποτελέσματα.

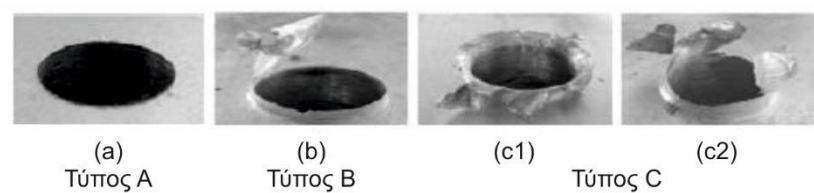


Σχήμα 2.30: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής δύναμης ώθησης και ροπής, κατά τους Matsamura και Leopold [20]

Μετά την επαλήθευση του με πειραματικά αποτελέσματα, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της επίδρασης της γεωμετρίας του τρυπανιού (και συγκεκριμένα του χείλους κοπής) στο σχηματισμό της απόληξης. Για το σκοπό αυτό δοκιμάστηκαν τρυπάνια διαφορετικής γεωμετρίας, με αριστερόστροφα και δεξιόστροφα καμπυλωτό χείλος κοπής ώστε να συγκριθούν με τα συμβατικά αλλά και μεταξύ τους. Η προσομοίωση έδειξε ότι με τη χρήση τρυπανιών με δεξιόστροφη καμπύλωση αναπτύσσεται μικρότερη αξονική δύναμη συγκριτικά με τους άλλους δύο τύπους τρυπανιών. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας του χείλους στη ροή του αποβλίττου και διαπιστώθηκε ότι τα τρυπάνια με καμπυλωτό χείλος παρουσιάζουν μεγαλύτερη γωνία ροής αποβλίττου άρα είναι πιο αποτελεσματικά για τη μείωση της απόληξης διάτρησης, αφού μεγαλύτερη γωνία συνεπάγεται ροή του αποβλίττου προς την ακτινική διεύθυνση.

Οι **Segonds et al.** [21] ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο βασισμένο στη θεωρία των επιπέδων ολίσθησης για την πρόβλεψη του τύπου της απόληξης διάτρησης σε διάτρηση αποκλειστικά όλκιμων υλικών. Στο μοντέλο χρησιμοποιείται ο χαρακτηρισμός και διαχωρισμός της μορφής της απόληξης σε τρεις τύπους σύμφωνα με τους Κο και Lee [34], όπως φαίνονται στο σχήμα 2.31. Κριτήριο για το διαχωρισμό στους διαφορετικούς τύπους ήταν η τιμή του κρίσιμου πάχους του υλικού που είτε υπήρχε καταδεικνύοντας τον τύπο B ή C ή δεν

υπήρχε το οποίο καταδείκνυε την εμφάνιση απόληξης τύπου A. Το κρίσιμο πάχος του εναπομείναντος ακατέργαστου υλικού στην έξοδο του υλικού είναι το πάχος κάτω από το οποίο ξεκινά ή κάμψη - παραμόρφωση του υλικού και σταματάει η κοπή.



Σχήμα 2.31: Διαχωρισμός των τύπων της μορφής απόληξης σύμφωνα με τους Ko και Lee [34]

Το μοντέλο εξέτασε την επίδραση τριών παραμέτρων, της γωνίας κορυφής, της γωνίας κλίσης και της πρόωσης. Έτσι, δοκιμάστηκαν τρυπάνια διαφορετικής γεωμετρίας σε διαφορετικές προώσεις. Στη συνέχεια έγιναν πειράματα διάτρησης σε αλουμίνιο Al2024 T354 τα οποία επαλήθευσαν τις εκτιμήσεις του μοντέλου ως προς τον τύπο των απολήξεων. Στον πίνακα 2.9 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω διερεύνηση.

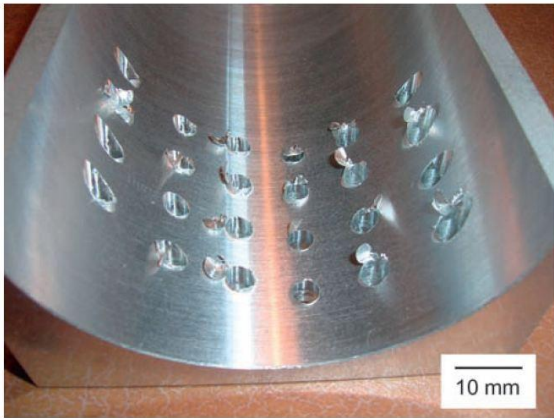
Κατεργαζόμενο υλικό	Al 2024-T354 (t=19,6 mm)
Τύπος τρυπανιού	Ø8mm , Ø12mm
Ταχύτητα κοπής	$v_c= 60$ [m/min]
Πρόωση	$f= 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$ [mm/tr]
Ψυκτικό υγρό	Ξηρή διάτρηση
Μετρήσεις	Δυναμόμετρο

Πίνακας 2.9: Πειραματικές συνθήκες, Segonds et al. [21]

## 2.6 Απόληξη διάτρησης σε διασταυρούμενες οπές και καμπυλωτές επιφάνειες

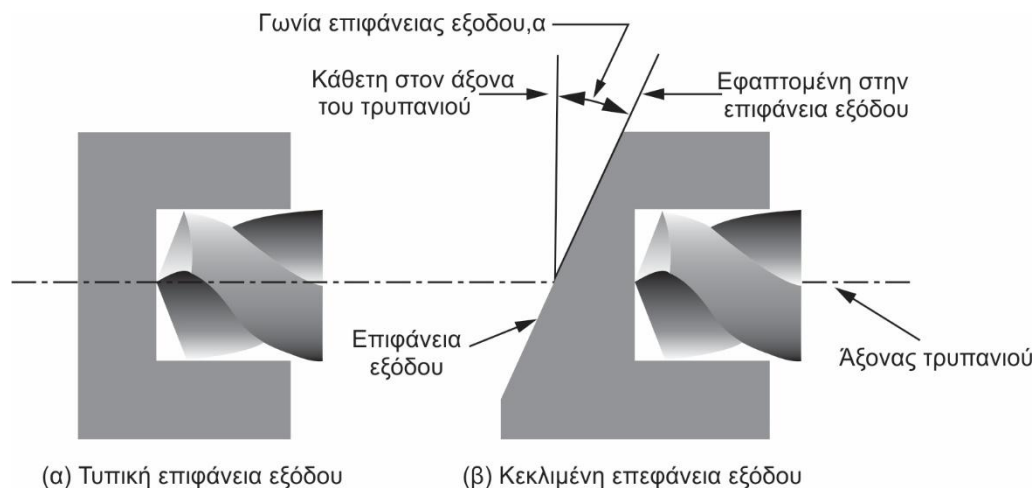
Η απόληξη διάτρησης οπών που διασταυρώνονται με κάποια άλλη είναι σημαντική, γιατί οι εξόδοι στις διασταυρούμενες οπές είναι δύσκολα προσβάσιμες και η διαδικασία αφαίρεσής τους απαιτεί τη χρήση ειδικών εργαλείων ή πολλές φορές είναι και αδύνατη. Διάτρηση διασταυρούμενων οπών συναντάται στις περιπτώσεις εγκάρσιων οπών για τη λίπανση περιστρεφόμενων μερών-εξαρτημάτων. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της απόληξης σε αυτές τις περιπτώσεις παίζει η γωνία εξόδου του τρυπανιού η οποία ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στην επιφάνεια εξόδου και την κάθετη στον άξονα του τρυπανιού. Στο σχήμα 2.32 φαίνεται η διάτρηση οπών με καμπύλη

επιφάνεια εξόδου άρα με πολλές διαφορετικές γωνίες εξόδου.



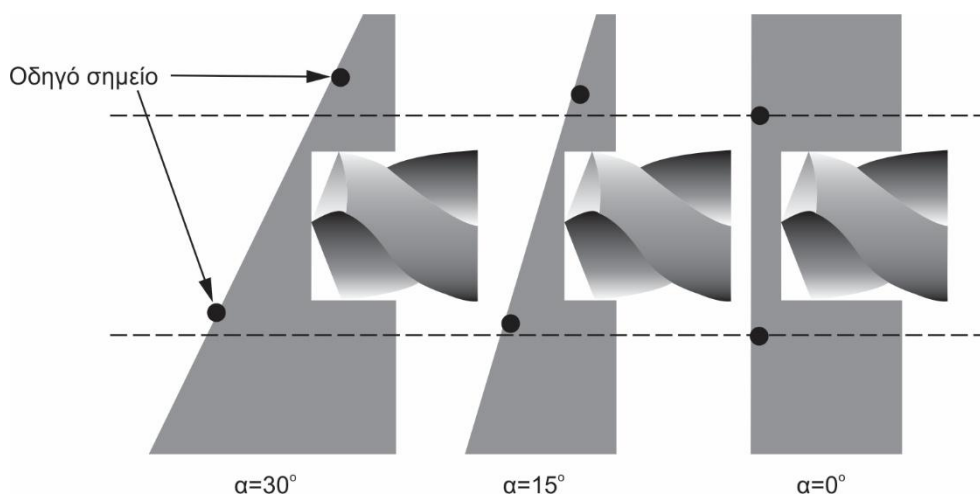
Σχήμα 2.32: Διάτρηση οπών σε καμπύλη επιφάνεια εξόδου

Οι **Min et al.** [22] μελέτησαν την επίδραση της γωνίας εξόδου (σχήμα 2.33), διαπιστώνοντας ότι οι απολήξεις εξόδου διαμορφώνονται μόνο σε ένα μέρος της περιφέρειας της οπής όταν η επιφάνεια εξόδου δεν είναι κάθετη στον άξονα του τρυπανιού. Επιπλέον διερευνήθηκε η επίδραση της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής και της γωνίας εισόδου στην απόληξη διάτρησης, ενώ αναπτύχθηκε μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει χαρακτηριστικά της γεωμετρίας της διάτρησης και προβλέπει την πιθανή περιοχή ανάπτυξης της απόληξης.



Σχήμα 2.33: Διάτρηση με κάθετη και κεκλιμένη επιφάνεια εξόδου κατά τους Min et al. [22]

Σύμφωνα με το μοντέλο, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν η πρόωση, η ποσότητα αποβλίπτου στην κοπτική ακμή αυξανόταν επίσης, πράγμα που καταδεικνύει την ύπαρξη μεγαλύτερης δύναμης ώθησης η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη απόληξη. Αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας κοπής και της γωνίας εξόδου  $\alpha$ , επέφερε μείωση του μεγέθους της απόληξης εξόδου. Για την επαλήθευση του μοντέλου έγιναν πειράματα διάτρησης Al5052 με ελικοειδές τρυπάνι ( $\varnothing 6\text{mm}$ ,  $118^\circ$  γωνία κορυφής,  $32^\circ$  γωνία ελίκωσης). Τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκε ότι συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

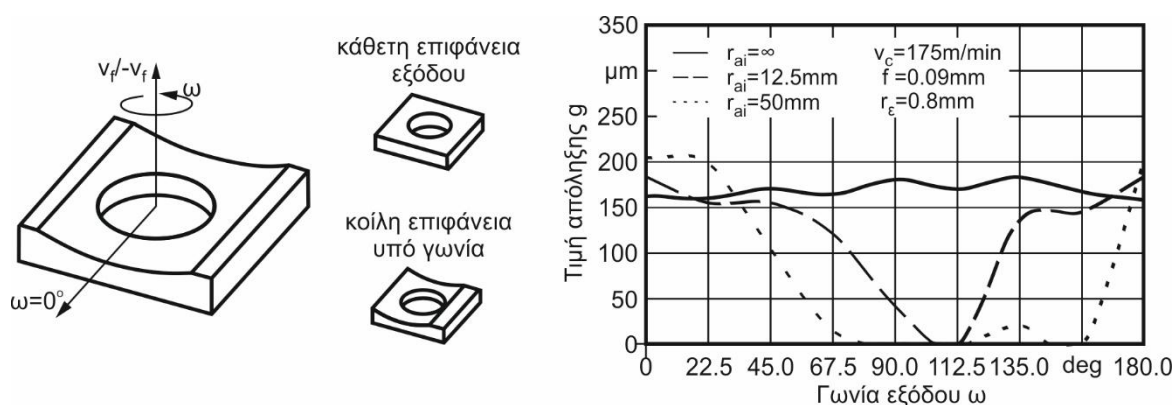


Σχήμα 2.34: Επίδραση της γωνίας επιφάνειας εξόδου στο οδηγό σημείο, Park [33]

Η επίδραση της γωνίας εξόδου έχει εξηγηθεί από τον **Park** [33], ο οποίος προσομοίωσε με πεπερασμένα στοιχεία τη διαδικασία σχηματισμού της απόληξης και μελέτησε την επίδραση της γωνίας εξόδου του τρυπανιού σε σχέση με την επιφάνεια εξόδου. Διαπίστωσε ότι όσο μεγαλώνει η γωνία εξόδου, το σημείο εκκίνησης (pivot point) που είναι η τελική θέση

όπου η διογκωμένη πλαστική περιοχή δεν επεκτείνεται καθόλου περαιτέρω κατά την ακτινική διεύθυνση, εμφανίζεται πιο κοντά στην κατεργασμένη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.34. Η περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης περιορίζεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρότερης απόληξης στην έξοδο. Σε εκείνο το στάδιο της διάτρησης το υλικό κόβεται μέχρι να εμφανιστεί το σημείο εκκίνησης στην επιφάνεια εξόδου ενώ μετά κάμπτεται.

Οι **Heisel και Schaal** [23] διερεύνησαν το σχηματισμό απόληξης εξόδου σε διασταυρούμενες οπές κάνοντας πειράματα σε κομμάτι με κοίλες επιφάνειες εξόδου διαφόρων καμπυλοτήτων, λόγω δυσκολίας μέτρησης της απόληξης στο εσωτερικό των οπών.



Σχήμα 2.35: Κοίλες επιφάνειες εξόδου, σύγκριση τιμών απόληξης επίπεδων και κοίλων επιφανειών εξόδου κατά τους Heisel και Schaal [23]

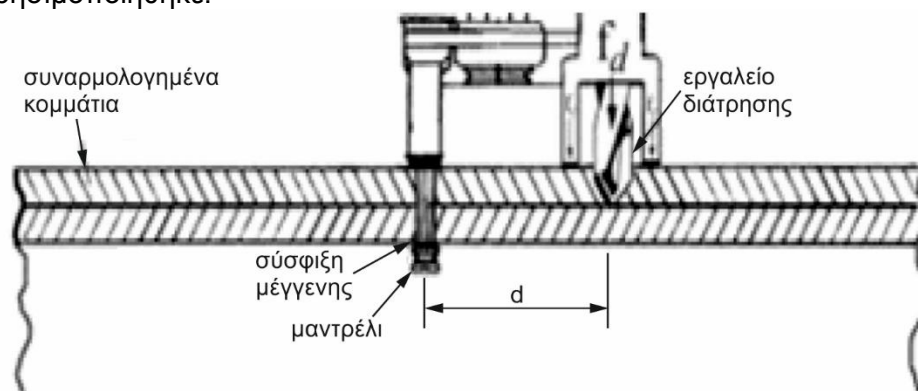
Οι Heisel και Schaal ανέπτυξαν μία μέθοδο μέτρησης της απόληξης σε κοίλες επιφάνειες χρησιμοποιώντας ως αναφορά τις αντίστοιχες μετρήσεις σε επίπεδες επιφάνειες, με τις ίδιες συνθήκες κοπής. Στο σχήμα 2.35 φαίνονται οι γεωμετρίες των επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ένα διάγραμμα σύγκρισης των τιμών  $g$  της απόληξης σε επίπεδες και κοίλες επιφάνειες. Τα κομμάτια δε διατρήθηκαν μόνο κεντρικά (ως προς τον άξονα συμμετρίας της καμπύλωσης της επιφάνειας) αλλά και σε απόσταση από αυτόν. Οι μετρήσεις της απόληξης έγιναν με τη μέθοδο της τριγωνοποίησης ακτίνων laser. Το κατεργαζόμενο υλικό ήταν σκληρυμένος χάλυβας 16MnCr5 και θερμικά επεξεργασμένος C45E ο οποίος παρήγαγε μεγαλύτερου μεγέθους απόληξη σε σχέση με τον πρώτο. Κυρίαρχο ρόλο σε αυτό έπαιξε το χαμηλότερο όριο διαρροής του 16MnCr5. Από τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου διαπιστώθηκε ότι το ύψος και μέγεθος της απόληξης μειώνονται με αύξηση της γωνίας εξόδου αλλά η τιμή τους εξαρτάται ταυτόχρονα και από την ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας εξόδου. Αναφορικά με τις συνθήκες κοπής, παρατηρήθηκε αύξηση του μεγέθους της απόληξης με αύξηση της πρόωσης αλλά η ταχύτητα κοπής δε φάνηκε να έχει ιδιαίτερη επίδραση.

## 2.7 Διάτρηση υλικών πολλαπλών στρωμάτων

Στην αεροδιαστημική και αεροναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιούνται ευρέως τα υλικά πολλαπλών στρωμάτων προκειμένου να συμβάλλουν στην αύξηση του λόγου ορίου αντοχής προς βάρος. Η διάτρηση οπών γίνεται σε όλα τα στρώματα ταυτόχρονα αφού πρώτα συναρμολογηθούν, αλλά μετά απαιτείται αποσυναρμολόγηση, αφαίρεση των ενδιάμεσων απολήξεων και επανασυναρμολόγησή τους. Έτσι προκύπτει η ανάγκη να υπάρχει τρόπος διάτρησης αυτών των στρωμάτων χωρίς την περαιτέρω κατεργασία τους.

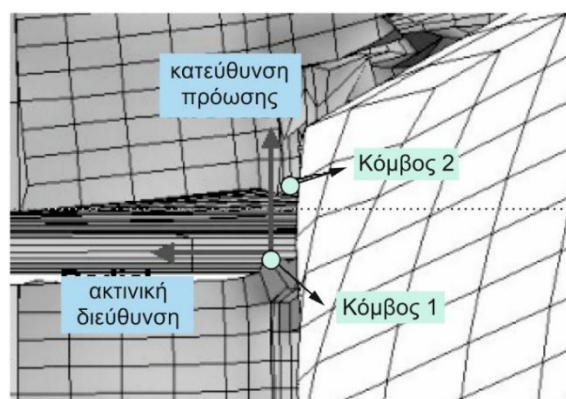
Η δημιουργία κενού ανάμεσα στα δύο υλικά που διατρώνται συμβάλλει πολύ στο σχηματισμό της απόληξης. Άλλοι παράγοντες που επίσης επηρεάζουν είναι ο συνδυασμός των υλικών, η σειρά τοποθέτησής τους, το ενδιάμεσο στεγανωτικό, ο τρόπος συγκράτησης των στρωμάτων και οι παράμετροι κοπής.

Ο **Choi et al.** [24], [25] χρησιμοποίησαν ένα προηγούμενο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS για την προσομοίωση δημιουργίας ενδιάμεσου κενού σε διάτρηση κομματιού χάλυβα SS304L δύο στρωμάτων. Στο σχήμα 2.36 φαίνεται η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 2.36: Συναρμολόγηση δύο στρωμάτων υλικών για τη διάτρησή τους από τους Choi et al. [24], [25]

Το μοντέλο ανέδειξε τη δημιουργία κενού μεταξύ των επιπέδων λόγω σχετικής παραμόρφωσης μεταξύ τους αλλά και ταλαντώσεων που προκαλούνται από το τρυπάνι και τη συνεχή απομάκρυνση του υλικού που κόβεται. Η διαπίστωση έγινε με παρατήρηση δύο κόμβων στην επιφάνεια εξόδου του πρώτου κομματιού και εισόδου του δεύτερου στρώματος αντίστοιχα και καταγραφή των μετατοπίσεών τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.37.



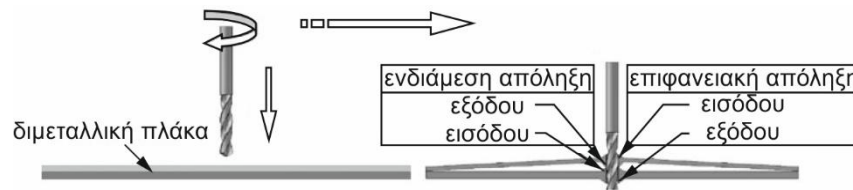
Σχήμα 2.37: Παρατήρηση μετατόπισης κόμβων στα δύο στρώματα από τους Choi et al. [24],[25]

Η δημιουργία αυτού του κενού ευνοεί την ανάπτυξη ενδιάμεσης απόληξης λόγω πλαστικής παραμόρφωσης ανάμεσα στα δύο υλικά. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι λόγω της ταλάντωσης του δεύτερου στρώματος, η απόληξη εισόδου σε αυτό μπορεί να ακουμπήσει την απόληξη εξόδου του πρώτου παραμορφώνοντάς την. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συμπίπτουν ποιοτικά με πειραματικά αλλά λόγω των παραδοχών και των απλοποιήσεων που έχουν γίνει δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ακριβή (ποσοτική) πρόβλεψη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ενδιάμεσης απόληξης.

Οι **Bi και Liang** [26] ερεύνησαν το σχηματισμό απόληξης διάτρησης κολλημένων μεταξύ τους υλικών και συγκεκριμένα Ti-6Al-4V κράματος τιτανίου και Al7075-T6 κράματος αλου-



μινίου, προκειμένου να εξετάσουν την επίδραση της σειράς διάτρησης των υλικών, της πρόωσης, ταχύτητας κοπής καθώς και δύναμης συγκράτησης, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενδιάμεσης απόληξης και της επιφανειακής απόληξης εισόδου και εξόδου.

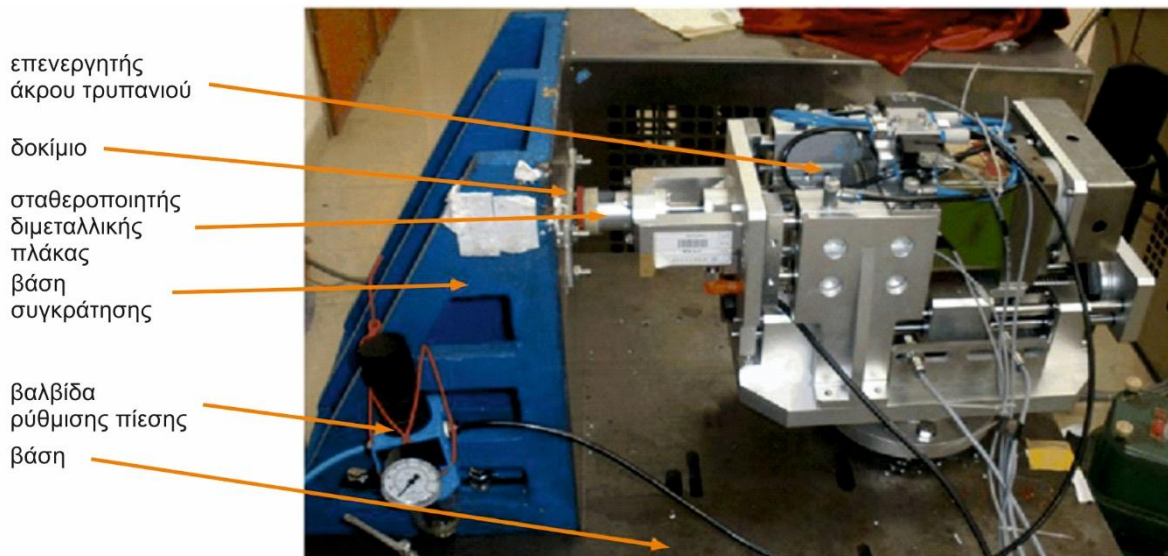


Σχήμα 2.38: Διάτρηση διμεταλλικής πλάκας Ti-6Al-4V - Al7075-T6 από τους Bi και Liang [26]

Η διάτρηση των κομματιών έγινε με επικαλυμμένα τρυπάνια καρβιδίου ( $\varnothing 6\text{mm}$ ,  $140^\circ$  γωνία κορυφής,  $30^\circ$  γωνία ελίκωσης). Ως μέτρο του μεγέθους της απόληξης χρησιμοποιήθηκε το πάχος της βάσης (burr root thickness) καθώς και το ύψος της απόληξης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η συσχέτισή τους με τις παραμέτρους έδειξαν ότι οι παρακάτω παράγοντες μειώνουν το ύψος της απόληξης:

- η σειρά διάτρησης Ti-6Al-4V  $\rightarrow$  Al7075-T6,
- η υψηλή πρόωση και
- η μέτρια ταχύτητα κοπής.

Αναφορικά με το πάχος βάσης της απόληξης, η μεγάλη πρόωση και μέτρια ταχύτητα έχουν θετική επίδραση. Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των αντίστοιχων μετρήσεων υλοποιήθηκε αλγόριθμος πολυκριτήριας βελτιστοποίησης (multi-objective optimization) σε περιβάλλον Matlab για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων με κριτήριο την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του ύψους και του πάχους βάσης της απόληξης. Στο σχήμα 2.39 απεικονίζεται η διάταξη υλοποίησης της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας.

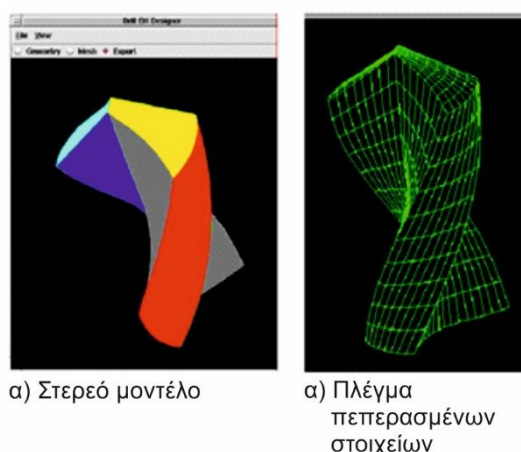


Σχήμα 2.39: Υλοποίηση πειράματος διάτρησης διμεταλλικών πλακών από τους Bi και Liang [26]

## 2.8 Προσομοίωση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Παρ' όλο που έχουν αναπτυχθεί πολλά αναλυτικά μοντέλα σχηματισμού της απόληξης διάτρησης, είναι δύσκολο να προσδιορισθεί μία κλειστής μορφής αναλυτική λύση της διαδικασίας διαμόρφωσής της γιατί περιλαμβάνει πολύπλοκη θερμο-ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού σε μεγάλες παραμορφώσεις με πολύ υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης. Γι' αυτό το λόγο έχουν γίνει προσπάθειες μοντελοποίησης και προσομοίωσης του φαινομένου με πεπερασμένα στοιχεία.

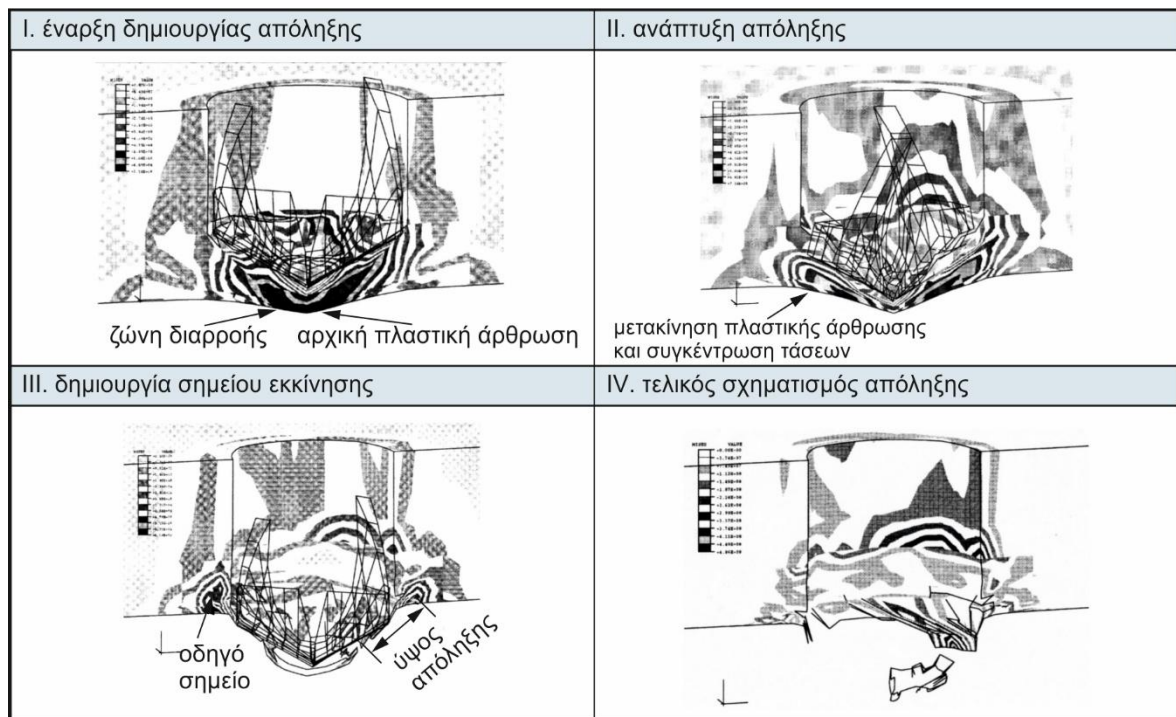
Η γεωμετρία του εργαλείου διάτρησης έχει καθοριστικό ρόλο στη σωστή προσομοίωση της διάτρησης και ως εκ τούτου της δημιουργίας αποβλήτου, απόληξης κ.λπ. Οι **Guo και Dornfeld** [27] δημιούργησαν ένα ενοποιημένο μοντέλο CAD και FEA για την τριδιάστατη μοντελοποίηση του εργαλείου και την προσομοίωση της διάτρησης και δημιουργίας της απόληξης. Οι χρήστες του περιβάλλοντος έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν τις γεωμετρικές παραμέτρους του τρυπανιού όπως τη γωνία κορυφής και τη γωνία ελίκωσης. Εφόσον τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι αλλαγές σε αυτά παρασταθούν και γραφικά, ακολουθεί η πλεγματοποίηση του τρυπανιού και η προσομοίωση της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 2.40: Μοντελοποίηση εργαλείου διάτρησης και παραγωγή πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων κατά τους Guo και Dornfeld [27]

Οι **Guo και Dornfeld** [4] ανέπτυξαν ένα μη γραμμικό θερμοελαστοπλαστικό μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στο ABAQUS Explicit για την προσομοίωση της δημιουργίας απόληξης κατά τη διάτρηση ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304L και διενήργησαν τα αντίστοιχα πειράματα για να το επιβεβαιώσουν. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προτάθηκε και περιγράφηκε αναλυτικά ένας μηχανισμός τεσσάρων σταδίων σχηματισμού της απόληξης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.41:





Σχήμα 2.41: Στάδια σχηματισμού απόληξης διάτρησης από την προσομοίωση με πετρερασμένα στοιχεία σύμφωνα με τους Guo και Dornfeld [27]

Στον πίνακα 2.10 φαίνονται οι πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι συμπίπτουν ποιοτικά με τα πειραματικά, όμως δεν έγινε ποσοτική σύγκριση των χαρακτηριστικών μεγεθών των απολήξεων που προέκυψαν.

Κατεργαζόμενο υλικό	SS304L (R40, t=15mm)
Τύπος τρυπανιού	HSS Ø15 mm
Γωνία κορυφής τρυπανιού	120°
Γωνία ελίκωσης	30°
Γωνία ανακούφισης	9°
Ψυκτικό υγρό	Ξηρή διάτρηση
Ταχύτητα περιστροφής	n=1500 [rpm]
Πρόωση	f <sub>z</sub> = 0.2 [mm/s]

Πίνακας 2.10: Πειραματικές συνθήκες, Guo και Dornfeld [4]

## 2.9 Εναλλακτικές Προσεγγίσεις μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης του σχηματισμού απόληξης διάτρησης

### 2.9.1 Μεθοδος επιφανειών Αποκρισης (RSM) και Βελτιστοποίηση με Γενετικό Αλγόριθμο

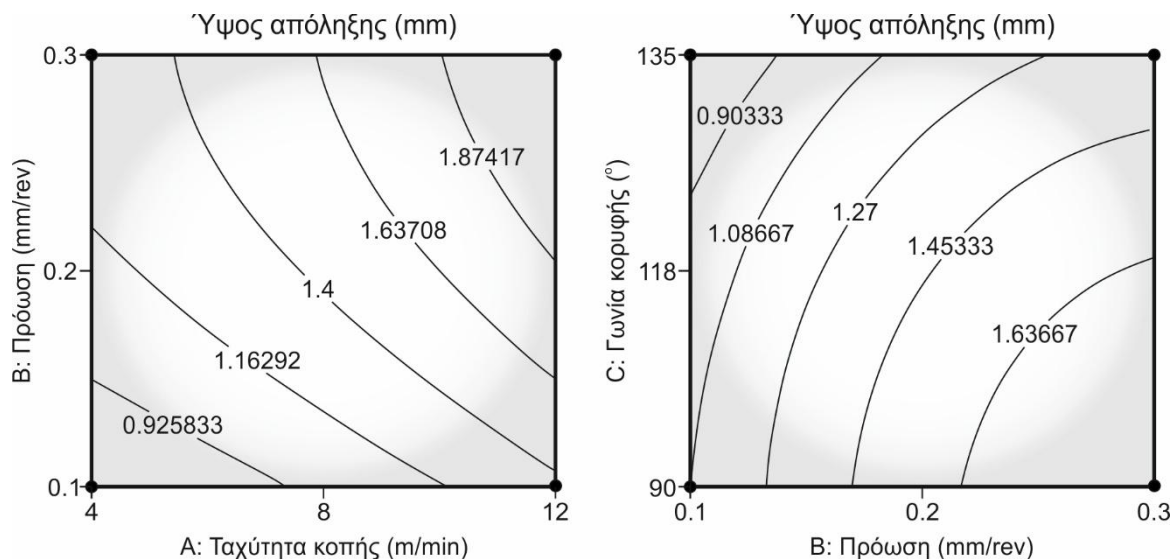
Οι **Kilickap** και **Huseyinoglu** [28] ανέπτυξαν μια διαδικασία βελτιστοποίησης διάτρησης ανοξείδωτου χάλυβα SS304 ως προς το ύψος της παραγόμενης απόληξης. Στόχος ήταν η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού τριών παραμέτρων, συγκεκριμένα της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής και της γωνίας κορυφής (point angle) του τρυπανιού, που ελαχιστοποιούν

το ύψος της προκύπτουσας απόληξης. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν 17 διαφορετικά πειράματα με μεταβαλλόμενες παραμέτρους και μετρήσεις του ύψους της απόληξης με ένα οπτικό μικροσκόπιο. Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Από τα πειραματικά αποτελέσματα, με χρήση της Μεθοδολογίας Επιφανειών Απόκρισης (RSM-Response Surface Methodology) προσδιορίστηκε μια σχέση που δίνει το ύψος της απόληξης διάτρησης συναρτήσει των τριών μεταβλητών παραμέτρων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.42, καταλήγοντας στο ότι μικρές ταχύτητες, προώσεις και μεγάλη γωνία κορυφής δίνουν μικρότερη απόληξη.

<b>Κατεργαζόμενο υλικό</b>	SS304L (100x20x5mm)
<b>Τύπος τρυπανιού</b>	HSS (TiN coated) Ø5 mm
<b>Γωνία κορυφής τρυπανιού</b>	90° - 118° - 135°
<b>Ψυκτικό υγρό</b>	Ξηρή διάτρηση
<b>Ταχύτητα κοπής</b>	$V_c=4, 8, 12$ [m/min]
<b>Πρόωση</b>	$f_z= 0.1, 0.2, 0.3$ [mm/rev]
<b>Μετρήσεις</b>	Οπτικό μικροσκόπιο (4 θέσεις/90°)

Πίνακας 2.11: Πειραματικές συνθήκες, Kilickar και Huseyinoglu [28]

Τέλος, για την εύρεση του ολικού βέλτιστου συνδυασμού των τριών παραμέτρων, με κριτήριο πάντα την ελαχιστοποίηση της απόληξης, εφαρμόστηκε ένας Γενετικός Αλγόριθμος. Αποτέλεσμα της υλοποίησης του αλγορίθμου ήταν ο προσδιορισμός της ελάχιστης δυνατής τιμής της απόληξης ( $H=0.5\text{mm}$ ), σύμφωνα με τα ελάχιστα και μέγιστα όρια των τριών παραμέτρων, καθώς και ο υπολογισμός του σετ τιμών των παραμέτρων που οδηγούν σε αυτήν την ελαχιστοποίηση ( $v=4\text{m/min}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ ,  $\theta=135^\circ$ ).



Σχήμα 2.42: Χάρτες ύψους απόληξης διάτρησης συναρτήσει της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής και γωνίας κορυφής σύμφωνα με τη σχέση που προσδιορίστηκε με τη μέθοδο RSM από τους Kilickar και Huseyinoglu [28]

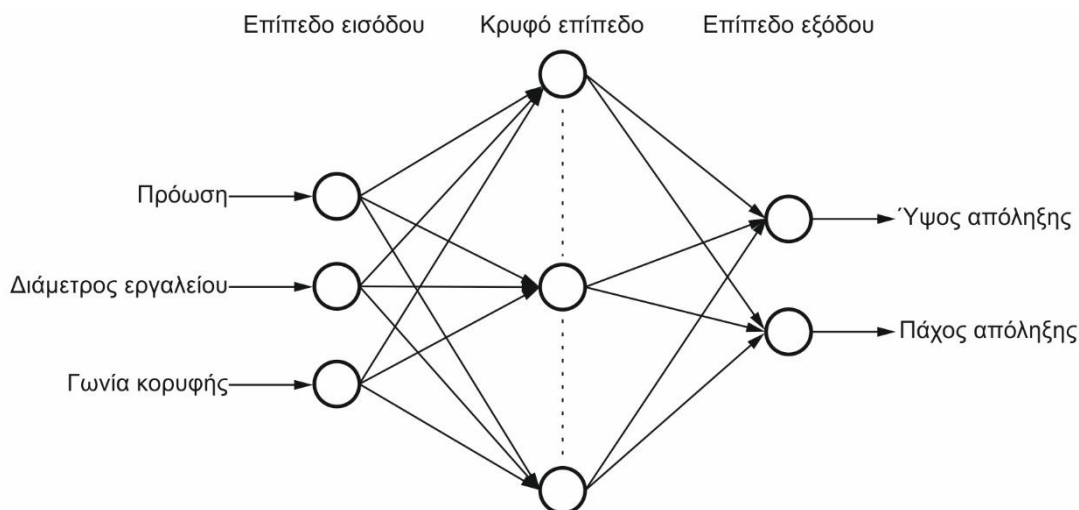
### 2.9.2 Προσομοίωση του σχηματισμού απόληξης διάτρησης με Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο και βελτιστοποίηση με τη Μέθοδο Σμήνους Σωματιδίων (PSO)

Οι **Gaitonde και Karnik** [29] ανέπτυξαν μια διαδικασία για την πρόβλεψη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης (ύψος, πάχος) αλλά και την ελαχιστοποίησή της. Δημιούργησαν ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο στο Matlab το οποίο αφού εκπαιδεύτηκε, ελέγχθηκε ώστε να μπορεί να δέχεται παραμέτρους όπως η πρόωση, η διάμετρος του τρυπανιού και η γωνία κορυφής ως μεταβλητές εισόδους και να υπολογίζει ως εξόδους το ύψος και το πάχος της απόληξης. Απαραίτητη για την ανάπτυξη του Τ.Ν.Δ. ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων καθώς και τα αποτελέσματά τους σε σχέση με την απόληξη, τα διαφορετικά δηλαδή ύψη και πάχη που μετρήθηκαν με το μικροσκόπιο. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 27 σετ πειραμάτων.

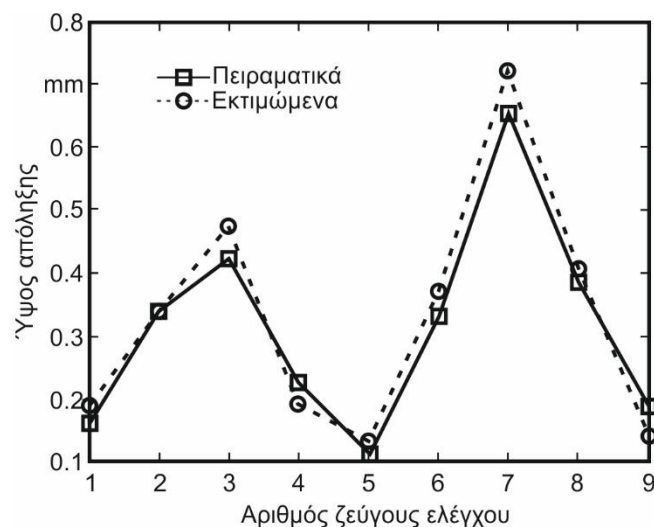
Κατεργαζόμενο υλικό		Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 316L, 25mm πάχος
Εργαλείο διάτρησης		HSS ελικοειδή τρυπάνια (γωνία κορυφής: 118°-134°)
Παράμετροι κοπής	$f_z$	0.04-0.12 mm/rev
	$V_c$	12 m/min
Μέτρηση απόληξης		Μικροσκόπιο. Μέτρηση σε 3 ισαπέχουσες θέσεις.

Πίνακας 2.12: Πειραματικές συνθήκες, Gaitonde και Karnik [29]

Με αυτά ως δεδομένα (τα 17 από τα σετ εισόδων - εξόδων) έγινε η εκπαίδευση ενός πολυ-επίπεδου Τ.Ν.Δ. πρόσω τροφοδότησης (feed forward). Για επιβεβαίωση και έλεγχο του Τ.Ν.Δ. χρησιμοποιήθηκαν 9 καινούρια σετ δεδομένων. Το μέγιστο σφάλμα υπολογίστηκε 11.6% και 18.2% για το ύψος και το πάχος της απόληξης αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του Τ.Ν.Δ. συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα πειραματικά. Στο σχήμα 2.43 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που αναπτύχθηκε ενώ στο σχήμα 2.44 φαίνεται ένα διάγραμμα σύγκρισης των πειραματικών με τα εκτιμώμενα από το Τ.Ν.Δ. δεδομένων αναφορικά με το ύψος της απόληξης διάτρησης.

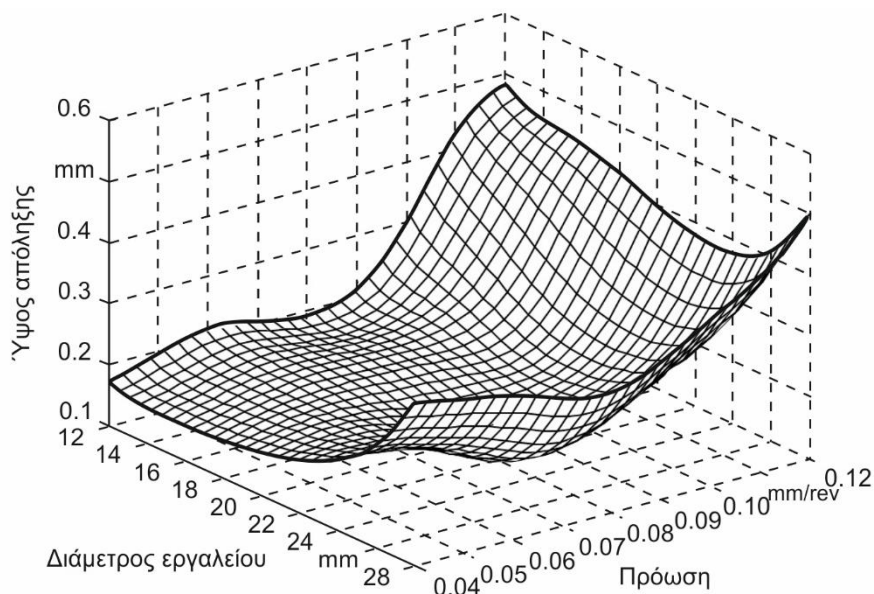


Σχήμα 2.43: Αρχιτεκτονική Τεχνητού νευρωνικού δικτύου, Gaitonde και Karnik [29]



Σχήμα 2.44: Σύγκριση των πειραματικών με τις υπολογισμένες τιμές του ύψους, Gaitonde και Karnik [29]

Σε σχέση με την επίδραση των παραμέτρων, διαπιστώθηκε ότι η χαμηλότερη πρόωση παράγει μικρότερου ύψους απολήξεις ενώ δεν επιδρά στο πάχος τους. Όσο η διάμετρος του τρυπανιού μεγαλώνει, αυξάνεται το πάχος της απόληξης μέχρι τη διάμετρο Ø20mm όπου αρχίζει να μειώνεται. Η επίδραση της διαμέτρου του εργαλείου καθώς και της πρόωσης στο ύψος της απόληξης φαίνονται στο διάγραμμα του [σχήματος 2.45](#). Επίσης, με αύξηση της διαμέτρου και ταυτόχρονη αύξηση της γωνίας κορυφής η απόληξη μπορεί να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) για τον εντοπισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων με κριτήριο την ελαχιστοποίηση ύψους και πάχους της απόληξης.



Σχήμα 2.45: Μεταβολή του ύψους απόληξης συναρτήσει της διαμέτρου και της πρόωσης, Gaitonde και Karnik [29]

### 2.9.3 Χρήση σημάτων από τους κινητήρες πρόωσης και περιστροφής για τον εντοπισμό των μη αποδεκτών απολήξεων διάτρησης.

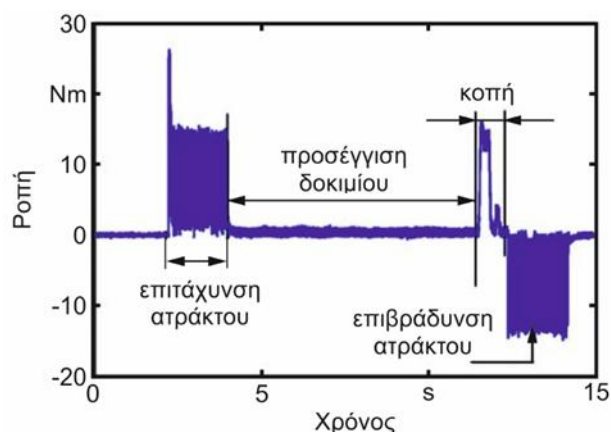
Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που προτείνουν και εφαρμόζουν την καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας των κινητήρων σαν εναλλακτική μέθοδο για τον υπολογισμό δυνάμεων. Τα εσωτερικά σήματα κατανάλωσης των κινητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα πλέον για την παρακολούθησή των κατεργασιών. Το πλεονέκτημα παρακολούθησης των σημάτων κατανάλωσης ενέργειας είναι ότι αποτελεί μία μη καταστροφική μέθοδο για την εφαρμογή της οποίας δεν απαιτούνται επιπλέον συσκευές.

Στην εργασία τους οι **Peña et al.** [30] ανέπτυξαν μία μέθοδο παρακολούθησης των εσωτερικών σημάτων της κατεργασίας διάτρησης, για τον προσδιορισμό σχηματισμού μη αποδεκτών απολήξεων. Αρχικά έγιναν προκαταρκτικά πειράματα για να προσδιοριστεί το πιο ευαίσθητο σήμα στις μεταβολές σχηματισμού της απόληξης, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν τα εσωτερικά σήματα των κινητήρων περιστροφής και πρόωσης που συνδέουν την κατανάλωση ενέργειας με τη ροπή και τη δύναμη ώθησης. Από την καταγραφή του σήματος τάσης  $V_T$  από τον κινητήρα περιστροφής της ατράκτου και σύνδεσή του με τη ροπή, μπορούν να διακριθούν όλα τα στάδια πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διάτρηση, δηλαδή η επιτάχυνση της ατράκτου, η προσέγγιση του κομματιού, η κατεργασία και η επιβράδυνση της ατράκτου. Κατά αντιστοιχία, από το σήμα  $V_F$  του κινητήρα που δίνει την πρόωση, μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη ώθησης καθ' όλη τη διαδικασία.

Κατεργαζόμενο υλικό	Al 7075 - T6	
Τύπος τρυπανιού	Solid Carbide (TiAlN coated)	3-flute Ø10mm
	Solid Carbide (uncoated)	
Γωνία κορυφής/ ελίκωσης τρυπανιού	135° / 30°	
Ψυκτικό υγρό	Ξηρή διάτρηση	
Μετρήσεις δυνάμεων, απόληξης	Δυναμόμετρο, Προφιλόμετρο	

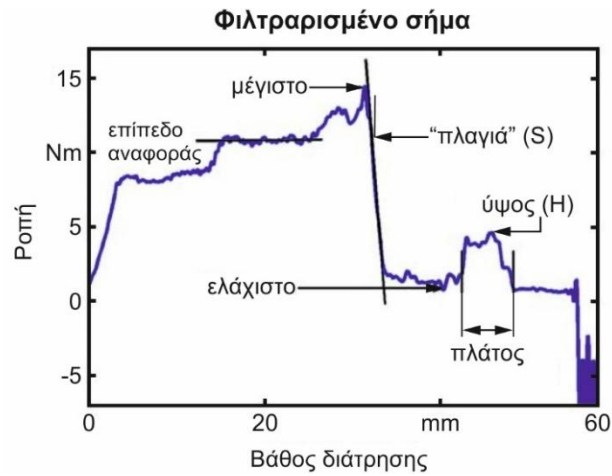
Πίνακας 2.13: Πειραματικές συνθήκες, Peña et al. [29]

Στο σχήμα 2.46 φαίνεται το διάγραμμα του σήματος της ροπής από τον κινητήρα περιστροφής καθώς και οι διακριτές περιοχές σε αυτό. Η δυνατότητα υπολογισμού δυνάμεων και ροπών από την ανίχνευση αυτών των σημάτων τάσης των κινητήρων επιβεβαιώθηκε με τη σύγκρισή τους με πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν με δυναμόμετρο και συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό. Τέλος, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος επεξεργασίας του σήματος εξόδου, υπολογισμού του μεγέθους της απόληξης και εντοπισμού των μη αποδεκτών απολήξεων σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένα όρια.



Σχήμα 2.46: Υπολογισμένη ροπή από το σήμα τάσης του κινητήρα περιστροφής της ατράκτου κατά τους Peña et al. [29]

Στο σχήμα 2.47 φαίνεται ένα διάγραμμα ροπής-βάθους διάτρησης στο οποίο διακρίνονται κάποιες χαρακτηριστικές περιοχές του σήματος που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την κατεργασία. Συγκεκριμένα, το υψηλό ελάχιστο της ροπής κατά την έξοδο του τρυπανιού υποδεικνύει μεγάλου μεγέθους απόληξη. Διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα επιτυχούς εντοπισμού των μη αποδεκτών απολήξεων κατά 92%.



Σχήμα 2.47: Διάγραμμα μεταβολής της ροπής κατά τους Ρεña et al. [29]



### 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της διερεύνησης της διαδικασίας δημιουργίας της απόληξης διάτρησης και των χαρακτηριστικών αυτής, αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.). Η Μ.Π.Σ. είναι μία αριθμητική μέθοδος η οποία εντάσσεται στον κλάδο της υπολογιστικής μηχανικής και υλοποιείται μέσω σύγχρονων λογισμικών CAE (Computer Aided Engineering). Τα λογισμικά CAE και η υπολογιστική μηχανική εν γένει, αποτελούν την τομή τριών πεδίων: των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, της Μηχανικής και της Επιστήμης των Υπολογιστών.

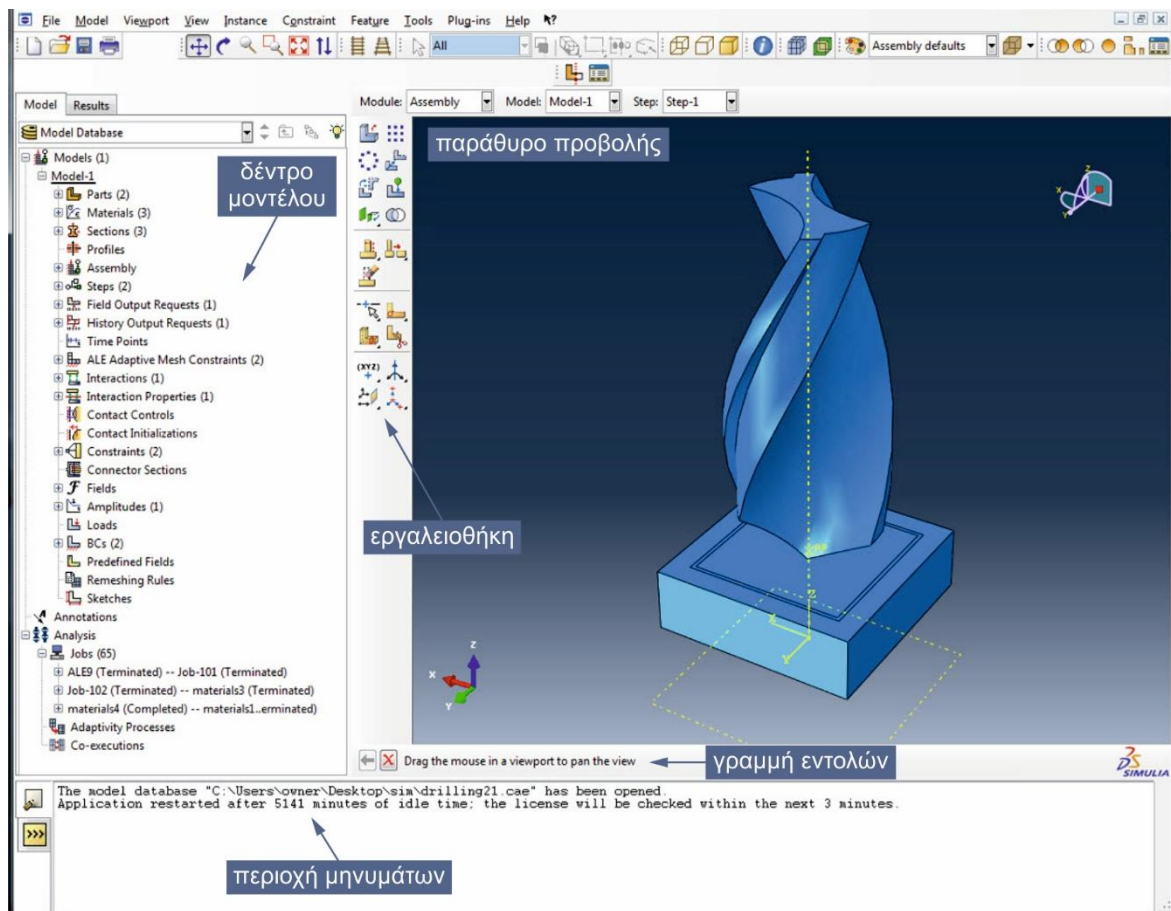
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την ανάλυση πληθώρας προβλημάτων μηχανικής, ρευστομηχανικής, ηλεκτρομαγνητισμού, μετάδοσης θερμότητας και ακουστικής. Σε ότι αφορά τα προβλήματα μηχανικής (στατικής και δυναμικής) των κατασκευών, η Μ.Π.Σ. είναι μία μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης και επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων φόρτισης αντικειμένων, δομικών στοιχείων, μηχανολογικών εξαρτημάτων και κατασκευών. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η καθολικότητα, δηλαδή η δυνατότητα εφαρμογής της σε ένα πολύ μεγάλο εύρος προβλημάτων που εκτείνονται από πολύ απλά μονοδιάστατα ή/και γραμμικά προβλήματα μέχρι και σε μη γραμμικά προβλήματα σύνθετων δυναμικών φορτίσεων τριδιάστατων αντικειμένων. Από την άλλη πλευρά, βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αυξημένη υπολογιστική ισχύς και ο χρόνος που απαιτείται από τα διάφορα λογισμικά υλοποίησής της για την ανάλυση των προβλημάτων.

Το μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας διάτρησης και της δημιουργίας απόληξης διάτρησης αναπτύχθηκε σε ένα λογισμικό υλοποίησης της Μ.Π.Σ. Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πακέτο CAD-CAE το οποίο ενσωματώνει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης σχεδίασης, μοντελοποίησης και αριθμητικής ανάλυσης. Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα μοντελοποίησης (προ-επεξεργασίας) και επίλυσης μηχανολογικών προβλημάτων αλλά και μετα-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης (pre- and post-processing). Ο επιλύτης που χρησιμοποιεί το λογισμικό εφαρμόζει άμεση (explicit) και δυναμική (dynamic) επίλυση, επιλύοντας το οποιοδήποτε πρόβλημα ως πρόβλημα διάδοσης κυμάτων, όπου δυνάμεις εκτός ισορροπίας, διαδίδονται σαν κύματα τάσεων ανάμεσα σε γειτονικά στοιχεία.

Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται ευρύτατα ως εργαλείο μοντελοποίησης και ανάλυσης στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική βιομηχανία κ.ά.. Βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου λογισμικού είναι η γενικότητα και καθολικότητά του πράγμα το οποίο προσφέρει το μέγιστο δυνατό βαθμό ευελιξίας στη μοντελοποίηση και ανάλυση του προβλήματος αλλά ταυτόχρονα απαιτεί υψηλό βαθμό κατάρτισης του χρήστη.

Οι παράμετροι του προβλήματος καθορίζονται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το χρήστη και ως εκ τούτου κάθε μοντέλο δημιουργείται και επιλύεται εκ του μηδενός χωρίς σχεδόν καμία προκαθορισμένη ή προρυθμισμένη παράμετρο. Λόγω αυτής της καθολικότητας και ευελιξίας, το λογισμικό χρησιμοποιείται ευρύτατα για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς σκοπούς. Το λογισμικό βασίζεται στην υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού ανοιχτού κώδικα, PYTHON. Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.1](#) είναι εργονομικό, φιλικό στο χρήστη και ακολουθεί το βασικό πρότυπο όλων των σύγχρονων προγραμμάτων μοντελοποίησης.





Σχήμα 3.1: Περιβάλλον εργασίας πακέτου CAD-CAE

### 3.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται τα στάδια ανάπτυξης του μοντέλου και οι διάφορες παράμετροι όπως αυτές προσδιορίστηκαν με βάση τη θεωρία συμπεριφοράς των υλικών αλλά και την προϋπάρχουσα εμπειρία στη μοντελοποίηση προβλημάτων.

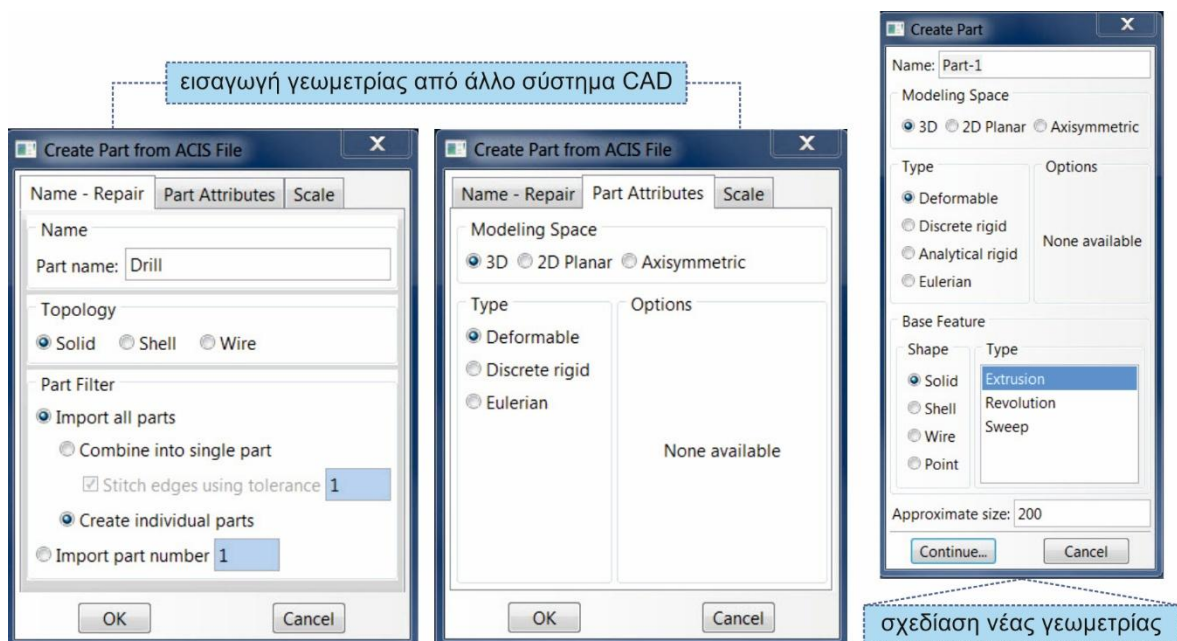
Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος εκτελέστηκαν με τη σειρά τα παρακάτω βήματα:

- Καθορισμός και εισαγωγή της γεωμετρίας των τμημάτων του μοντέλου
- Επιλογή των υλικών και καθορισμός των φυσικο-μηχανικών τους ιδιοτήτων
- Δημιουργία συναρμολογημένης διάταξης - τοποθέτηση γεωμετρικών σωμάτων στο χώρο
- Εισαγωγή των γεωμετρικών περιορισμών
- Προσδιορισμός του χρονικού βήματος
- Καθορισμός συνοριακών συνθηκών
- Καθορισμός και δημιουργία του πλέγματος στοιχείων καθώς και προσδιορισμός του τύπου των στοιχείων
- Καθορισμός των συμμετεχόντων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων της επαφής μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου.
- Arbitrary Lagrangian Eulerian μέθοδος πλεγματοποίησης

### 3.2.1 Καθορισμός και εισαγωγή γεωμετρίας τμημάτων

Το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης είναι η εισαγωγή ή η σχεδίαση με τα εργαλεία σχεδίασης του λογισμικού, των γεωμετριών που συμμετέχουν σε αυτό. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου μοντέλου και οι δύο γεωμετρίες, δηλαδή του δοκιμίου και του εργαλείου διάτρησης εισήχθησαν ως έτοιμα τριδιάστατα μοντέλα σε μορφή ACIS δηλαδή τύπου \*.sat. Οι δύο τριδιάστατες γεωμετρίες δημιουργήθηκαν στο λογισμικό Autodesk Inventor 2014. Το λογισμικό προσομοίωσης με αυτόν τον τρόπο εισαγωγής, αναγνωρίζει το στερεό σώμα αλλά όχι τα επιμέρους χαρακτηριστικά του (features), πράγμα το οποίο δεν είναι εξάλλου αναγκαίο παρά μόνο όταν υπάρχει ανάγκη τροποποίησης αυτών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 προκειμένου να εισαχθεί ή να σχεδιαστεί μια γεωμετρία στο πρόγραμμα, αρχικά καθορίζεται ο τύπος του σώματος δηλαδή:

- το αν θα συμπεριφέρεται ως απαραμόρφωτο (rigid) ή παραμορφώσιμο (deformable) σώμα,
- αν είναι δύο, τριών διαστάσεων ή αξονοσυμμετρικό (2D Planar, 3D, axisymmetric) αλλά και
- η τοπολογία του που μπορεί να διαφέρει από στερεού, κελύφους ή σύρματος.



Σχήμα 3.2: Καθορισμός τύπου και ιδιοτήτων γεωμετρίας σώματος

Τα δύο σώματα εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης ως τριδιάστατα παραμορφώσιμα στερεά, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.1. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο (Workpiece) αρχικά σχεδιάστηκε με την πραγματική του γεωμετρία όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4 και με χαραγμένο τον κάνναβο στην επιφάνεια εξόδου. Εν συνεχεία αφαιρέθηκε ο κάνναβος λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων του και της αδυναμίας του προγράμματος να εφαρμόσει ένα δομημένο πλέγμα (structured mesh) σε εκείνη την περιοχή. Με την αφαίρεση του καννάβου από το μοντέλο έγινε η παραδοχή ότι λόγω του πολύ μικρού του βάθους δεν έχει σημαντική επίδραση στην εκκίνηση και εξέλιξη του φαινομένου της παραμόρφωσης και αστοχίας του υλικού. Μια ακόμη αλλαγή στη γεωμετρία αναφορικά με το τεμάχιο ήταν η μείωση του πάχους του από 5mm σε 2.5mm και η αποκοπή ενός εξωτερικού στρώματος. Η τελική γεωμετρία έχει διαστάσεις 8.0x8.0x2.5mm. Αναφορικά με τη γεωμετρία του τρυπανιού, δεν υπήρξε σημαντική τροποποίηση, πέρα από την αφαίρεση του στελέχους του αλλά και μεγάλου μέρους των αυλακώσεων ώστε η τελική γεωμετρία να έχει μήκος (κατά τον άξονα) μόλις 13.5mm.

### 3.2.2 Επιλογή των υλικών και καθορισμός των ιδιοτήτων τους

Επόμενο βήμα μετά τον καθορισμό των γεωμετριών είναι η εισαγωγή των υλικών και η ανάθεσή τους στα αντίστοιχα επί μέρους σώματα της συνολικής συναρμολόγησης του μοντέλου. Αρχικά ονομάζονται τα υλικά και εισάγονται ως δεδομένα οι θερμο-φυσικο-μηχανικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες ανάλογα με τον τύπο της - προς προσομοίωση - διαδικασίας και τους νόμους από τους οποίους αυτή διέπεται.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο λόγω του θερμο-ελαστοπλαστικού χαρακτήρα της κατεργασίας διάτρησης ήταν απαραίτητο να δηλωθούν οι φυσικές ιδιότητες του υλικού, δηλαδή η πυκνότητα, οι μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή το μέτρο Ελαστικότητας και ο συντελεστής Poisson, το μοντέλο με βάση το οποίο το υλικό παραμορφώνεται μετά την περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης, το κριτήριο εκκίνησης της αστοχίας του υλικού αλλά και εξέλιξης αυτής, καθώς και η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και το ποσοστό του έργου πλαστικής παραμόρφωσης που μετατρέπεται σε θερμότητα.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		
ΦΥΣΙΚΕΣ		Πυκνότητα, $\rho$
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	Ελαστικότητα	Μέτρο ελαστικότητας, E
		Συντελεστής Poisson, $\nu$
	Πλαστικότητα	Μοντέλο Johnson Cook
	Μοντέλο αστοχίας	Μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson Cook (κριτήριο εκκίνησης)
		Κριτήριο εξέλιξης αστοχίας, $u^{pl}$
ΘΕΡΜΙΚΕΣ		Θερμική αγωγιμότητα k
		Ειδική θερμότητα $c_p$
		Ποσοστό έργου που μετατρέπεται σε θερμότητα

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες των υλικών που εισήχθησαν στο μοντέλο.

#### Μοντέλο πλαστικότητας Johnson Cook

Ένα κριτήριο επιλογής του μοντέλου περιγραφής της συμπεριφοράς του υλικού κατά την παραμόρφωση είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης. Ένα κατάλληλο μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως στην προσομοίωση κατεργασιών όπου ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι υψηλός, είναι το μοντέλο πλαστικότητας Johnson Cook.

Το μοντέλο Johnson Cook εκφράζει τη μεταβολή του ορίου διαρροής του υλικού συναρτήσει

- α) της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης  $\bar{\epsilon}^{pl}$ ,
- β) του ρυθμού παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}_0$  και
- γ) της θερμοκρασίας μετάβασης  $\theta_{melt}$ .

Η εξίσωση 3.1 δίνει το όριο διαρροής συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων:

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[ 1 + C \times \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

όπου A, B, C, m και n παράμετροι του υλικού προσδιορισμένες πειραματικά σε θερμοκρασία μικρότερη ή ίση της  $\theta_{trans}$  θερμοκρασίας μετάβασης [37].

Η αδιάστατη παράμετρος θερμοκρασίας  $\hat{\theta}$  ισούται με:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0, & \text{για } \theta < \theta_{\text{trans}} \\ (\theta - \theta_{\text{trans}})/(\theta_{\text{melt}} - \theta_{\text{trans}}), & \text{για } \theta_{\text{trans}} \leq \theta \leq \theta_{\text{melt}} \\ 1, & \text{για } \theta > \theta_{\text{melt}} \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

όπου:  $\theta$  είναι η τρέχουσα θερμοκρασία,

$\theta_{\text{melt}}$  η θερμοκρασία τήξης και

$\theta_{\text{trans}}$  η θερμοκρασία μετάβασης κάτω από την οποία το όριο διαρροής είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας [37].

### **Μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson Cook**

Το μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson Cook, κατ' αντιστοιχία με το μοντέλο πλαστικότητας είναι κατάλληλο για διαδικασίες που περιλαμβάνουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Το μοντέλο ενσωματώνει το κριτήριο εκκίνησης 'ζημίας' ή αστοχίας το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση της σταδιακής 'ζημίας' και αστοχίας των υλικών. Το συγκεκριμένο μοντέλο δυναμικής αστοχίας βασίζεται στην τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στα σημεία ολοκλήρωσης των στοιχείων, ενώ η αστοχία επέρχεται όταν η παράμετρος της αστοχίας υπερβαίνει τη μονάδα. Η παράμετρος αστοχίας,  $\omega$ , ισούται με:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

όπου:  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  είναι ένα διάστημα της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης,

$\bar{\epsilon}_f^{pl}$  η παραμόρφωση στην αστοχία, ενώ μέσω της άθροισης συνυπολογίζονται όλα τα επιμέρους βήματα της ανάλυσης.

Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση αστοχίας δίνεται μέσω της εξίσωσης 3.4.

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[ d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

όπου:  $d_1$ - $d_5$  είναι παράμετροι αστοχίας προσδιορισμένες πειραματικά σε θερμοκρασία ίση ή χαμηλότερη της  $\theta_{\text{trans}}$  και  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  ο ρυθμός παραμόρφωσης αναφοράς.

Όταν ικανοποιείται το παραπάνω κριτήριο αστοχίας, τα στοιχεία χάνουν την ικανότητα να φέρουν φορτία, οι τάσεις μηδενίζονται και παραμένουν μηδενικές για το υπόλοιπο της ανάλυσης.

**Διαγραφή στοιχείων:** Εάν είναι απαραίτητο, παράλληλα με το κριτήριο αστοχίας μπορεί να οριστεί και κριτήριο διαγραφής των στοιχείων, το οποίο εφόσον ικανοποιηθεί, τα στοιχεία εκτός της ικανότητας να φέρουν φορτία και να υπόκεινται σε τάσεις, χάνουν και την ικανότητα να συμπιέζονται και ως εκ τούτου διαγράφονται. Η παράμετρος που καθορίζει το πότε θα διαγραφεί ένα στοιχείο, ουσιαστικά ελέγχει το οριακό ποσοστό μέχρι το οποίο μπορούν τα στοιχεία να χάσουν τη δυσκαμψία τους.

**Κριτήριο εξέλιξης της αστοχίας:** Ο τρόπος που το στοιχείο παραμορφώνεται από την εκκίνηση μέχρι την τελική αστοχία του, καθορίζεται από αυτό το κριτήριο. Πρακτικά, το συγκεκριμένο κριτήριο αυξομειώνει την πλαστικότητα των στοιχείων. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται οι τιμές των ιδιοτήτων των Al2024-T3 και HSS που εισήχθησαν στο μοντέλο.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			AI2024-T3	HSS		
ΦΥΣΙΚΕΣ		Πυκνότητα ρ	[g/mm <sup>3</sup> ]	0.00278	0.0077	
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΟ-ΤΗΤΑ	Μέτρο ελαστικότητας, E	[Mpa]	73100	235000	
		Λόγος Poisson, ν		0.33	0.29	
	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟ-ΤΗΤΑΣ	Αρχική τάση διαρροής, A	[Mpa]	369		
		Μέτρο σκλήρυνσης, B	[Mpa]	684		
		Δείκτης θερμικής χαλά- ρωσης, m		1.7		
		Συντελεστής ρυθμού πα- ραμόρφωσης, C		0.0083		
		n		0.73		
		Θερμοκρασία μετάβασης T <sub>trans</sub>	[K]	298		
		Θερμοκρασία τήξης T <sub>melt</sub>	[K]	823		
		Ρυθμός πλαστικής παρα- μόρφωσης, $\dot{\epsilon}_0$	s <sup>-1</sup>	1		
		ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙ- ΚΗΣ ΑΣΤΟ- ΧΙΑΣ	d <sub>1</sub>		0.112	
			d <sub>2</sub>		0.123	
	d <sub>3</sub>			-1.5		
	d <sub>4</sub>			0.011		
	d <sub>5</sub>			0		
	ΘΕΡΜΙΚΕΣ		Θερμική αγωγιμότητα, k	[W/mm·k ]	150	
Ειδική θερμότητα, c <sub>p</sub>			[mJ/tonne·K ]	890		
Ποσοστό έργου που μετα- τρέπεται σε θερμότητα, γ				0.9		

Πίνακας 3.2: Τιμές ιδιοτήτων Al2024-T3 και HSS που εισήχθησαν στο μοντέλο

Αφού καθοριστούν οι ιδιότητες των υλικών, το κάθε υλικό ανατίθεται στο αντίστοιχο τμήμα του μοντέλου και τη γεωμετρία του με χρήση των εντολών “section creation” και “section assignment”. Ο λόγος για τον οποίο δε δόθηκαν περαιτέρω στοιχεία για τον ταχυχάλυβα, το υλικό δηλαδή του εργαλείου, είναι γιατί όπως εξηγείται σε επόμενη παράγραφο μετά τη δημιουργία της συναρμολογημένης διάταξης, το εργαλείο μοντελοποιήθηκε ως απαραμόρφωτο. Αυτό κατέστησε περιττό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ταχυχάλυβα οι οποίες ελέγχουν την παραμόρφωσή του.

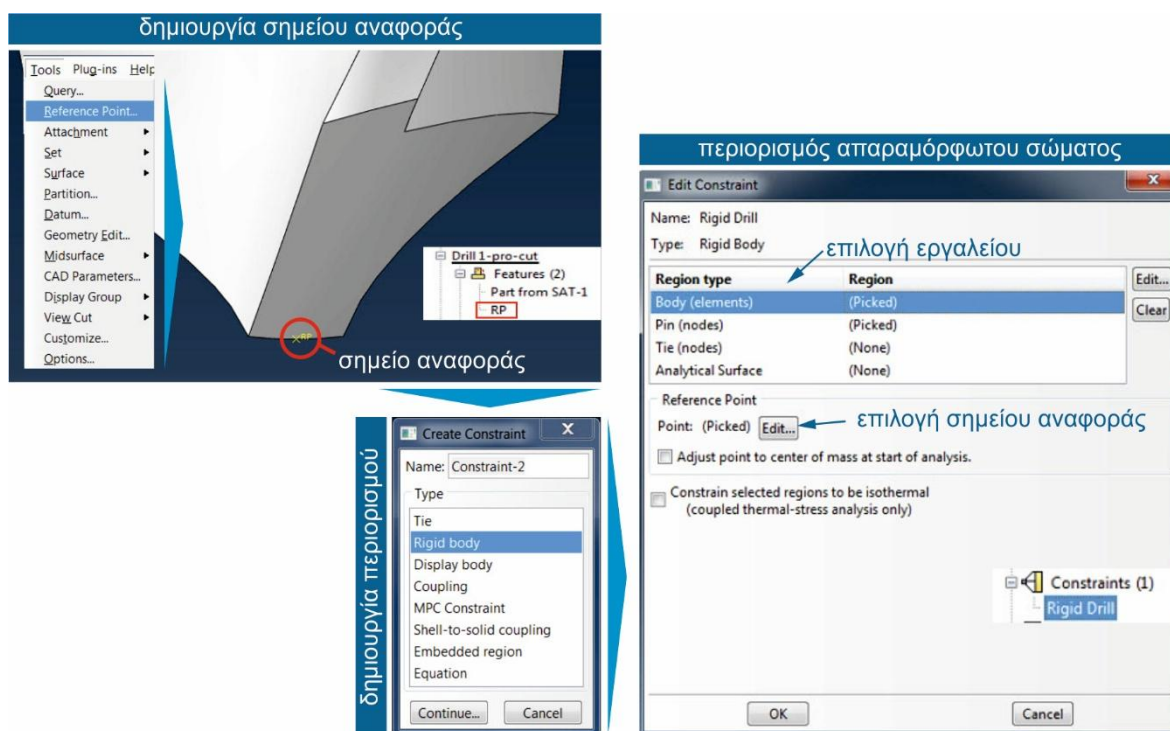
### 3.2.3 Δημιουργία συναρμολογημένης διάταξης-τοποθέτηση επί μέρους τμημάτων

Μετά τον καθορισμό των γεωμετριών, των υλικών και την ανάθεσή τους στα επιμέρους γεωμετρικά τμήματα, δημιουργείται το συναρμολογημένο μοντέλο το οποίο αποτελείται από τα ξεχωριστά σώματα που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, τα επί μέρους σώματα είναι το **δοκίμιο** και το **εργαλείο διάτρησης**.

Για λόγους απλοποίησης της προσομοίωσης, έγινε η θεώρηση ότι το εργαλείο διάτρησης αποτελεί απαραμόρφωτο στερεό σώμα. Λόγω όμως περιορισμού του λογισμικού, με βάση



τον οποίο τα στερεά σώματα πρέπει να είναι παραμορφώσιμα για να αποτελέσουν τμήματα της συναρμολόγησης, το εργαλείο διάτρησης εισήχθη στη συναρμολόγηση ως παραμορφώσιμο. Μετά την εισαγωγή του εργαλείου ως παραμορφώσιμο χρησιμοποιήθηκε ο περιορισμός στερεού σώματος “Rigid Body Constraint” με ένα σημείο αναφοράς το οποίο δημιουργήθηκε πάνω σε έναν κόμβο του εργαλείου. Με αυτόν τον τρόπο, το εργαλείο συμμετέχει στην προσομοίωση ως απαραμόρφωτο και αντιπροσωπεύεται μόνο από το σημείο αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε δύναμη ή φορτίο ασκείται στο σώμα (π.χ. μετατόπιση, ταχύτητα) ασκείται πάνω στον κόμβο του σημείου αναφοράς. Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η πιο πάνω διαδικασία.

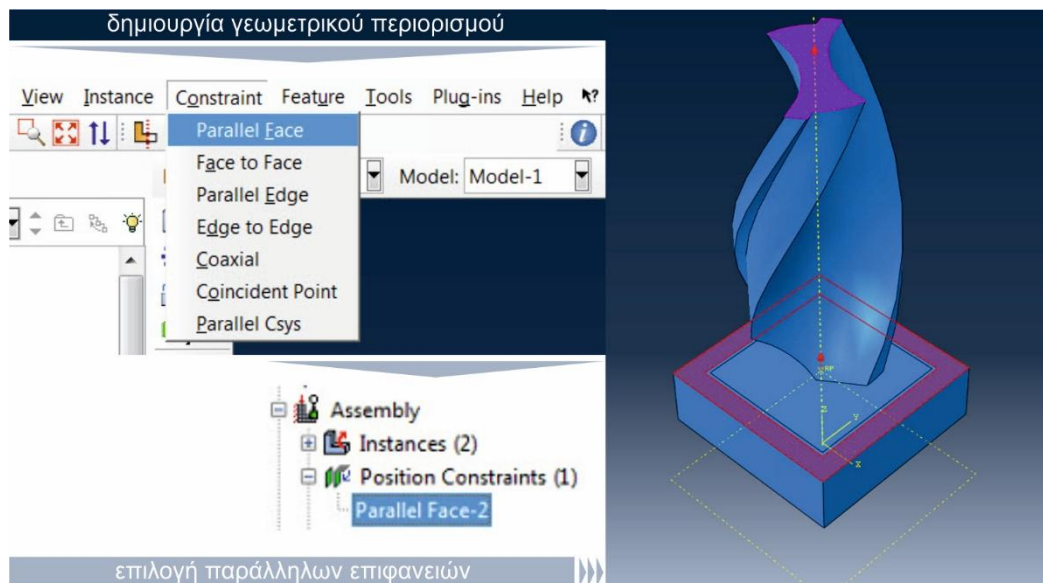


Σχήμα 3.3: Περιορισμός απαραμόρφωτου στερεού σώματος με σημείο αναφοράς

Μετά την εισαγωγή των δύο σωμάτων στη συναρμολόγηση με την εντολή “Create Instance” και τη μετατροπή του εργαλείου σε στερεό αντιπροσωπευόμενο από σημείο αναφοράς, έγινε η σχετική τοποθέτηση μεταξύ τους. Τα δύο σώματα τοποθετήθηκαν έτσι ώστε ο άξονας του εργαλείου να συμπίπτει με τον άξονα του κυλινδρικού μέρους του δοκιμίου, η κορυφή του εργαλείου να “κοιτά” προς το δοκίμιο αλλά και να έχουν μηδενική απόσταση μεταξύ τους.

### 3.2.4 Γεωμετρικοί περιορισμοί συναρμολόγησης

Όπως αναφέρθηκε, μετά τη δημιουργία του συναρμολογημένου μοντέλου τα δύο στερεά σώματα τοποθετήθηκαν ώστε να υπάρχει σχέση ομοαξονικότητας του εργαλείου με το κυλινδρικό τμήμα του δοκιμίου. Προκειμένου αυτή η σχέση να παραμείνει σταθερή καθ’ όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατεργασίας διάτρησης, εισήχθη στο μοντέλο ένας γεωμετρικός περιορισμός. Στο σχήμα 3.4 περιγράφεται η δημιουργία του γεωμετρικού περιορισμού παράλληλων επιφανειών (parallel face constraint) μεταξύ της επιφάνειας εισόδου του δοκιμίου και της κάθετης στον άξονα συμμετρίας του εργαλείου. Αυτός ο περιορισμός εξασφαλίζει την επιθυμητή συνεχή καθετότητα μεταξύ του άξονα του εργαλείου και της επιφάνειας εξόδου. Σε συνδυασμό με την πάκτωση του δοκιμίου που παρουσιάζεται αργότερα, ο περιορισμός εξασφαλίζει τη κίνηση του εργαλείου αποκλειστικά στον Z-άξονα.



Σχήμα 3.4: Γεωμετρικός περιορισμός των σωμάτων της συναρμολόγησης

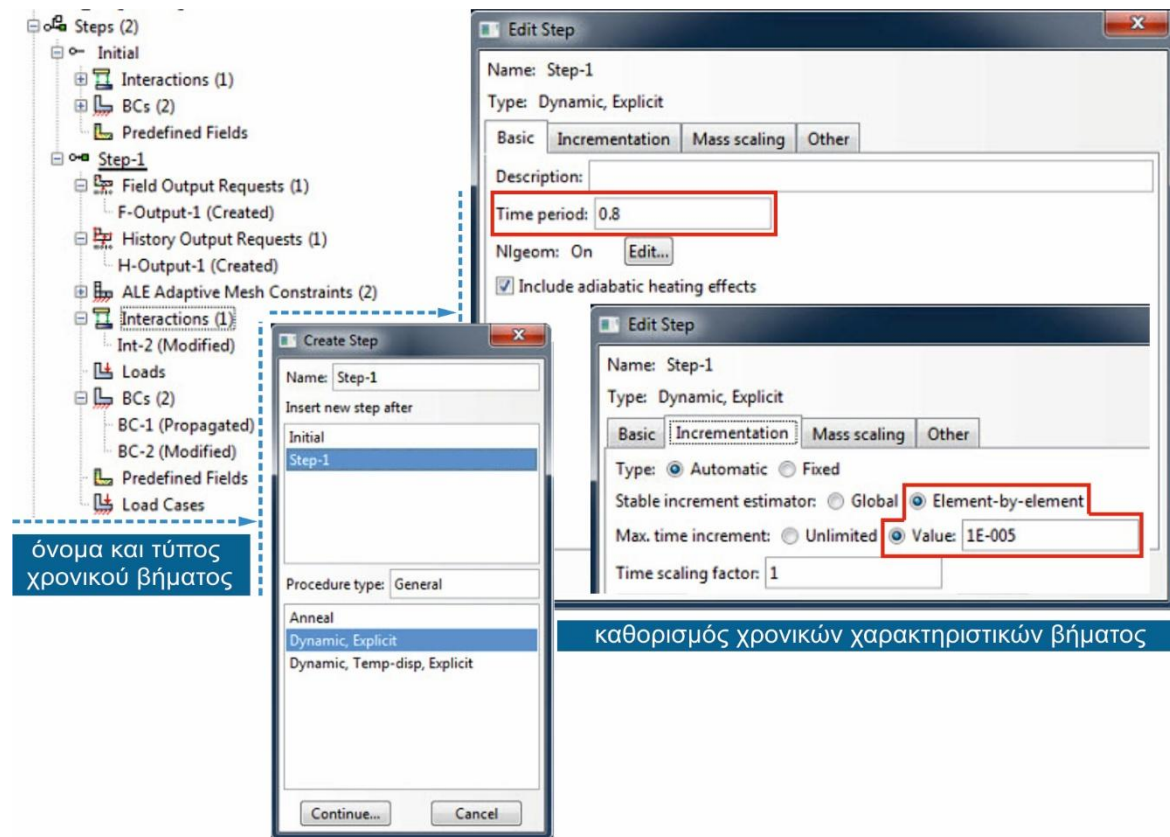
### 3.2.5 Προσδιορισμός χρονικού βήματος ανάλυσης (Analysis Time Step)

Επόμενο στάδιο στον προσδιορισμό των παραμέτρων της ανάλυσης είναι η δημιουργία του χρονικού βήματος κατά το οποίο αυτή εκτελείται. Όπως φαίνεται και στο [σχήμα 3.5](#), αρχικά με την εντολή “Create Step” δημιουργήθηκε ένα χρονικό βήμα δυναμικής άμεσης ανάλυσης (dynamic, explicit analysis). Όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 3.1, η δυναμική και άμεση μέθοδος ανάλυσης είναι η μόνη η οποία μπορεί να μοντελοποιήσει επαρκώς και ορθώς προβλήματα με υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, όπως οι κατεργασίες υλικών. Μετά την επιλογή της μεθόδου ανάλυσης στο χρονικό βήμα “Step-1” που δημιουργήθηκε, καθορίζεται η χρονική διάρκεια (time period) του βήματος, το αν στην ανάλυση θα ληφθούν υπόψη μη γραμμικά χαρακτηριστικά του προβλήματος αλλά και το αν θα συμπεριληφθούν αδιαβατικά θερμικά φαινόμενα (adiabatic heating effects) που παρουσιάζονται στα παραμορφώσιμα σώματα ανάλογα με τις θερμικές τους ιδιότητες. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, λήφθηκαν υπόψη τόσο τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά όσο και τα αδιαβατικά θερμικά φαινόμενα. Πέραν των παραπάνω βασικών ρυθμίσεων, καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο το χρονικό βήμα (time step) κατανέμεται σε χρονικά διαστήματα (time increments) με τρόπο που περιγράφεται παρακάτω.

**Χρονικό Διάστημα (Time increment):** Η διακριτοποίηση του βήματος σε διαστήματα μπορεί να γίνει κατ’ αρχήν **αυτόματα** ή με βάση κάποιον **περιορισμό** που θέτει ο χρήστης. Εφόσον επιλεγεί η διακριτοποίηση του βήματος με βάση κάποιον περιορισμό, τότε ο χρήστης πρέπει, είτε να καθορίσει το μέγεθος του **σταθερού χρονικού διαστήματος (stable time increment)** εισάγοντας μία αριθμητική τιμή, ή να δώσει την εντολή στο λογισμικό να υπολογίσει το μέγεθος του σταθερού χρονικού διαστήματος με βάση το μέγεθος των στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση, στον περιορισμένο και καθορισμένο υπολογισμό, το χρονικό διάστημα παραμένει σταθερό καθ’ όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Εφόσον επιλεγεί ο **αυτόματος υπολογισμός** του σταθερού χρονικού διαστήματος, τότε ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ανάμεσα σε έναν **καθολικό υπολογισμό (global estimator)** του χρονικού διαστήματος ή με βάση το μέγεθος των στοιχείων (**element-by-element**), όπως αυτό διαμορφώνεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο το χρονικό διάστημα δεν είναι σταθερό,



αλλά ενημερώνεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Σε αυτή την περίπτωση, ο μόνος περιορισμός που θέτει ο χρήστης είναι μία τιμή για το μέγιστο χρονικό διάστημα που επιτρέπεται να υπολογιστεί.



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικά χρονικού βήματος

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε σε όλες αποκλειστικά ο **αυτόματος τρόπος υπολογισμού** και ενημέρωσης του σταθερού χρονικού διαστήματος, καθώς και η ανανέωση και ενημέρωσή του **με βάση τα τρέχοντα στοιχεία** (element-by-element). Πέραν αυτού, για λόγους διασφάλισης της σταθερότητας της ανάλυσης και μετά από εφαρμογή της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, καθορίστηκε το μέγιστο δυνατό χρονικό διάστημα στα **0.00001s**. Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να καθορίζεται το μέγιστο χρονικό διάστημα αλλά και η λογική πίσω από την αυτόματη διακριτοποίηση με βάση τα τρέχοντα στοιχεία (element-by-element), γίνονται κατανοητά μέσα από τον ορισμό του σταθερού χρονικού διαστήματος.

**Σταθερό χρονικό διάστημα (stable time increment):** Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1, μια δυναμική άμεση επίλυση αντιμετωπίζει τα προβλήματα ως προβλήματα διάδοσης κυμάτων. Δυνάμεις εκτός ισορροπίας διαδίδονται μέσω κυμάτων τάσεων ανάμεσα σε γειτονικά στοιχεία. Θεωρώντας ένα μονοδιάστατο πρόβλημα, το σταθερό χρονικό διάστημα είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται ώστε ένα κύμα τάσης (συστολής/διαστολής όγκου, π.χ. πίεσης) να διαδοθεί σε ένα οποιοδήποτε στοιχείου του μοντέλου. Για ένα γραμμικά ελαστικό υλικό (με λόγο Poisson  $\nu=0$ ) η σχέση που εκφράζει το σταθερό χρονικό διάστημα είναι η ακόλουθη:

$$\Delta t = \frac{L^e}{c_d}$$

Εξίσωση 3.5

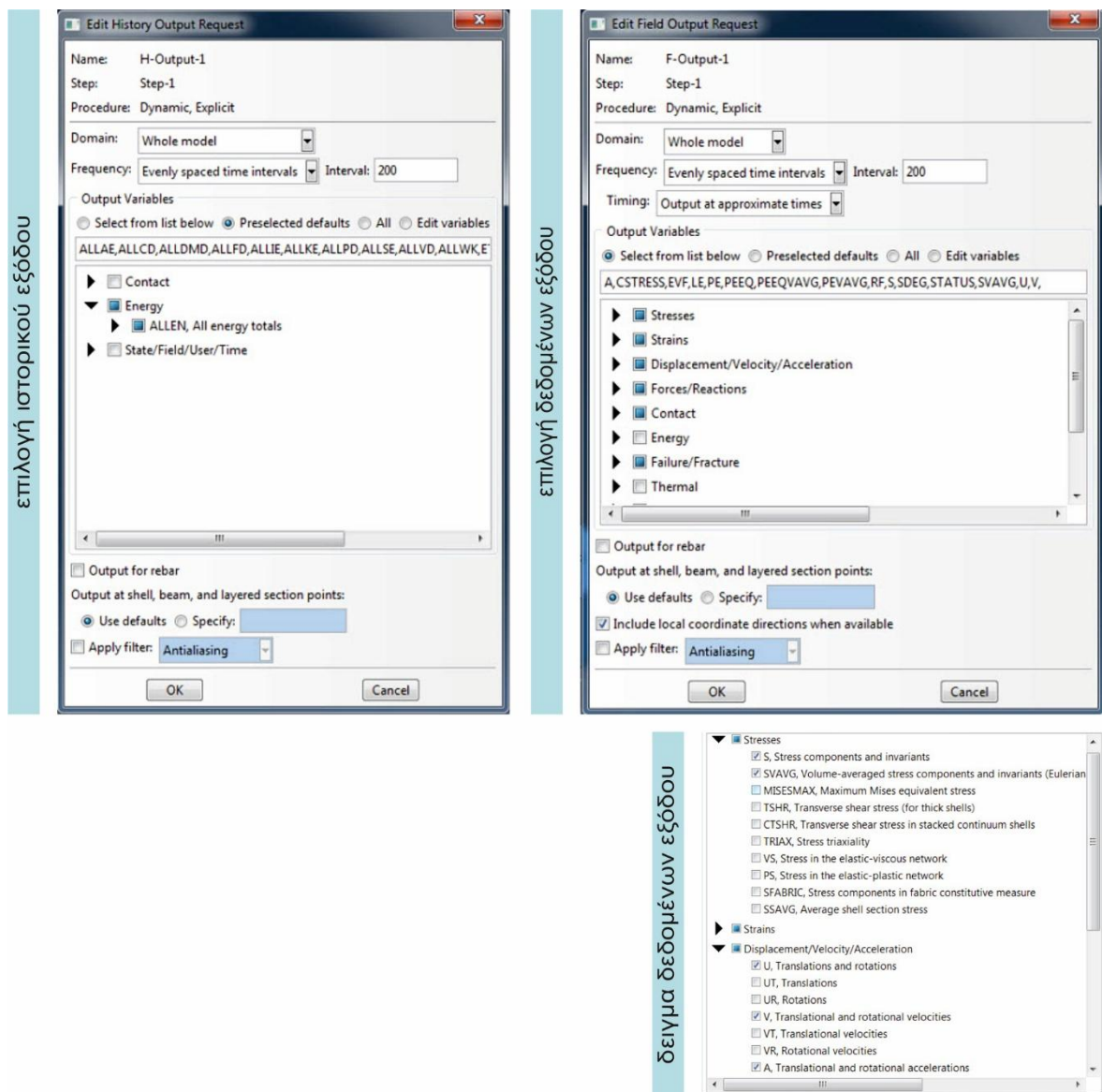
όπου:  $\Delta t$ , το σταθερό χρονικό βήμα  
 $L^e$ , το χαρακτηριστικό μήκος ενός στοιχείου του μοντέλου  
 $C_d$ , η ταχύτητα του κύματος τάσης που ισούται με:

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Εξίσωση 3.6

όπου:  $E$ , το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) και  
 $\rho$ , η πυκνότητα του υλικού.

Σε προβλήματα με μεγάλες παραμορφώσεις, η παραμόρφωση του στοιχείου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χαρακτηριστικού μήκους  $L^e$  και συνεπώς τη μείωση του σταθερού χρονικού διαστήματος. Ίδια επίδραση μπορεί να έχει η αύξηση της δυσκαμψίας του υλικού, η μείωση της πυκνότητάς του ή μείωση της συμπιεστότητάς του. Οι τρεις αυτοί παράγοντες έχουν ως συνέπεια την αύξηση της ταχύτητας του κύματος συστολής/διαστολής όγκου και επομένως τη μείωση του σταθερού χρονικού διαστήματος. Ο λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητος ο αυτόματος υπολογισμός ανάλογα με τα τρέχοντα στοιχεία, είναι ότι όπως προκύπτει από τη σχέση, όταν το μέγεθος του μικρότερου στοιχείου μειωθεί πολύ ενώ το χρονικό διάστημα παραμένει σταθερό, τότε η ταχύτητα του κύματος τάσης θα γίνει πολύ μικρή, ενώ η ταχύτητα παραμόρφωσης θα παραμένει μεγάλη. Όταν ο λόγος της ταχύτητας παραμόρφωσης προς την ταχύτητα του κύματος τάσης ξεπερνάει τη μονάδα, η ανάλυση δεν μπορεί να συνεχιστεί και τερματίζεται με σφάλμα.



Σχήμα 3.6: Επιλογή δεδομένων εξόδου

Το πρόβλημα που δημιουργείται όταν το σταθερό χρονικό διάστημα αυξάνεται ανεξέλεγκτα αφορά τη σταθερότητα της ανάλυσης η οποία διαταράσσεται όταν το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  γίνεται μεγαλύτερο από το σταθερό χρονικό διάστημα  $\Delta t_{\min}$ , λόγω της εμφάνισης ταλαντώσεων στην απόκριση του μοντέλου. Φυσικά, όσο μικρότερο το σταθερό χρονικό διάστημα, τόσο πιο πιθανό να ανακύψει το παραπάνω πρόβλημα. Αυτός είναι και ο λόγος που πρέπει να ορίζεται μια μέγιστη τιμή για το χρονικό διάστημα της ανάλυσης. Μια επίλυση λέγεται οριοθετημένη (bounded solution) όταν  $\Delta T < \Delta T_{\min}$ . Μετά τον καθορισμό του τύπου και των χαρακτηριστικών του χρονικού βήματος, επιλέχθηκαν τα δεδομένα εξόδου που θα υπολογίζονται και θα καταγράφονται κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Στο σχήμα 3.6 φαίνονται τα δύο παράθυρα του προγράμματος στα οποία επιλέγονται α. τα δεδομένα εξόδου του ιστορικού (history output) και β. τα δεδομένα εξόδου πεδίου (field output).

Στις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν ως δεδομένα εξόδου α. για το ιστορικό, όλες οι συνολικές ενέργειες (κινητική, παραμόρφωσης, ολική, κ.λπ.) και β. για το πεδίο, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7.

Κατηγορία δεδομένων εξόδου	Λέξη κλειδί	Περιγραφή
ΤΑΣΕΙΣ	S	Όλες οι συνιστώσες των κύριων τάσεων καθώς και η ισοδύναμη τάση Von Mises
	SVAVG	
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	PE	Όλες οι συνιστώσες της πλαστικής παραμόρφωσης
	PEAVG	Μέση πλαστική παραμόρφωση
	PEEQ	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
	PEEQAVG	Μέση ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
	LE	Λογαριθμική παραμόρφωση – όλες οι συνιστώσες
ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ	U	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών μετατοπίσεων
	V	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων
	A	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων
ΔΥΝΑΜΕΙΣ	RF	Δυνάμεις αντίδρασης
	NFORCE	Δυνάμεις στους κόμβους (λόγω τάσεων)
ΕΠΑΦΗ	CSTRESS	Τάσεις λόγω επαφής
	CFORCE	Δυνάμεις λόγω επαφής
ΑΣΤΟΧΙΑ	SDEG	Υποβάθμιση της δυσκαμψίας των στοιχείων
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	STATUS	Κατάσταση των στοιχείων (ύπαρξη ή μη)

Πίνακας 3.3: Δεδομένα εξόδου που επιλέχθηκαν στο μοντέλο

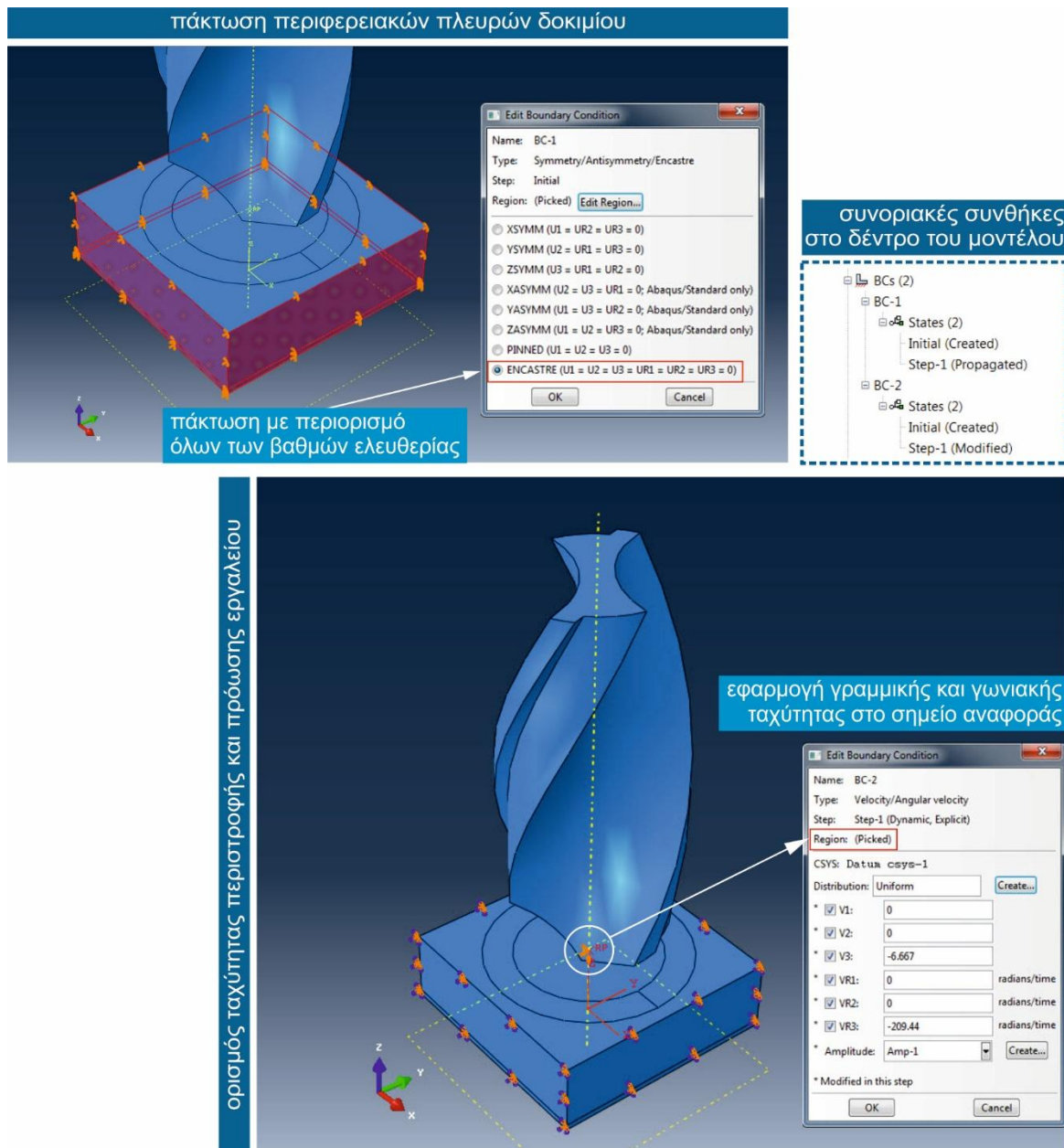
### 3.2.6 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions)

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η σωστή αναγνώριση και ορισμός των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Αυτό απαιτεί ουσιαστική κατανόηση του προβλήματος και ο βαθμός δυσκολίας αυξάνει με το βαθμό πολυπλοκότητάς του. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία μέθοδο για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου ενός προβλήματος. Οι συνοριακές συνθήκες (Dirichlet, Neumann, Robin's) ουσιαστικά αποτελούν περιορισμούς, που αποτυπώνουν τη συμπεριφορά των λύσεων των μερικών διαφορικών εξισώσεων στα όρια του πεδίου ορισμού τους.

Στην πράξη, οι συνοριακές συνθήκες αποτελούν οριακές τιμές των φορτίων (δυνάμεις, μετατοπίσεις, ταχύτητες, κ.λπ.). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και όπως περιγράφεται στο [σχήμα 3.7](#) για την πλήρη περιγραφή του προβλήματος ήταν απαραίτητος ο ορισμός:

- της στήριξης του δοκιμίου,
- των συνιστωσών της γωνιακής ταχύτητας του εργαλείου διάτρησης,
- των συνιστωσών της γραμμικής ταχύτητας του εργαλείου διάτρησης.

Όλες οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν μέσω της εντολής “Create BC” από το δέντρο του μοντέλου το οποίο φαίνεται στο [σχήμα 3.7](#). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι τρεις άξονες X, Y, Z στο λογισμικό, συμβολίζονται με τους αριθμούς 1, 2, 3 αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, οι συνιστώσες μιας δύναμης F στους άξονες X, Y, Z συμβολίζονται ως  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$  αντίστοιχα. Οι συνιστώσες της γραμμικής μετατόπισης  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , της γωνιακής  $Ur_1$ ,  $Ur_2$ ,  $Ur_3$ , της γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $Vr_1$ ,  $Vr_2$ ,  $Vr_3$  κ.λπ.



Σχήμα 3.7: Ορισμός συνοριακών συνθηκών στο εργαλείο και το δοκίμιο

Αναφορικά με τη στήριξη του δοκιμίου, αυτό είναι ουσιαστικά πακτωμένο αφού μέσω της κοχλιοσύνδεσης της βάσης με το έλασμα σύσφιξης και της εγκοπής αποτροπής στρέψης, έχουν περιοριστεί και οι έξι βαθμοί ελευθερίας του. Αυτό είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο τρόπος που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η πάκτωση των περιφερειακών πλευρών του δοκιμίου. Αυτό επιτεύχθηκε με την εντολή Encastre (σχήμα 3.7) η οποία εφαρμόστηκε στις πλευρές αυτές μηδενίζοντας τις τρεις συνιστώσες των γραμμικών και γωνιακών μετατοπίσεων και περιορίζοντας έτσι τους τρεις βαθμούς ελευθερίας των πλευρών (τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν δεν έχουν περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας) και κατά συνέπεια όλου του δοκιμίου. Οι συνοριακές συνθήκες στήριξης του δοκιμίου εφαρμόστηκαν στο αρχικό, προϋπάρχον χρονικό βήμα, άρα μπορούν να θεωρηθούν ως αρχικές συνθήκες οι οποίες μεταβιβάζονται και στο Step-1, το κυρίως χρονικό βήμα της ανάλυσης.



Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφουν την κίνηση του εργαλείου και αφορούν στην περιστροφή και μεταφορά του περί και κατά τον Z – άξονα αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το εργαλείο διάτρησης έχει εισαχθεί στη συναρμολόγηση ως παραμορφώσιμο στερεό και στη συνέχεια μέσω ενός σημείου αναφοράς μοντελοποιήθηκε ως απαραμόρφωτο. Με τη μετατροπή αυτή και τη σύμβαση του απαραμόρφωτου στερεού που εκπροσωπείται από το σημείο αναφοράς, όλα τα φορτία που εφαρμόζονται στο εργαλείο πρέπει να εφαρμόζονται σημειακά στο σημείο αναφοράς. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7 για τη μοντελοποίηση της μεταφορικής κίνησης του εργαλείου, μηδενίστηκαν οι συνιστώσες  $V_1$ ,  $V_2$  και έτσι περιορίστηκε η κίνηση του εργαλείου μόνο στο Z-άξονα, ενώ στη  $V_3$  δόθηκε η τιμή της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου σε mm/sec. Σε σχέση με την περιστροφή του εργαλείου γύρω από τον άξονα z, μηδενίστηκαν οι συνιστώσες  $Vr_1$ ,  $Vr_2$ , ενώ στην  $Vr_3$  δόθηκε η τιμή της ταχύτητας περιστροφής σε rad/sec.

Στον πίνακα 3.4 δίδονται οι τιμές των ταχυτήτων  $V_3$  και  $Vr_3$  για καθένα από τα εννέα πειράματα μετά τη μετατροπή των μονάδων από mm/min σε mm/sec για την ταχύτητα πρόωσης και από rpm σε rad/sec για την ταχύτητα περιστροφής. Να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται σε όλα τα παραπάνω σχήματα, η θετική κατεύθυνση του άξονα Z έχει οριστεί αντίθετη με τη φορά της πρόωσης διεύθυνσης στο τεμάχιο για λόγους συμφωνίας με την αντίστοιχη σύμβαση στις μηχανουργικές κατεργασίες.

	$V_3$	$Vr_3$
	mm/sec	rad/sec
1	-3,33	-209,44
2	-5,00	-314,16
3	-6,67	-418,88
4	-5,00	-209,44
5	-7,50	-314,16
6	-10,00	-418,88
7	-6,67	-209,44
8	-10,00	-314,16
9	-13,33	-418,88

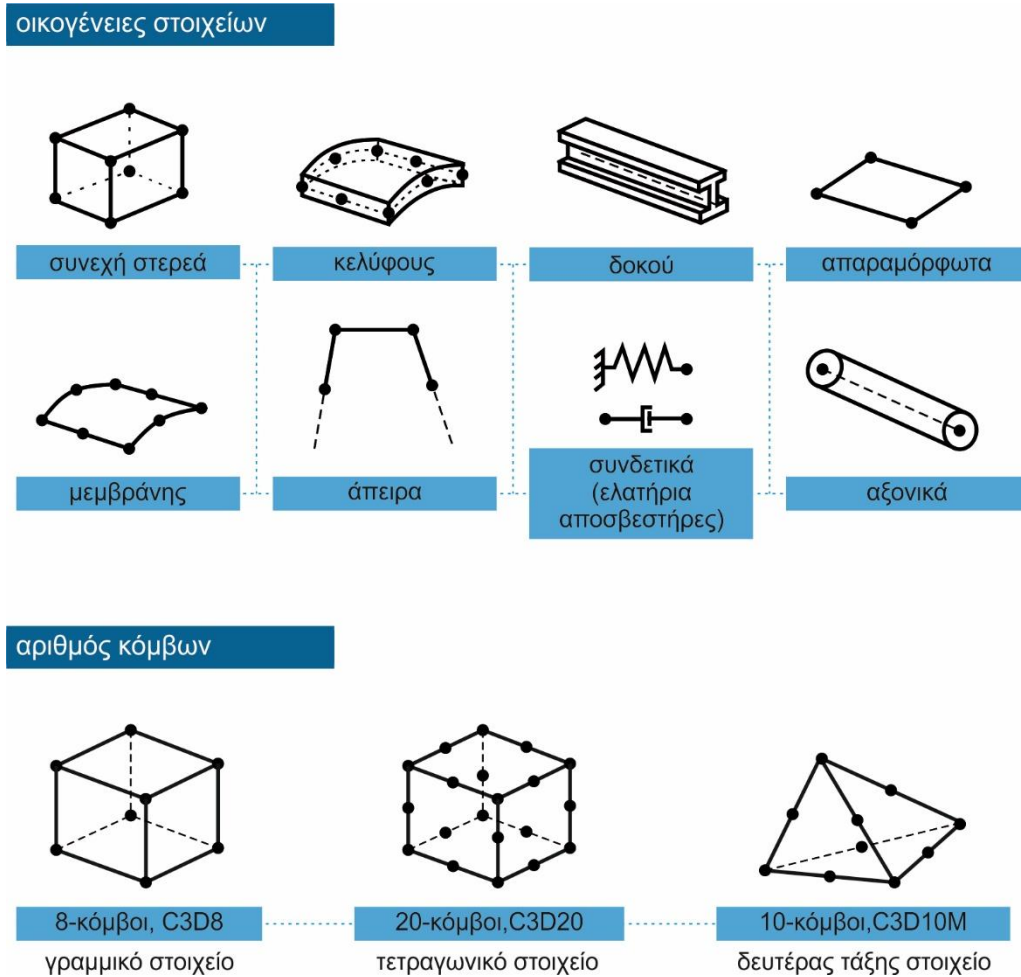
Πίνακας 3.4: Τιμές γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας

### 3.2.6 Πλεγματοποίηση εργαλείου και δοκιμίου

Θεμελιώδη λίθο της Μ.Π.Σ αποτελεί ο χωρισμός των συνεχών σωμάτων που συμμετέχουν στην προσομοίωση σε μικρά διακριτά γεωμετρικά σχήματα, δηλαδή κομμάτια του σώματος. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση των προβλημάτων με μία μητρωική μέθοδο. Τα συνεχή σώματα χωρίζονται σε τετραεδρικά ή εξαεδρικά στοιχεία (elements) τα οποία έχουν πλευρές, ακμές και κορυφές. Οι κορυφές των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζονται κόμβοι της κατασκευής (σώματος) και λειτουργούν ως τέτοιοι αφού ενώνουν τις ακμές των διαφορετικών στοιχείων μεταξύ τους. Σκοπός της μεθόδου είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος με ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που έχουν ως άγνωστους τις μετατοπίσεις αυτών των κόμβων, κατ' αντιστοιχία της επίλυσης ενός δικτυώματος. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε κάποιες κατηγορίες στοιχείων, ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να μοντελοποιηθεί. Οι κατηγορίες χωρίζονται με βάση κάποιες ιδιότητες των στοιχείων που είναι αυτές οι οποίες χαρακτηρίζουν και καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η κατηγοριοποίηση των στοιχείων γίνεται με βάση:

- την οικογένεια στην οποία ανήκουν,
- τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας στους κόμβους,
- τον αριθμό των κόμβων,
- το βαθμό ολοκλήρωσης.

Στο σχήμα 3.8 φαίνονται οι διάφορες οικογένειες στοιχείων αλλά και ο διαχωρισμός των συνεχών στερεών στοιχείων με βάση τον αριθμό των κόμβων.



Σχήμα 3.8: Κατηγοριοποίηση στοιχείων με βάση την οικογένεια και τον αριθμό των κόμβων

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, επιλέχθηκαν τα C3D8R **τριδιάστατα εξαεδρικά** στοιχεία τριών βαθμών ελευθερίας και 8-κόμβων λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν για δημιουργία ενός δομημένου πλέγματος καθώς και της καλής συμπεριφοράς όσον αφορά τη διαγραφή.

Πέραν αυτού, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι **μειωμένης ολοκλήρωσης** (reduced integration) προκειμένου αφενός να επιταχυνθεί η επίλυση, να διασφαλιστεί η ταχύτερη σύγκλιση αλλά και λόγω του ότι η εφαρμογή πλεγματοποίησης ALE, η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω, επιβάλλει τη χρήση αυτού του τύπου των στοιχείων. Στο σχήμα 3.9 εξηγείται η κωδική ονομασία των συγκεκριμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.9: Επεξήγηση κωδικής ονομασίας πεπερασμένων στοιχείων



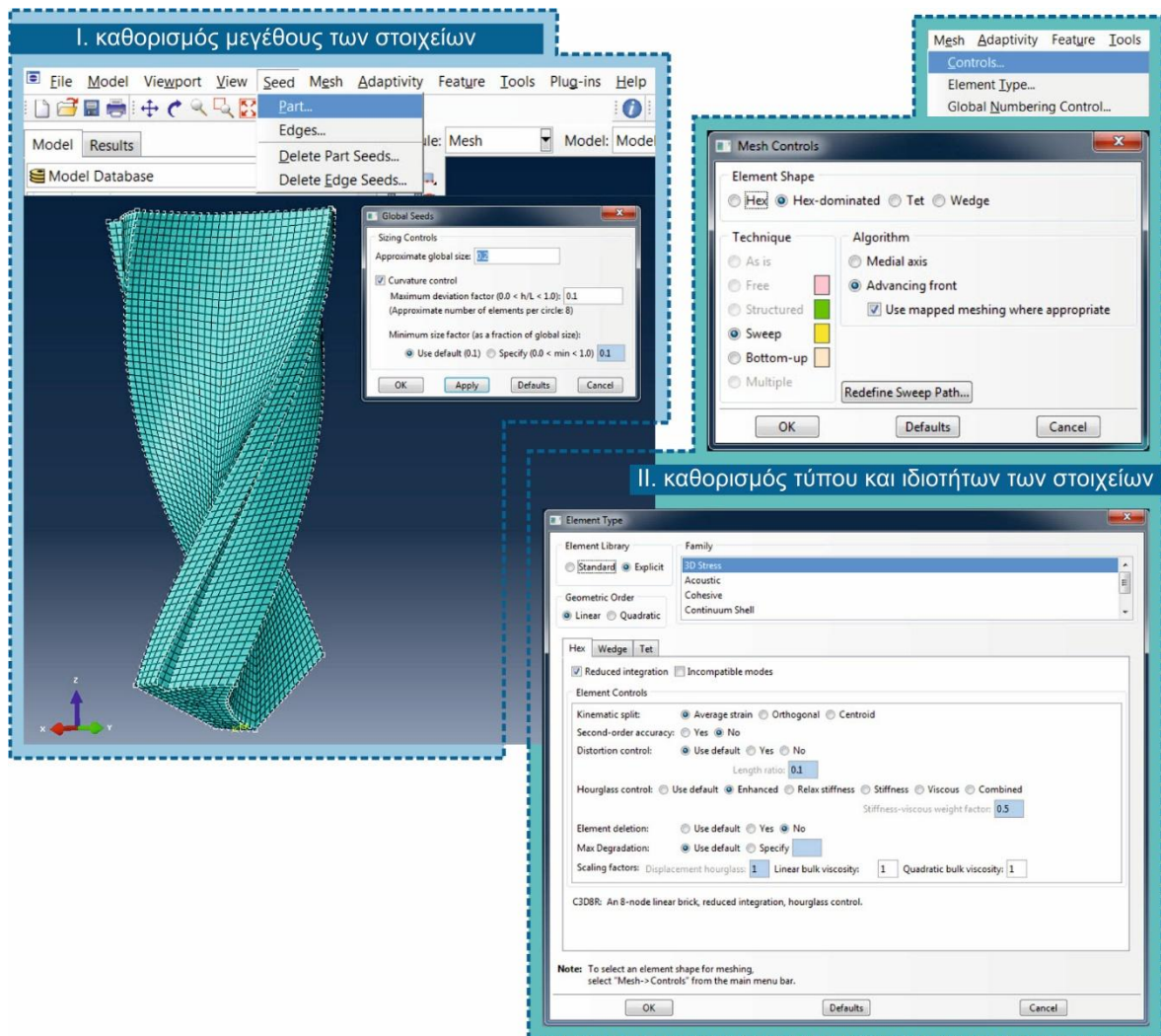
Μετά την επιλογή του γενικού τύπου των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, έγινε η επιλογή των ειδικών χαρακτηριστικών των στοιχείων του πλέγματος του εργαλείου καθώς και ο σχηματισμός του πλέγματος.

**Σχηματισμός πλέγματος:** Αρχικά, μέσω της εντολής `Seed → Part → Global Seeds`, ορίστηκε το μέγεθος των στοιχείων στο εργαλείο διάτρησης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.10](#), σύμφωνα και με το μέγεθος των στοιχείων που επρόκειτο να οριστούν για το πλέγμα του δοκιμίου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ώστε να βρεθεί το κατάλληλο μέγεθος με βάση το προαναφερθέν κριτήριο, αλλά και με σκοπό το σχηματισμό ενός συνεχούς και συνεκτικού πλέγματος. Στη συνέχεια, μέσω της επιλογής `Mesh → Controls` επιλέχθηκε η μέθοδος που θα χρησιμοποιήσει το λογισμικό για την ανάπτυξη του πλέγματος, με την επιλογή 'Sweep' να είναι η καταλληλότερη για τη δημιουργία ενός κατά το δυνατόν πιο δομημένου πλέγματος. Η εντολή "Structured" δεν ήταν διαθέσιμη λόγω της γεωμετρίας του εργαλείου και ενώ έγιναν δοκιμές για χωρισμό της γεωμετρίας προκειμένου να επιτευχθεί τελικά η δημιουργία ενός καθαρά δομημένου πλέγματος, καμία δεν ήταν επιτυχής.

Τελευταίο βήμα στο σχηματισμό του πλέγματος είναι ο καθορισμός των πιο ειδικών χαρακτηριστικών των στοιχείων με χρήση της εντολής `Mesh → Element type`. Επιλέχθηκε ο γενικός τύπος `C3D8R` μέσω των επιλογών `Element library → Explicit, Geometric Order → Linear, Hexaedral elements (Hex), Reduced Integration`. Εφόσον πρόκειται για το εργαλείο διάτρησης, το οποίο έχει οριστεί ως απαραμόρφωτο, η μόνη παράμετρος που επηρεάζει την ανάλυση από τις υπόλοιπες επιλογές που φαίνονται στο [σχήμα 3.10](#) είναι αυτής της διαγραφής των στοιχείων που πρέπει να είναι απενεργοποιημένη, δηλαδή να είναι επιλεγμένο το 'No'. Οι υπόλοιπες επιλογές παρουσιάζονται στη διαδικασία χωρισμού της γεωμετρίας του δοκιμίου, όπου και είναι απαραίτητη η ρύθμισή τους.

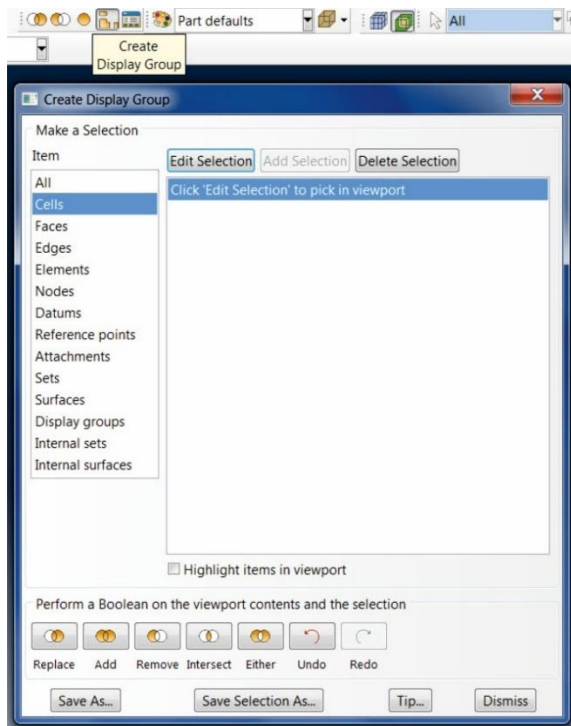
Η ίδια σχεδόν διαδικασία ακολουθήθηκε προκειμένου να σχηματιστεί το πλέγμα του δοκιμίου. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, για λόγους επιτάχυνσης της επίλυσης μεταβλήθηκε η γεωμετρία του δοκιμίου ώστε τελικά να αποτελείται από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων (8mm)x(8mm)x(2.5mm). Πέραν αυτού, το δοκίμιο χωρίστηκε σε τρία τμήματα (όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.12](#)), προκειμένου να έχουν διαφορετικό μεταξύ τους πλέγμα.

Ο χωρισμός της γεωμετρίας σε δύο ή περισσότερα τμήματα γίνεται στο περιβάλλον `Mesh`, με την εντολή **Partition**. Εν προκειμένω, το εσωτερικό τμήμα του δοκιμίου ορίστηκε ως ένας δακτύλιος με εσωτερική (5mm) και εξωτερική διάμετρο (7mm) εκατέρωθεν της περιφέρειας της οπής (6mm) ώστε να καλύπτει όλη την πιθανή περιοχή διαμόρφωσης της απόληξης διάτρησης. Στο εσωτερικό του δακτυλίου δημιουργήθηκε κυλινδρικό κέλυφος διαμέτρου 5mm (ίσης με την εσωτερική διάμετρο του δακτυλίου). Ο εσωτερικός κύλινδρος όπως και ο δακτύλιος δημιουργήθηκαν αντί παραλληλεπιπέδων γεωμετριών ώστε να ταυτίζονται με τη γεωμετρία της οπής, προκειμένου το πλέγμα να δημιουργηθεί "ακολουθώντας" αυτή τη γεωμετρία. Αυτό εξασφάλισε την πολύ καλή προσέγγιση του κυλινδρικού τοιχώματος της οπής μετά την αφαίρεση του υλικού στην προσομοίωση της διάτρησης. Το εξωτερικό τμήμα του δοκιμίου μετά το χωρισμό είναι το τοίχωμα που προκύπτει από τη λογική αφαίρεση (Boolean subtraction) του εσωτερικού δακτυλίου και κυλίνδρου από το συνολικό δοκίμιο. Τα τμήματα των σωμάτων (Part Instances) που προκύπτουν μετά το χωρισμό τους ονομάζονται "Cells".



Σχήμα 3.10: Πλεγματοποίηση εργαλείου διάτρησης

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πλεγματοποίησης του δοκιμίου καθώς και στον ορισμό της επιφάνειας επαφής του δοκιμίου με το εργαλείο, κατέστη απαραίτητη η επιλογή των γεωμετρικών στοιχείων που θα είναι ορατά στο παράθυρο προβολής προκειμένου να διευκολυνθεί η επιλογή των ακμών του εσωτερικού στη μία και του εξωτερικού τμήματος του δοκιμίου στην άλλη περίπτωση. Η επιλογή συγκεκριμένων γεωμετρικών στοιχείων προς προβολή πραγματοποιείται με την εντολή “Create Display Group”.



Σχήμα 3.11: Επιλογή ομάδας γεωμετρικών στοιχείων για προβολή / απόκρυψη

Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε και σε άλλες περιπτώσεις. Με αυτή την εντολή υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγούν στοιχεία όπως μία ή περισσότερες επιφάνειες, ακμές, σετ γεωμετρικών στοιχείων, τμήματα της συναρμολόγησης (σώματα), κελύφη (cells) ή ακόμα και στοιχεία και κόμβοι των στοιχείων. Τα στοιχεία που επιλέγονται μπορούν, μέσω των τελεστών αντικατάστασης (replace), πρόσθεσης (add), αφαίρεσης (remove), τομής (intersect) ή ένωσης (either), όπως αυτοί ορίζονται στις επιλογές του προγράμματος, να προβληθούν ή να αποκρυφτούν από το παράθυρο προβολής. Η διαδικασία αυτή δε διαγράφει τα γεωμετρικά στοιχεία, παρά μόνο τα ενεργοποιεί/απενεργοποιεί ώστε να απλοποιείται κάθε φορά, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, η αναπαράσταση του μοντέλου. Στο [σχήμα 3.11](#) φαίνεται το παράθυρο επιλογής των γεωμετρικών στοιχείων για προβολή.

Πρώτο βήμα στη διαδικασία χωρισμού του δοκιμίου ήταν ο χωρισμός των ακμών σε θεμελιώδη στοιχεία που λειτουργούν ως οδηγοί για το χωρισμό του τριδιάστατου σώματος. Όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.12](#) ο χωρισμός έγινε με επιλογή των ακμών και καθορισμό του μεγέθους του θεμελιώδους στοιχείου μέσω της εντολής Seed→Edges. Στο παράθυρο της εντολής δίνεται η δυνατότητα καθορισμού είτε του μεγέθους ή του αριθμού των στοιχείων ώστε να ισομοιραστεί το μήκος της ακμής σε αυτόν. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πλέγμα στα τρία κελύφη του δοκιμίου μετά το Partition, δημιουργήθηκε ξεχωριστά προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαραίτητη ακρίβεια της ανάλυσης αλλά και να μειωθεί, κατά το δυνατόν, ο χρόνος προσομοίωσης. Λόγω του ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι η περιοχή στην οποία σχηματίζεται η οπή καθώς και η περιφέρεια στα όριά της, δηλαδή η περιοχή που υπερκαλύπτει το δακτύλιο και τον εσωτερικό κύλινδρο, το πλέγμα σε αυτό έγινε με μικρότερο μέγεθος στοιχείων. Αντίθετα, το πλέγμα του εξωτερικού τμήματος έγινε πιο αραιό (coarse mesh) για να μειωθεί ο χρόνος προσομοίωσης, εφόσον το τμήμα αυτό δεν επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

**Διερεύνηση μεγέθους στοιχείων δοκιμίου:** Προκειμένου να καθοριστεί το μέγεθος των στοιχείων του εσωτερικού τμήματος πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές για να φανεί η επίδραση του μεγέθους στα αποτελέσματα της ανάλυσης και κύρια στις μετατοπίσεις των κόμβων του μοντέλου. Μετά την εξέταση και σύγκριση των αποτελεσμάτων αλλά και το συνυπολογισμό της επίδρασης του μεγέθους των στοιχείων στο χρόνο προσομοίωσης, επιλέχθηκε το τελικό μέγεθος, δηλαδή το μήκος της ακμής του στοιχείου, στα 100μm. Στον [πίνακα 3.5](#) φαίνονται οι χρόνοι προσομοίωσης για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις στις οποίες εξετάστηκε το μοντέλο, ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων. Προκειμένου να επιταχυνθεί η σύγκριση, χρησιμοποιήθηκε μία περίπτωση (test case) ως αναφορά, καταγράφηκαν οι χρόνοι σε αυτήν και έπειτα υπολογίστηκαν για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις κατ' αντίστροφη αναλογία με την ταχύτητα πρόωσης του κοπτικού εργαλείου. Αυτός φυσικά

ήταν ένας προσεγγιστικός υπολογισμός των υπόλοιπων χρόνων προσομοίωσης, όμως εκτιμήθηκε ότι δεν είχαν μεγάλη απόκλιση από τους πραγματικούς.

Job name	Μέγεθος στοιχείου	Πραγματικός χρόνος								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	μm	hours								
End 9	70	72	48	36	48	32	24	36	24	18
End 6	80	42	28	21	28	18.7	14	21	14	10.5
End 3	100	20	13.3	10	13.3	8.9	6.7	10	6.7	5
End 7	150	3.8	2.5	1.9	2.5	1.7	1.3	1.9	1.3	1.0
End 8	200	1.6	1	0.8	1.1	0.7	0.5	0.8	0.53	0.4

Πίνακας 3.5: Χρόνοι εκτέλεσης προσομοίωσης κάθε πειράματος με διαφορετικά μεγέθη θεμελιωδών στοιχείων του πλέγματος

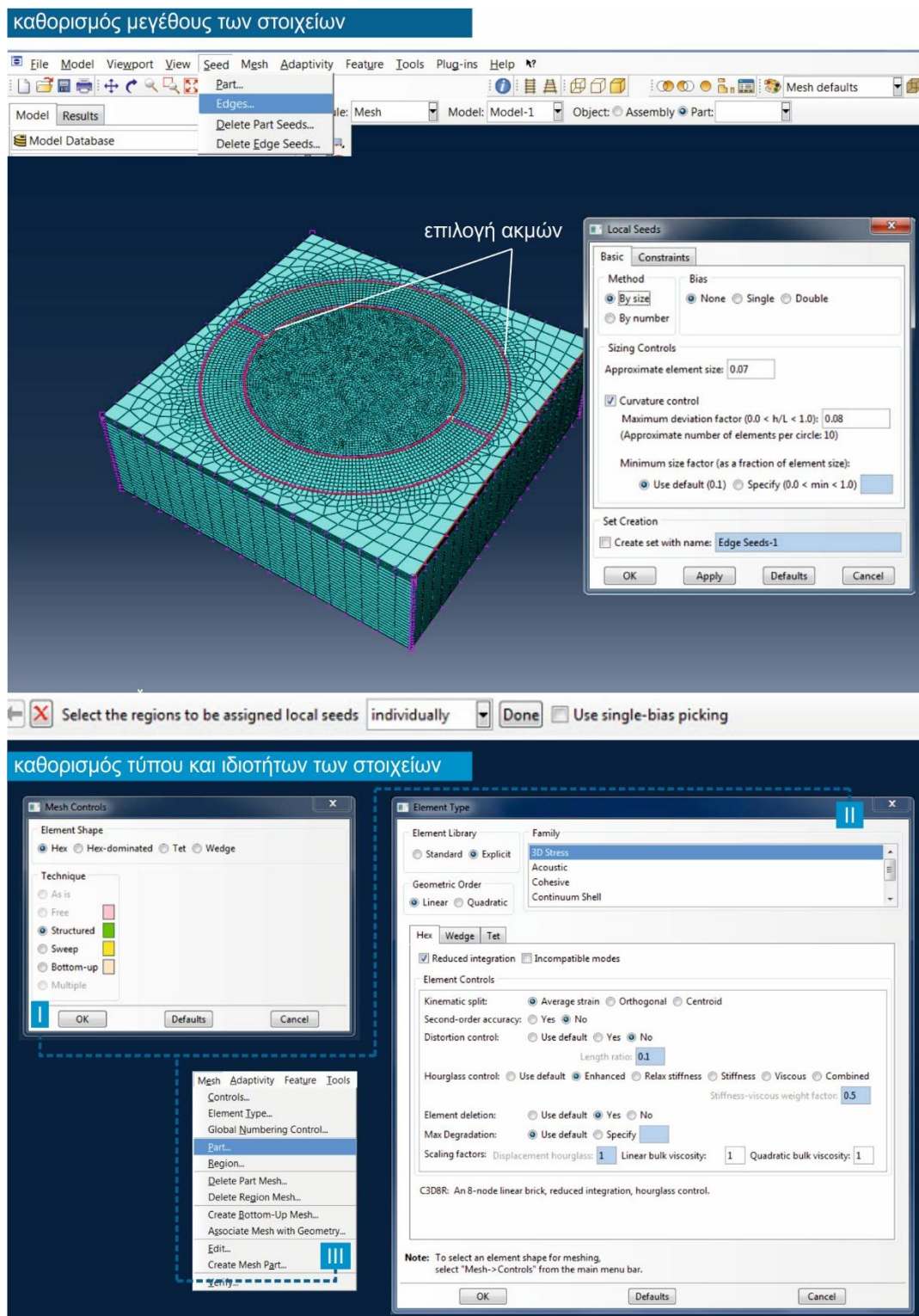
Αφού προσδιορίστηκε το μέγεθος των στοιχείων του εσωτερικού δακτυλίου και κυλίνδρου (100μm) και του εξωτερικού (200μm) τμήματος του δοκιμίου, επιλέχθηκε η μέθοδος χωρισμού και σχηματισμού του πλέγματος μέσω του “Mesh Controls” που αναφέρθηκε παραπάνω. Για το εσωτερικό τμήμα επιλέχθηκε η μέθοδος “Structured” ενώ για το εξωτερικό η μέθοδος “Sweep”. Έπειτα από την επιλογή της μεθόδου, καθορίστηκε ο τύπος και τα χαρακτηριστικά των πεπερασμένων στοιχείων με την εντολή “Element type”. Ομοίως με το κοπτικό εργαλείο, επιλέχθηκαν και στο δοκίμιο εξασδρικά γραμμικά δυναμικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης, τα C3D8R. Σε αντίθεση με το εργαλείο διάτρησης, τα στοιχεία του πλέγματος του δοκιμίου επιλέχθηκε να μην υπόκεινται σε έλεγχο της παραμόρφωσης (no distortion control), λόγω του ότι αυτό ήταν προαπαιτούμενο ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή πλεγματοποίησης ALE. Τα στοιχεία C3D8R ανήκουν στην ομάδα στοιχείων C3D8 με επιπρόσθετο χαρακτηριστικό τη μειωμένη ολοκλήρωση. Τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με τα πλήρους ολοκλήρωσης (C3D8):

- Μειώνουν το χρόνο προσομοίωσης.
- Αποτρέπουν το φαινόμενο του shear locking κατά το οποίο μπορεί σε ένα στοιχείο ή μια κατασκευή που υπόκειται σε καθαρή κάμψη, να εμφανίζονται δυνάμεις στρέψης οι οποίες κατά βάση δεν υπάρχουν, ώστε η απόκριση της κατασκευής και η παραμόρφωσή της να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.
- Έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά σε σχέση με τα πλήρους ολοκλήρωσης, όταν χρησιμοποιούνται σε όλκιμα υλικά.

Το μοναδικό μειονέκτημα των στοιχείων μειωμένης ολοκλήρωσης σε σχέση με τα πλήρους, είναι ότι εισάγουν το φαινόμενο “Hourglass”. Η μειωμένη ολοκλήρωση των στοιχείων έγκειται στο ότι ένα στοιχείο π.χ. που έχει τέσσερις κόμβους, αντί να έχει ένα 2x2 σχήμα ολοκλήρωσης (πλήρης ολοκλήρωση) έχει 1x1, δηλαδή μειωμένη ολοκλήρωση με ένα μόνο στοιχείο ολοκλήρωσης στο κέντρο. Αυτό έχει ως συνέπεια το στοιχείο να παραμορφώνεται με μηδενική ενέργεια παραμόρφωσης λόγω του ότι προκύπτουν μη μηδενικές μετατοπίσεις που αντιστοιχούν σε μηδενικές παραμορφώσεις και άρα μηδενική ενέργεια παραμόρφωσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανεξέλεγκτη παραμόρφωση του στοιχείου χωρίς να απαιτείται ενέργεια για αυτή.



Οι παραμορφώσεις αυτού του τύπου λέγονται παραμορφώσεις “ψευδούς μορφής” (spurious modes ή hourglass modes ή zero energy modes). Σε μια τέτοια κατάσταση το μητρώο δυσκαμψίας  $[K]$  δεν είναι θετικά ορισμένο. Προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο hourglass επιλέγεται ο ενισχυμένος έλεγχός του μέσω της εντολής “Enhanced hourglass control”.



Σχήμα 3.12: Πλεγματοποίηση δοκιμίου

Τέλος, αντίθετα με τα στοιχεία του εργαλείου διάτρησης στο δοκίμιο υπάρχει απαίτηση για διαγραφή στοιχείων, οπότε ενεργοποιείται η εντολή “Element Deletion” με επιλογή του “Yes”. Ενεργοποιώντας την εντολή για διαγραφή στοιχείων, ζητείται από το λογισμικό η

ρύθμιση της παραμέτρου “max degradation, D”. Με αυτή την παράμετρο ρυθμίζεται το ποσοστό κατά το οποίο τα στοιχεία επιτρέπεται να χάσουν τη δυσκαμψία της πριν διαγραφούν. Δηλαδή, δίνοντας στην παράμετρο την τιμή 0.9, σημαίνει ότι πριν διαγραφούν τα στοιχεία έχουν χάσει κατά 90% τη δυσκαμψία τους και έχουν, κατά 10% της ονομαστικής, ικανότητα να φέρουν φορτία.

### 3.2.7 Ορισμός επαφής μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου

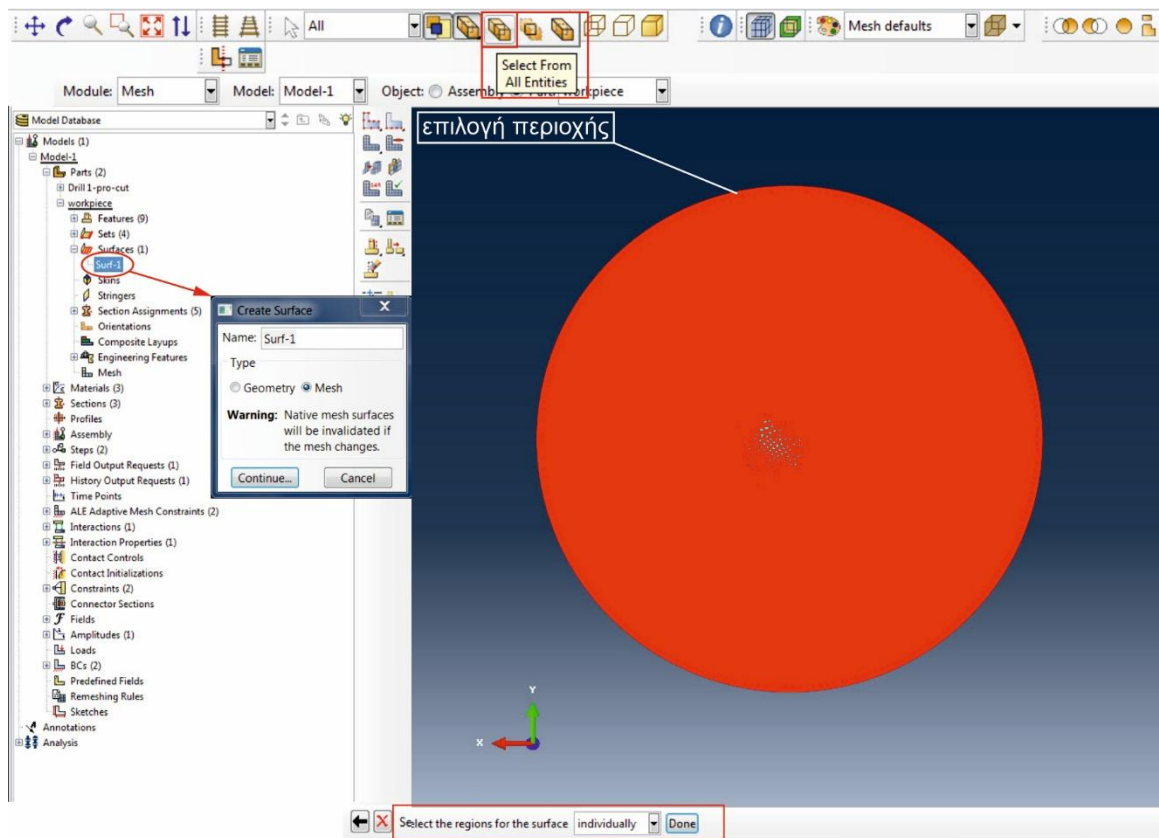
Ο ορισμός της επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου στην προσομοίωση μιας διαδικασίας αφαίρεσης υλικού, είναι ίσως η σημαντικότερη και σίγουρα απαραίτητη προϋπόθεση ώστε τα στοιχεία του ενός σώματος να αλληλεπιδράσουν με τα στοιχεία του άλλου, προσομοιώνοντας την επαφή του ενός υλικού με το άλλο στην πραγματικότητα. Χωρίς τον ορισμό της επαφής, το λογισμικό αναγνωρίζει απλά γεωμετρίες, χωρισμένες σε πεπερασμένα στοιχεία οι οποίες μπορούν να διαπερνούν η μία την άλλη δίχως να επηρεάζονται ή να μεταβάλλονται. Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε η επαφή μεταξύ ζευγών επιφανειών στοιχείων (element surfaces). Ως πρώτη επιφάνεια ορίστηκε η επιφάνεια του εργαλείου διάτρησης, περιλαμβάνοντας όλες τις εξωτερικές επιφάνειες του τρυπανιού εφόσον όλες έρχονται σε επαφή με το υλικό στο οποίο εισέρχονται.

**Δημιουργία εσωτερικής επιφάνειας δοκιμίου:** Προκειμένου να οριστεί η δεύτερη επιφάνεια επαφής έπρεπε να επιλεγεί κάποια επιφάνεια από το δοκίμιο και συγκεκριμένα αυτή που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο κατά την κοπή. Η ιδιαιτερότητα της κατεργασίας διάτρησης σε σχέση π.χ. με την κατεργασία φραιζαρίσματος, είναι ότι στο φραιζάρισμα στις περιπτώσεις που ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος στο δοκίμιο, όπως στη διάτρηση, η διεύθυνση της πρόωσης του εργαλείου είναι στην ίδια ευθεία με τη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής (μπορεί να έχουν μόνο αντίθετες κατευθύνσεις), ενώ στη διάτρηση το εργαλείο εισχωρεί κάθετα στο δοκίμιο περιστρεφόμενο. Δηλαδή η πρόωση με την ταχύτητα κοπής σχηματίζουν γωνία 90° και αυτό σημαίνει ότι το εργαλείο έρχεται σε επαφή με πολλές εσωτερικές επιφάνειες ταυτόχρονα.

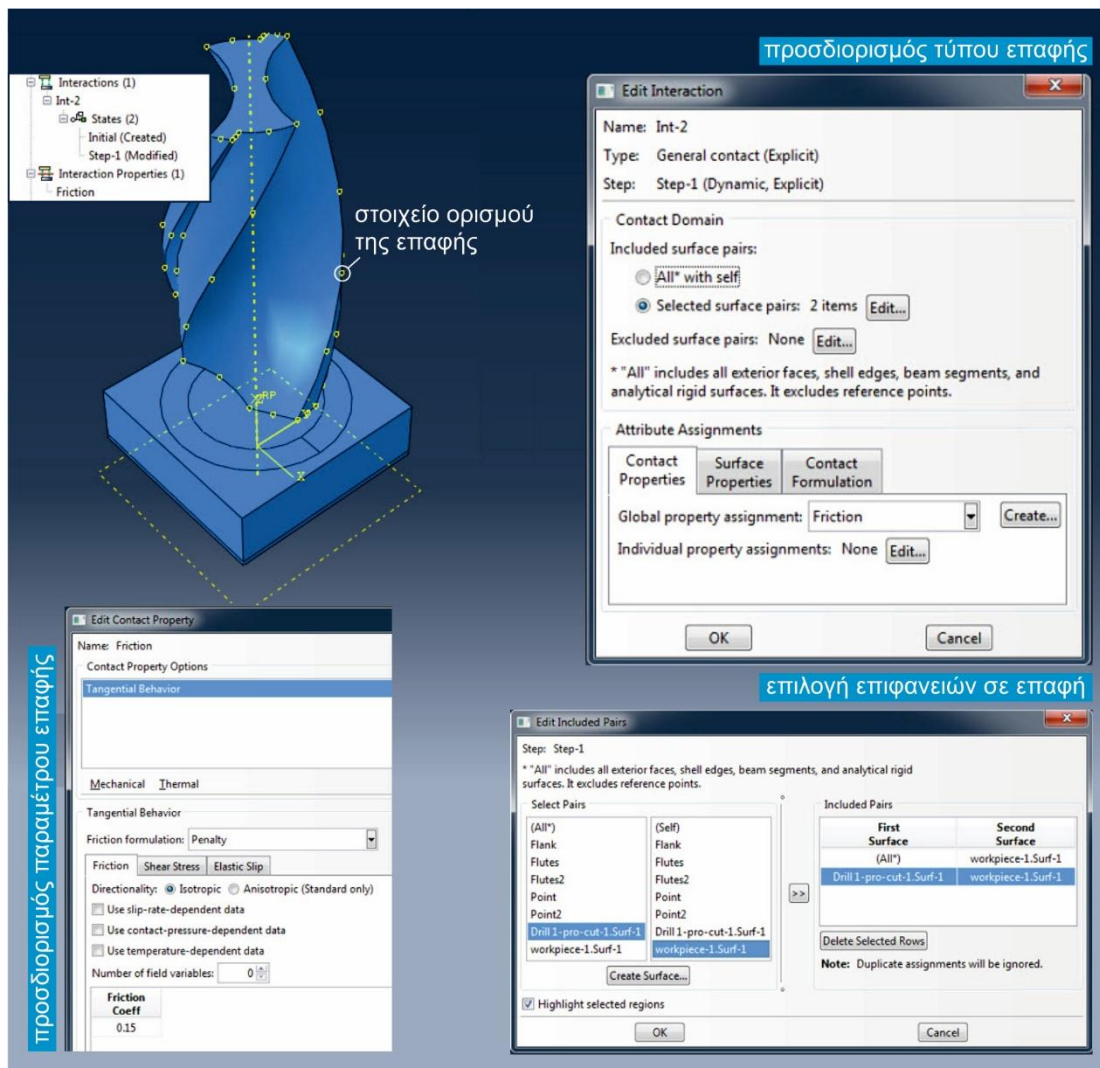
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το λογισμικό ως επιφάνειες υπολογίζει μόνο τις εξωτερικές επιφάνειες των σωμάτων, ακόμα και όταν πρόκειται για επιφάνειες στοιχείων (element type surfaces) και όχι απλές γεωμετρικές επιφάνειες (geometry type surfaces). Έτσι, εφόσον οριζόταν ως 2<sup>η</sup> επιφάνεια το σύνολο των επιφανειών του δοκιμίου, στην πράξη το λογισμικό θα δημιουργούσε επαφή μόνο μεταξύ του εργαλείου και των δύο εξωτερικών επιφανειών εισόδου και εξόδου με αποτέλεσμα η κοπή να πραγματοποιηθεί μόνο σε αυτές, αφήνοντας όλο το υπόλοιπο δοκίμιο ανεπηρέαστο από τη διείδυση του εργαλείου. Συνεπώς, προκειμένου να οριστεί πλήρως η επαφή μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου, δημιουργήθηκε μία εσωτερική επιφάνεια στοιχείων η οποία περιελάμβανε τα όλα τα στοιχεία στην περιοχή επαφής του εργαλείου με το δοκίμιο. Όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.13](#), μέσω της εντολής Create Surface→Type:Mesh, επιλέγεται η περιοχή της διάτρησης, με ενεργοποιημένη την επιλογή “Select From All Entities” ώστε να επιλεγούν και τα εσωτερικά στοιχεία και να αποτελέσουν και αυτά, στοιχεία της νέας επιφάνειας.

Εφόσον έχουν δημιουργηθεί και οι δύο, προς επαφή επιφάνειες, ορίζεται η επαφή μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.14](#). Αρχικά, με την εντολή Interaction Property→Create καθορίζεται ο τύπος και τα χαρακτηριστικά της επαφής.





Σχήμα 3.13: Δημιουργία εσωτερικής επιφάνειας επαφής στο δοκίμιο



Σχήμα 3.14: Ορισμός επαφής μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου

Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε εφαπτομενική επαφή (tangential contact) τύπου “Penalty” με συντελεστή τριβής 0.15. Στη συνέχεια, μέσω της εντολής Interaction→Create, δημιουργήθηκε γενικού τύπου άμεση επαφή (explicit general contact), στην οποία αφού της προσδόθηκε η προαναφερθείσα ιδιότητα, επιλέχθηκαν τα ζεύγη των επιφανειών σε επαφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14.

### 3.2.8 ALE – Arbitrary Lagrangian Eulerian method

Η μέθοδος ALE αποτελεί ένα συνδυασμό της Lagrangian και Eulerian ανάλυσης. Σε προβλήματα με μεγάλες παραμορφώσεις και αφαίρεση υλικού, συμβάλει στη διατήρηση της συνοχής και της καλής ποιότητας του πλέγματος, επιτρέποντας στο πλέγμα να κινείται ανεξάρτητα του υλικού που παραμορφώνεται ή και αφαιρείται. Η μέθοδος δεν τροποποιεί την τοπολογία του πλέγματος (των στοιχείων και της συνεκτικότητάς τους) πράγμα το οποίο περιορίζει την ικανότητα της μεθόδου να διατηρήσει την υψηλή ποιότητα του πλέγματος σε υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις. Δηλαδή η μέθοδος δε δημιουργεί ούτε διαγράφει στοιχεία. Στον άμεσο επιλύτη του λογισμικού προσομοίωσης, η μέθοδος ALE προορίζεται για εφαρμογή σε προβλήματα μεγάλης παραμόρφωσης και όχι στη μείωση σφαλμάτων διακριτοποίησης σε χαμηλών παραμορφώσεων προβλήματα.

Η μέθοδος ALE μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρο το μοντέλο του προβλήματος ή σε ξεχωριστά τμήματά του. Σε προβλήματα στα οποία υπεισέρχονται μεγάλες παραμορφώσεις η βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος μπορεί να αποτρέψει τον τερματισμό της ανάλυσης ως αποτέλεσμα της ανεξέλεγκτης παραμόρφωσης του πλέγματος. Στα πλαίσια της βελτίωσης της ποιότητας του πλέγματος η μέθοδος μπορεί να επιταχύνει την ανάλυση, παράγοντας ο οποίος έρχεται σε αντίθεση με το χρόνο που χρειάζεται το λογισμικό για την τροποποίηση και αναγέννηση του πλέγματος στη συχνότητα που το επιβάλλει η μέθοδος. Ιδιαίτερα σε προβλήματα με αφαίρεση ή διαμόρφωση υλικού όπου το τελικό σχήμα του σώματος, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι εντελώς διαφορετικό από το αρχικό, το βέλτιστο για την αρχική γεωμετρία πλέγμα μπορεί να μην είναι κατάλληλο σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας όπου υπεισέρχονται υπερβολικές παραμορφώσεις των στοιχείων.

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου ALE στο μοντέλο διάτρησης. Πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός της περιοχής εφαρμογής της μεθόδου μέσω της εντολής Other→ALE adaptive mesh domain στο περιβάλλον 'Step'.

Οι περιοχές εφαρμογής της μεθόδου ALE:

- καθορίζουν τα τμήματα του μοντέλου όπου η κίνηση του πλέγματος είναι ανεξάρτητη της παραμόρφωσης του υλικού,
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση προβλημάτων Lagrangian αλλά και Eulerian φύσης,
- μπορούν να περιέχουν μόνο 1<sup>ης</sup> τάξης, μειωμένης ολοκλήρωσης τριδιάστατες γεωμετρίες, πράγμα το οποίο στο συγκεκριμένο μοντέλο επιβάλλει τη χρήση των C3D8R στοιχείων, όπως αναφέρθηκε στην αντίστοιχη παράγραφο,
- έχουν οριακές περιοχές στις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν φορτία, συνοριακές συνθήκες και οριακές επιφάνειες,
- ενεργοποιούνται μόνο σε γεωμετρικά μη γραμμικά χρονικά βήματα.

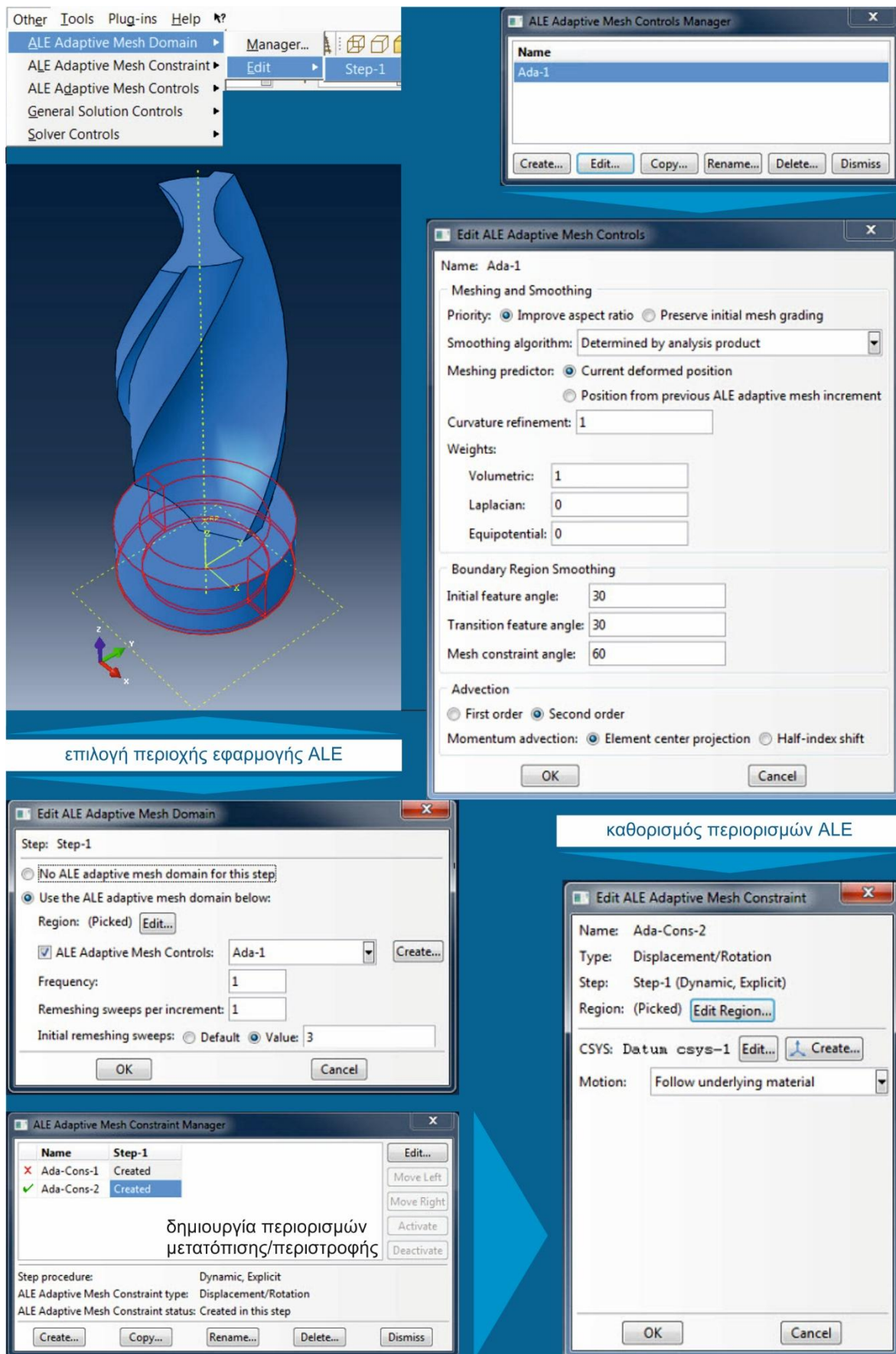
Στο παράθυρο που ανοίγει και ενεργοποιεί η παραπάνω εντολή επιλέγεται:

- η περιοχή, η οποία στο παρόν μοντέλο είναι όλη η περιοχή της διάτρησης,
- η συχνότητα με την οποία θα γίνεται η αναγέννηση του πλέγματος,
- ο αριθμός των σαρώσεων αυτών σε κάθε χρονικό διάστημα και
- ο αριθμός των σαρώσεων αναγέννησης του πλέγματος στην αρχή του χρονικού βήματος.

Σε κάθε σάρωση διαμόρφωσης του πλέγματος, οι κόμβοι των στοιχείων στην περιοχή εφαρμογής επανατοποθετούνται με βάση τις τρέχουσες θέσεις των γειτονικών τους κόμβων και στοιχείων προκειμένου να μειωθεί η παραμόρφωση των στοιχείων. Οι κόμβοι μετακινούνται κατά ένα ποσοστό του χαρακτηριστικού μήκους όλων των στοιχείων στα οποία ανήκουν. Η αύξηση του αριθμού των σαρώσεων αυξάνει την ένταση της αναγέννησης του πλέγματος σε κάθε χρονικό διάστημα, ενώ η προκαθορισμένη από το λογισμικό ρύθμιση είναι μία σάρωση σε κάθε χρονικό διάστημα, κάτι που έχει υιοθετηθεί και στο παρόν μοντέλο διάτρησης.

Επιπλέον των παραπάνω, στο παράθυρο καθορισμού της περιοχής εφαρμογής επιλέγεται το σετ των ρυθμίσεων ελέγχου (ALE adaptive mesh controls) που θα εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη περιοχή. Μέσω της εντολής Other→ALE adaptive mesh controls (σχήμα 3.15) επιλέγονται οι παραπάνω ρυθμίσεις ελέγχου του πλέγματος. Στο παράθυρο των ρυθμίσεων ελέγχου του πλέγματος καθορίζονται τα παρακάτω:

- Η προτεραιότητα και ο στόχος της μεθόδου εξομάλυνσης του πλέγματος (mesh smoothing), που μπορεί να είναι:
  - η βελτίωση του λόγου μήκους - πλάτους των στοιχείων (aspect ratio improvement) για ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης των στοιχείων σε βάρος όμως της αρχικής ταξινόμησης του πλέγματος, ρύθμιση η οποία επιλέχθηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο είτε
  - η διατήρηση της αρχικής ταξινόμησης του πλέγματος
- Η επιλογή του αλγόριθμου εξομάλυνσης του πλέγματος ανάμεσα σε:
  - προκαθορισμένος
  - ενισχυμένος
  - συμβατικός
- Η επιλογή του 'τρόπου πρόβλεψης' του πλέγματος μεταξύ των παρακάτω:
  - με βάση την τρέχουσα θέση των κόμβων, μέθοδος που προτείνεται σε προβλήματα φύσης Langrange και προβλήματα πολύ μεγάλων παραμορφώσεων
  - με βάση τη θέση σε προηγούμενο βήμα πλεγματοποίησης, μέθοδος που προτείνεται σε προβλήματα φύσης Eulerian όπου η ροή υλικού είναι μεγάλη σε σχέση με τη συνολική παραμόρφωση
- Η περαιτέρω προσαρμογή και βελτίωση του πλέγματος σε περιοχές με μεγάλη καμπυλότητα. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη τιμή 1.
- Η μέθοδος εξομάλυνσης του πλέγματος, που μπορεί να είναι:
  - ογκομετρική (volumetric)
  - laplacian
  - ισοδυναμική (equipotential)
- Η αρχική γωνία εντοπισμού ακμών και κορυφών
- Η γωνία μετάβασης που καθορίζει το πότε επιτρέπεται η απενεργοποίηση ακμών και κορυφών, προκειμένου να είναι δυνατός ο επαναπροσδιορισμός του πλέγματος.
- Η γωνία περιορισμού του πλέγματος.
- Μεταγωγή ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των στοιχείων:
  - 1<sup>ης</sup> τάξης (first order)
  - 2<sup>ης</sup> τάξης (second order)
  - με προβολή του κέντρου (element center projection)
  - half-index shift



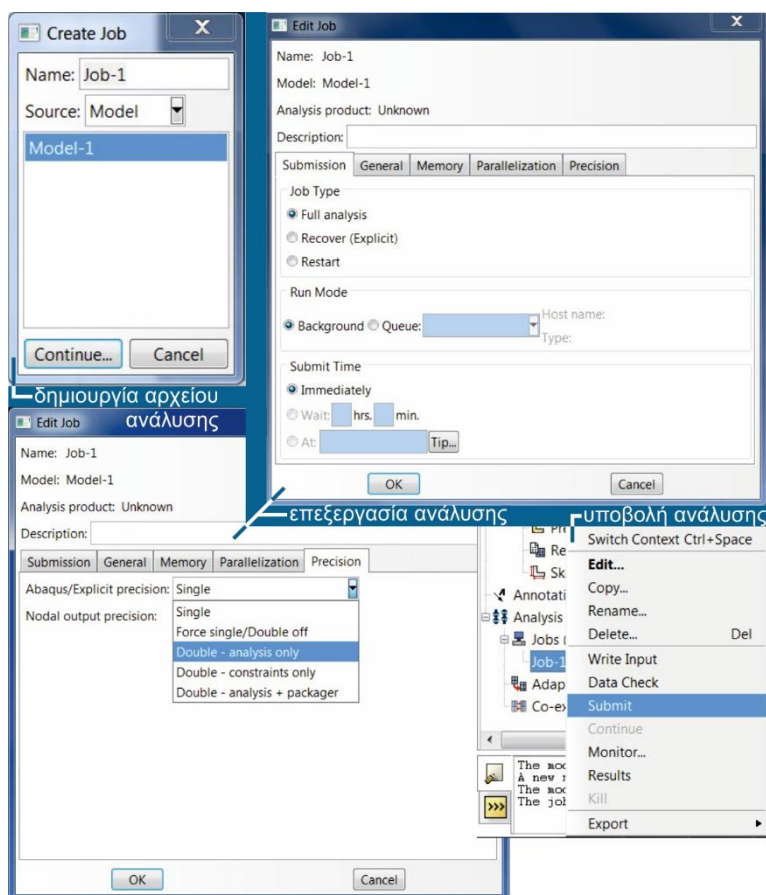
Σχήμα 3.15: ALE – Arbitrary Lagrangian Eulerian πλεγματοποίηση



Αφού έχει οριστεί πλήρως η περιοχή εφαρμογής της μεθόδου πλεγματοποίησης ALE, καθώς και η μέθοδος ελέγχου του πλέγματος, ορίζονται οι περιορισμοί του πλέγματος μέσω της εντολής Other→ALE Adaptive mesh constraints→ που αφορούν την κίνηση του πλέγματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15, πέρα από τον προσδιορισμό της περιοχής στην οποία θα εφαρμοστεί ο περιορισμός, επιλέγεται το αν το πλέγμα θα κινείται ανεξάρτητα του υλικού ή αν θα υπάρχουν π.χ. κόμβοι ή ομάδες κόμβων που θα κινούνται ακολουθώντας το υλικό. Στο συγκεκριμένο μοντέλο διάτρησης επιλέχθηκε η κίνηση όλου του πλέγματος στην περιοχή της διάτρησης ακολουθώντας το υλικό.

### 3.2.9 Δημιουργία, υποβολή αρχείου ανάλυσης και παρακολούθησή της

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος, το αρχείο του μοντέλου υποβάλλεται στον επιλύτη. Η διαδικασία υποβολής περιγράφεται στο [σχήμα 3.16](#) και ξεκινά με την εντολή Create Job και την επιλογή του μοντέλου το οποίο θα υποβληθεί για επίλυση. Στη συνέχεια προσδιορίζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης, όπως η επιθυμητή ακρίβεια με την οποία θα γίνουν οι αριθμητικοί υπολογισμοί και τέλος με την εντολή Submit το μοντέλο υποβάλλεται και η ανάλυση ξεκινά.

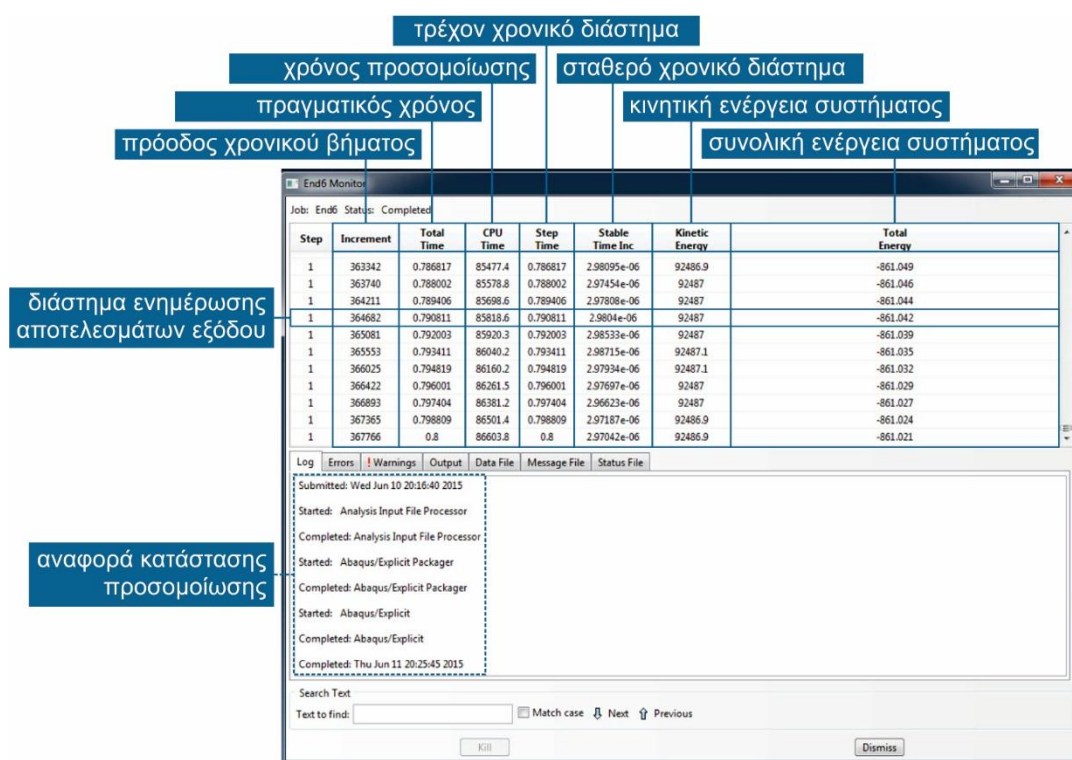


Σχήμα 3.16: Δημιουργία και υποβολή αρχείου ανάλυσης

Μετά την υποβολή της ανάλυσης, η διαδικασία είναι δυνατόν να παρακολουθείται από το παράθυρο “monitor”. Στο [σχήμα 3.17](#) φαίνεται η δομή και τα περιεχόμενα του monitor της επίλυσης που δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης της επίλυσης (εκκίνηση, πορεία, τερματισμός, αποτυχία), των τυχόν προειδοποιήσεων του προγράμματος ή σφαλμάτων που προκύπτουν, αλλά και του αρχείου εξόδου όπως αυτό διαμορφώνεται κάθε



φορά που ενημερώνεται, με συχνότητα που έχει οριστεί στον προσδιορισμό των δεδομένων εξόδου.



Σχήμα 3.17: Ορισμός επαφής μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου

Πέραν των παραπάνω, σε κάθε βήμα ενημέρωσης των αποτελεσμάτων, στο monitor παρουσιάζεται ο αριθμός του χρονικού βήματος το οποίο εκτελείται, η πορεία των χρονικών διαστημάτων, ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης, ο πραγματικός χρόνος που έχει παρέλθει καθώς και η εξέλιξη της κινητικής και της ολικής ενέργειας του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελέγχεται από το χρήστη η σταθερότητα της ανάλυσης μέσω της σταθερής ολικής ενέργειας καθώς και του “σταθερού χρονικού διαστήματος” αλλά και να καθίσταται δυνατή η ποιοτική εκτίμηση του συνολικού πραγματικού χρόνου προσομοίωσης.

### 3.3 Παραδοχές για την απλοποίηση του μοντέλου

Λόγω της πολυπλοκότητας της κατεργασίας διάτρησης και της μοντελοποίησής της, για την ανάπτυξη του παρόντος μοντέλου έγιναν κάποιες παραδοχές προκειμένου να απλοποιηθεί η επίλυσή του, κύρια ως προς το χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί. Οι παραδοχές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω αν και αναφέρονται στα επιμέρους τμήματα της ανάπτυξης του μοντέλου, όπως αυτά περιγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια.

- **Γεωμετρία του δοκιμίου διάτρησης:** Σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε η απλοποιημένη γεωμετρία ενός ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων 8x8x25(mm) προκειμένου να απλοποιηθεί η πλεγματοποίησή του και να επιταχυνθεί η διαδικασία αναγέννησης του πλέγματος άρα και η συνολική διαδικασία της ανάλυσης (ενότητα 3.2.1). Με βάση αυτή τη μοντελοποίηση, το δοκίμιο έχει αρκετά μικρότερες διαστάσεις από τις πραγματικές και απουσιάζει η χάραξη του καννάβου η οποία καθιστούσε τη σωστή πλεγματοποίηση αδύνατη.

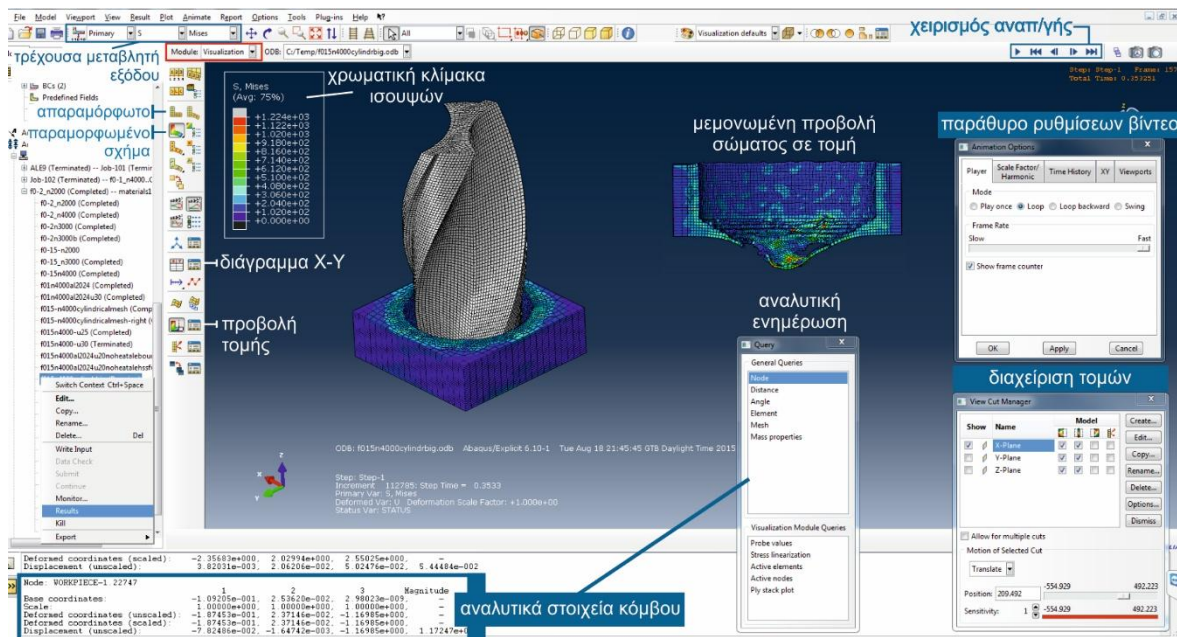
- **Επιλογή υλικών:** Λόγω έλλειψης δεδομένων για τις ιδιότητες παραμόρφωσης και αστοχίας του AI2007 που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, στο μοντέλο προσομοίωσης έγινε χρήση των ιδιοτήτων του AI2024-T3, όπως αυτές εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία (ενότητα 3.2.2).
- **Συγκράτηση δοκιμίου:** Λόγω της μείωσης των διαστάσεων του δοκιμίου επηρεάστηκε και ο τρόπος συγκράτησής του με τις πλευρές του να είναι πακτωμένες, ενώ στην πειραματική διαδικασία τα δοκίμια συγκρατήθηκαν στη βάση μέσω ενός ελάσματος σύσφιξης το οποίο βιδώθηκε σε αυτήν (ενότητα 3.2.4).
- **Θερμοελαστοπλαστικά φαινόμενα:** Όπως παρουσιάστηκε στις αντίστοιχες ενότητες 3.2.2 και 3.2.5, κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος μέσω του προσδιορισμού των ιδιοτήτων των υλικών αλλά και της επιλογής του κατάλληλου τύπου στοιχείων, λήφθηκαν υπόψη οι ιδιότητες που ελέγχουν τα φαινόμενα ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάτρηση. Για λόγους απλοποίησης όμως και ως αποτέλεσμα της χρήσης του συγκεκριμένου τύπου στοιχείων (C3D8R), δε λήφθηκαν υπόψη φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας στο κατεργαζόμενο δοκίμιο. Μέσω της επιλογής αυτού του τύπου των στοιχείων αλλά και της ενεργοποίησης των αδιαβατικών θερμικών φαινομένων, η ανάπτυξη θερμότητας στο μοντέλο περιορίζεται στο δοκίμιο, αφού είναι το μόνο παραμορφώσιμο σώμα, και συμβαίνει ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης του υλικού, ενώ περιορίζεται στα στοιχεία τα οποία παραμορφώνονται χωρίς να μεταδίδεται στα γειτονικά τους και κατ' επέκταση χωρίς να επηρεάζει το υπόλοιπο δοκίμιο. Βασικότερη συνέπεια αυτής της απλοποίησης είναι η αδυναμία του να συμπεριληφθεί η μετάδοση θερμότητας από το εργαλείο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο που παίζει σημαντικό ρόλο στη διάτρηση. Αναφορικά με την απλοποίηση του περιορισμού της θερμότητας από τη μετάδοσή της στο υπόλοιπο υλικό, οι επιπτώσεις στην ακρίβεια του μοντέλου θεωρήθηκαν αμελητέες καθώς έχει σημειωθεί στη βιβλιογραφία (Ko et. Al [9]) ο αδιαβατικός χαρακτήρας της κατεργασίας διάτρησης με την έννοια ότι η θερμότητα περιορίζεται αυστηρά στην περιοχή της διάτρησης χωρίς να μεταδίδεται στο υπόλοιπο τεμάχιο και άρα μπορεί να θεωρηθεί ως μία αδιαβατική διαδικασία όπου η θερμότητα αναπτύσσεται μόνο τοπικά.

### 3.4 Αξιολόγηση και μεθεπεξεργασία των αποτελεσμάτων της επίλυσης (post-processing)

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1, το λογισμικό πέραν της δυνατότητας προεπεξεργασίας δεδομένων και της επίλυσης προβλημάτων μέσω μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα μετά-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που πραγματοποιείται η ανάλυση ενός προβλήματος μετά το βήμα της υποβολής της (ενότητα 3.2.9), το λογισμικό καταγράφει σε αρχεία εξόδου τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης όπως αυτά έχουν ζητηθεί από το χρήστη, με συχνότητα η οποία έχει επίσης προκαθοριστεί (ενότητα 3.2.5). Όπως περιγράφηκε αναλυτικότερα και παραπάνω υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής πληθώρας αποτελεσμάτων όπως οι κύριες και ισοδύναμες τάσεις, οι μετατοπίσεις και ταχύτητες στους κόμβους, οι παραμορφώσεις, οι δυνάμεις επαφής κ.λπ.

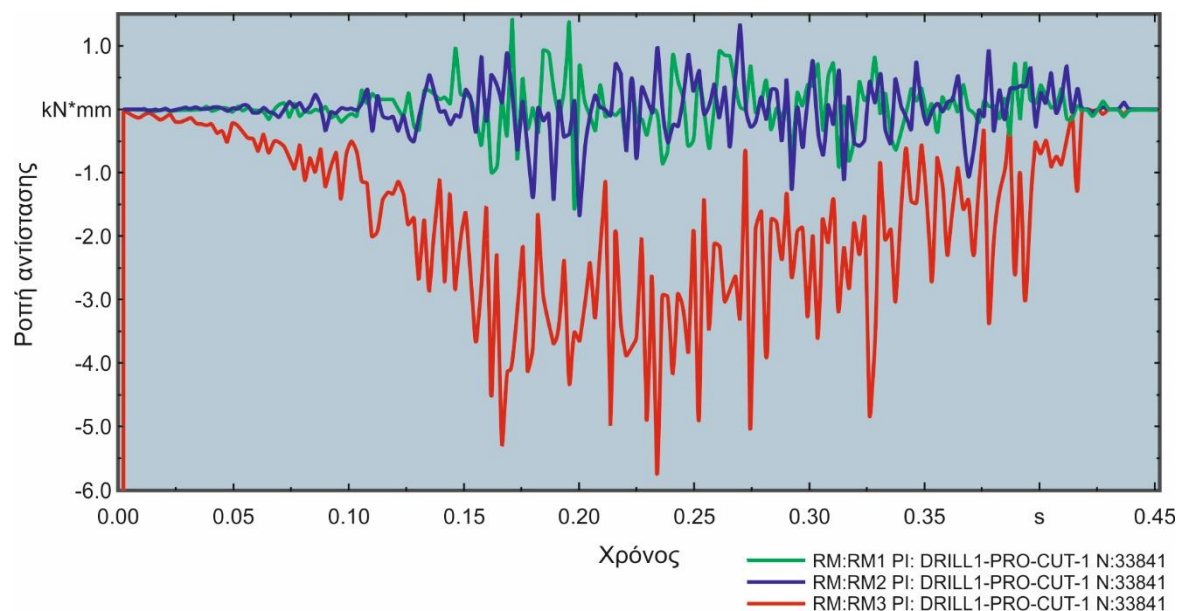
Όλα τα προκαθορισμένα δεδομένα εξόδου καταγράφονται στη βάση δεδομένων εξόδου (output database) του κάθε αρχείου εργασίας (job) το οποίο έχει υποβληθεί προς επίλυση στο λογισμικό. Η βάση δεδομένων του εκάστοτε αρχείου είναι προσβάσιμη είτε από την εντολή File→Open→.odb είτε από το δένδρο του μοντέλου, με δεξί κλικ του εκάστοτε αρχείου εργασίας και επιλογή της εντολής “Results”. Μέσω της εντολής αυτής, ανοίγει η βάση δεδομένων εξόδου του αρχείου στο περιβάλλον “Visualization” του λογισμικού. Στο συγκεκριμένο περιβάλλον, το οποίο παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.18](#), παρέχεται η δυνατότητα ποικίλων ενεργειών για επισκόπηση των αποτελεσμάτων όπως:

- Προβολή στιγμιότυπων, βίντεο, καθώς και εγγραφή και αποθήκευση αυτών, από όλη την εξέλιξη της ανάλυσης και εφόσον έχει παρέλθει το πρώτο (τουλάχιστον) βήμα καταγραφής των αποτελεσμάτων. Τα σώματα, στοιχεία, κόμβοι κ.λπ. που συμμετέχουν στην ανάλυση μπορούν να προβάλλονται είτε απαραμόρφωτα (undeformed shape) ή παραμορφωμένα (deformed shape).
- Προβολή των σχεδίων ισοϋψών (contour plots) των αποτελεσμάτων εξόδου (τάσεων, μετατοπίσεων κ.λπ.) με ταυτόχρονη περιγραφή της χρωματικής κλίμακας των ισοϋψών στα παραμορφωμένα σώματα.
- Προβολή των σωμάτων σε τομή στα τρία επίπεδα ή ακόμα και ελεύθερη τομή για πληρέστερη επισκόπηση κλειστών διεργασιών (όπως π.χ. η διάτρηση).
- Απομόνωση συγκεκριμένων στοιχείων (σωμάτων, κελυφών, κόμβων, επιφανειών, στοιχείων) προς προβολή μέσω της εντολής Create display group, όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα 3.2.6.
- Δημιουργία και εκτύπωση διαγραμμάτων X-Y όλων των δεδομένων εξόδου μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.19](#), είτε αυτά αφορούν συνολικά κάποιο σώμα ή ακόμα και έναν μόνο κόμβο.
- Ενημέρωση σχετικά με τους ανενεργούς και ενεργούς κόμβους του μοντέλου, τη θέση τους, τη μεταξύ τους απόσταση (σε ζεύγη κόμβων), μέσω της εντολής Tools→Query.



Σχήμα 3.18: Παράθυρο προβολής βάσης δεδομένων εξόδου (output database – visualization module)

Στο σχήμα 3.19 φαίνεται το διάγραμμα κατανομής των συνιστωσών της ροπής αντίστασης (Reaction Moment)  $RM_x$ ,  $RM_y$ ,  $RM_z$ , στον κόμβο αναφοράς (reference point) του εργαλείου διάτρησης από την αρχή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης σε  $t_{sim}=0.45s$ . Το συγκεκριμένο διάγραμμα προέκυψε από την προσομοίωση της κατεργασίας με συνθήκες  $f=0.15mm/rev$ ,  $n=4000rpm$ . Η συνιστώσα της ροπής αντίστασης  $RM_z$  παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερη από τις συνιστώσες ως προς τους άξονες  $X$  και  $Y$  καθώς η διεύθυνση  $Z$  είναι η διεύθυνση της πρόωσης του εργαλείου, πάνω στην οποία δέχεται την περισσότερη δύναμη από το τεμάχιο.

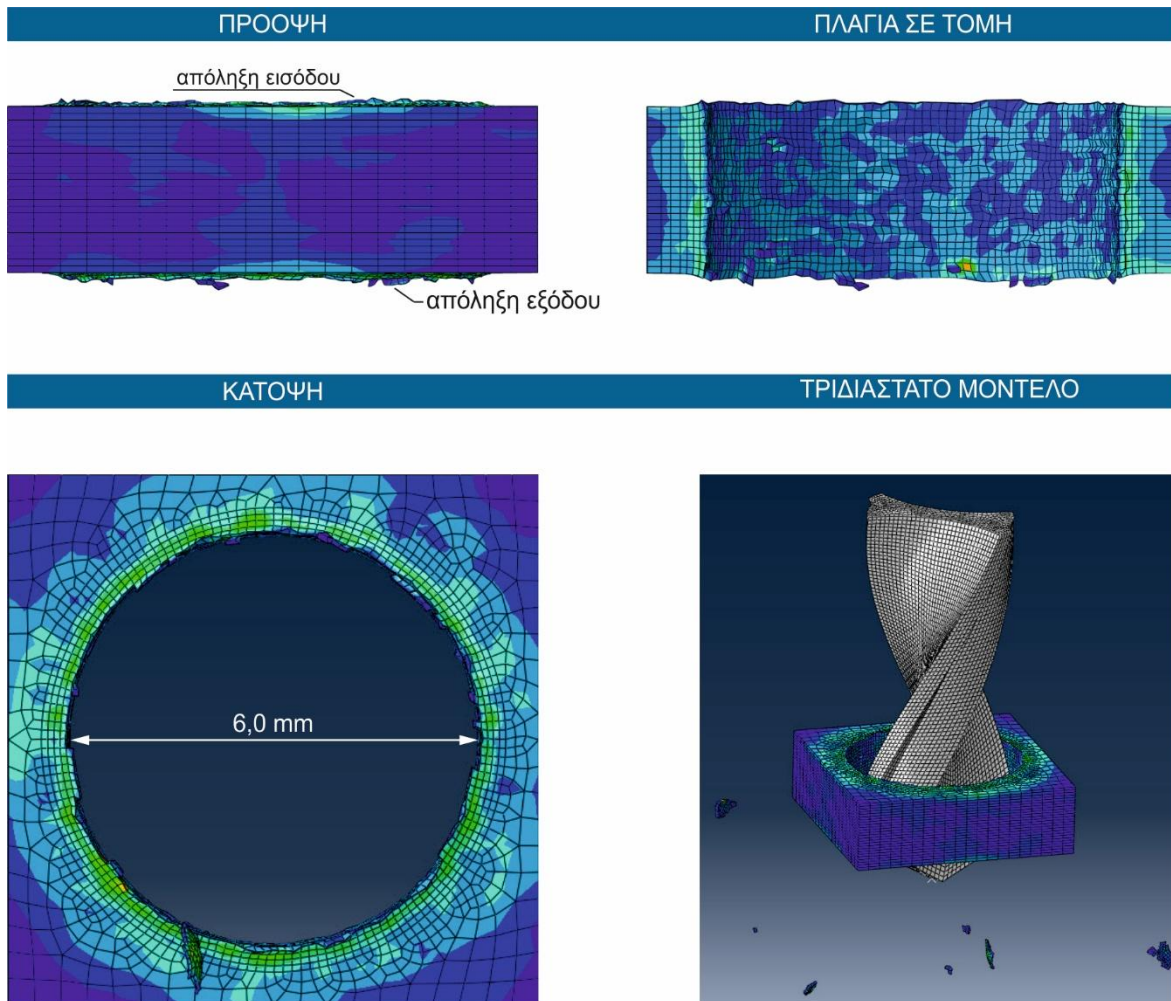


Σχήμα 3.19: Παράθυρο προβολής βάσης δεδομένων εξόδου (output database – visualization module)

Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η αναπαράσταση του δοκιμίου διάτρησης μετά το πέρας της προσομοίωσης σε δύο όψεις και μία όψη σε τομή καθώς και σε τριδιάστατη απεικόνιση.



Στην πρόοψη καθώς και την πλάγια όψη σε τομή διακρίνονται οι απολήξεις διάτρησης εισόδου και εξόδου. Στην κάτωψη φαίνεται η διατομή της οπής, το κυκλικό της σχήμα καθώς και η διάμετρος της  $\varnothing 6,0\text{mm}$  όπως προέκυψε από την προσομοίωση της κατεργασίας.



Σχήμα 3.20: Απεικόνιση μοντέλου στις τρεις όψεις καθώς και τριδιάστατη απεικόνιση, μετά το πέρας της προσομοίωσης

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

### 4.1 Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας

Προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το μοντέλο προσομοίωσης, σχεδιάστηκε σειρά πειραμάτων διάτρησης οπών. Πέρα από την επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των παραμέτρων κοπής, συγκεκριμένα της ταχύτητας κοπής  $v_c$  και της πρόωσης  $f_n$  στο σχηματισμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης διάτρησης.

### 4.2 Χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων και πειραματικός εξοπλισμός

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον, αποκλειστικά με τη χρήση ψηφιακά καθοδηγούμενων εργαλειομηχανών. Ο εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη την πειραματική διαδικασία αναφέρεται και περιγράφεται παρακάτω.

#### CNC Κέντρο Κατεργασίας DMU 50 eco 3+2 αξόνων

Το κέντρο κατεργασίας CNC DMU 50eco 3+2 αξόνων έχει δυνατότητα μεταφορικής κίνησης της ατράκτου στους τρεις άξονες X,Y,Z και τοποθέτησης σε αυτούς με ακρίβεια 2 $\mu$ m καθώς και περιστροφής του τραπέζιού περί των Y και Z. Η άτρακτος μπορεί να περιστρέφεται έως 8000rpm και να μεταφέρεται στους τρεις άξονες με μέγιστη ταχύτητα 12m/min σε γρήγορη μετακίνηση. Οι δύο άξονες περιστροφής του τραπέζιού επιτρέπουν την κατεργασία τεμαχίων πολύπλοκης μορφής. Ο περιστρεφόμενος εργαλειοφόρας 16 θέσεων καθιστά δυνατή την αυτόματη και ταχεία αλλαγή εργαλείων ενώ υπάρχει και αποσπώμενο χειριστήριο για μεγαλύτερο έλεγχο και ακρίβεια κατά το χειροκίνητο χειρισμό της μηχανής. Η ψύξη στην περιοχή της κοπής καθώς και η απαραίτητη λίπανση εξασφαλίζεται από σύστημα παροχής και ανακύκλωσης ψυκτικού υγρού. Το χειριστήριο ελέγχου DMG SLIMline καθώς και το σύστημα ελέγχου Siemens Sinumerik 810D Powerline με το εγκατεστημένο λογισμικό ShopMill καθιστούν εφικτό τον προγραμματισμό και την τριδιάστατη προσομοίωση των κατεργασιών.



Σχήμα 4.1: Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco (αριστερά) και Κέντρο τόννευσης CTX 310 (δεξιά)

#### CNC Κέντρο Τόννευσης CTX310

Το ψηφιακά καθοδηγούμενο κέντρο τόννευσης CNC CTX310 eco προσφέρει δυνατότητα κατεργασίας τεμαχίων μέγιστης διαμέτρου 200mm. Το κέντρο επιτρέπει τη μεταφορική κίνηση του πύργου και των εργαλείων κατά τους άξονες X και Z ενώ η περιστρεφόμενη άτρακτος ισχύος 16kW με τσοκ υδραυλικής σύσφιξης των τεμαχίων έχει ικανότητα περιστροφής έως 5000rpm. Ο εργαλειοφόρας (turret) 12 θέσεων δίνει δυνατότητα αυτόματης αλλαγής



εργαλείων ενώ μπορεί να τοποθετείται στους άξονες X και Z με πολύ υψηλή ακρίβεια. Χρησιμοποιεί γραμμικούς οδηγούς κύλισης σε όλους τους άξονες, διαθέτει αυτόματη κεντρική λίπανση και πλήρες σύστημα παροχής σαπουνέλαιου σε κάθε θέση του εργαλειοφορέα. Το εγκατεστημένο σύστημα ελέγχου Siemens Sinumerik 840D Powerline προσφέρει αυξημένες δυνατότητες στην αυτοματοποίηση και τον προγραμματισμό των κατεργασιών.

#### **CNC Laser χάραξης DMG LASERTEC 40**

Το CNC Laser engraving Lasertec 40 είναι ένα ψηφιακά καθοδηγούμενο κέντρο χάραξης 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων. Η χάραξη επιτυγχάνεται μέσω παλμικού laser ισχύος 20Watt. Η καμπίνα του χώρου εργασίας είναι προστατευμένη και διαθέτει παράθυρο ασφαλείας. Το σύστημα ελέγχου CNC με λογισμικό προγραμματισμού και δυνατότητα εισαγωγής .stl και .dxf αρχείων, προσφέρει ευελιξία σε πολύπλοκες γεωμετρίες και έχει ικανότητα επίτευξης χαράξεων πολύ υψηλής ακρίβειας. Στο Lasertec 40 μπορούν να κατεργαστούν τεμάχια διαφόρων υλικών όπως αλουμίνιο, σκληροί χάλυβες, κεραμικά, καρβίδια, κ.λπ. με καλή ποιότητα επιφανείας.



Σχήμα 4.2: Laser χάραξης Lasertec 40 (αριστερά) και συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 eco (δεξιά)

#### **Συσκευή προρρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco**

Η συσκευή προρρύθμισης εργαλείων DMG Microset μειώνει σημαντικά το χρόνο μέτρησης των κοπτικών εργαλείων και δίνει τη δυνατότητα μετρήσεων με υψηλή ακρίβεια για τη σωστή ρύθμιση του μήκους και της ακτίνας των εργαλείων αλλά και τον εύκολο εντοπισμό της φθοράς. Στη συσκευή είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Microvision II IT και διαθέτει: εντοπισμό ακμών για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, στιβαρή κατασκευή της βάσης, πνευματική σύσφιξη και στους 2 άξονες, ελεύθερα κινούμενους γραμμικούς οδηγούς και CMOS ψηφιακή κάμερα με τηλεσκοπικούς φακούς.

#### **Κάμερα υψηλής ταχύτητας Microtron – MotionBLITZ EOS Mini 2 Highspeed Camera**

Η κάμερα υψηλής ταχύτητας MotionBlitz Eos Mini 2 δίνει τη δυνατότητα καταγραφής ταχέως εξελισσόμενων φαινομένων και προβολής τους με πολύ αργή ταχύτητα ώστε να είναι εφικτή η παρατήρησή τους. Η κάμερα έχει ανάλυση 3 Megapixel με καταγραφή 523 καρέ ανά δευτερόλεπτο, ενώ μπορεί να καταγράψει έως και 285000 καρέ το δευτερόλεπτο με μειωμένη ανάλυση. Η μέγιστη διάρκεια βίντεο που μπορεί να αποθηκεύσει στη μνήμη της είναι 1.5 δευτερόλεπτα στη μέγιστη ανάλυση και ταχύτητα καταγραφής.



Σχήμα 4.3: Κάμερα υψηλής ταχύτητας MotionBLITZ EOS Mini 2

## 4.3 Σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας

### 4.3.1 Δοκίμια διάτρησης

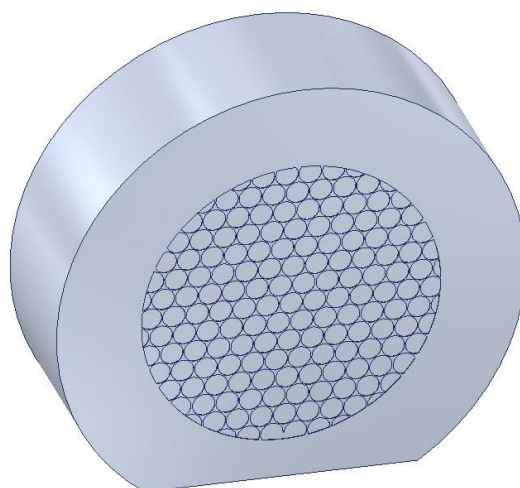
Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δοκίμια κυκλικής διατομής και πάχους 5mm.

**Κατεργαζόμενο Υλικό:** Ως κατεργαζόμενο υλικό χρησιμοποιήθηκε το κράμα αλουμινίου EN AW 2007. Η σύσταση του EN AW 2007 με τύπο AlCu4PbMg είναι: Al 4.0C 1.2Pb 1.1Mg 0.8Mn. Το σφυρήλατο κράμα EN AW 2007 παρουσιάζει πολύ καλή κατεργασιμότητα, υψηλή αντοχή λόγω θερμικής κατεργασίας (T4) και μεγάλη αντοχή σε κόπωση. Διατίθεται σε μορφή κυλίνδρου, σωλήνα ή ράβδου. Στο [σχήμα 4.4](#) φαίνονται οι αρχικοί ακατέργαστοι κύλινδροι Ø50mm που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών διάτρησης.

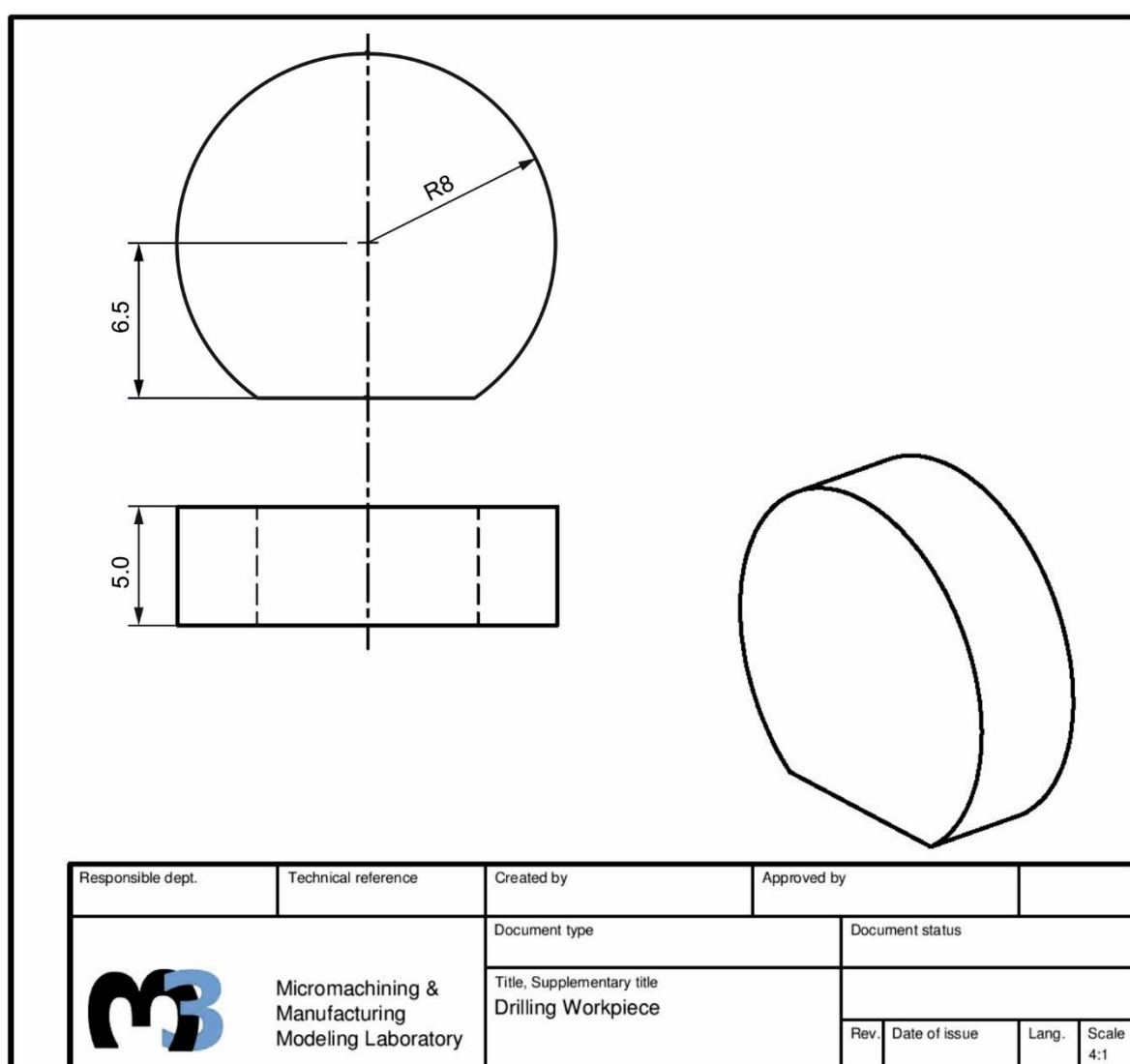


Σχήμα 4.4: Αρχικοί ακατέργαστοι κύλινδροι EN AW 2007

**Γεωμετρία Δοκιμών:** Τα δοκίμια διάτρησης σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον Autodesk Inventor 2014. Στο [σχήμα 4.5](#) φαίνεται το τριδιάστατο σχέδιο των δοκιμών ενώ στο [σχήμα 4.6](#) το κατασκευαστικό τους σχέδιο. Η εγκοπή σε χορδή που απέχει 6.5mm από το κέντρο του κυκλικού δοκιμίου σχεδιάστηκε προκειμένου να είναι δυνατή η συγκράτηση των δοκιμών με σκοπό την αποφυγή της στρέψης τους λόγω των δυνάμεων στρέψης που ασκούνται από το εργαλείο κατά τη διάτρηση. Αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία ότι η δημιουργία της απόληξης διάτρησης, δηλαδή το μέγεθος και η μορφή της, επηρεάζονται από τον τρόπο καθώς και το ρυθμό με τον οποίο παραμορφώνεται το υλικό πριν την αρχική διάρρηξή του αλλά και μετά από αυτήν, μέχρι τον τελικό αποχωρισμό του καπακιού (drilling cap).



Σχήμα 4.5: Τριδιάστατη απεικόνιση δοκιμίου διάτρησης

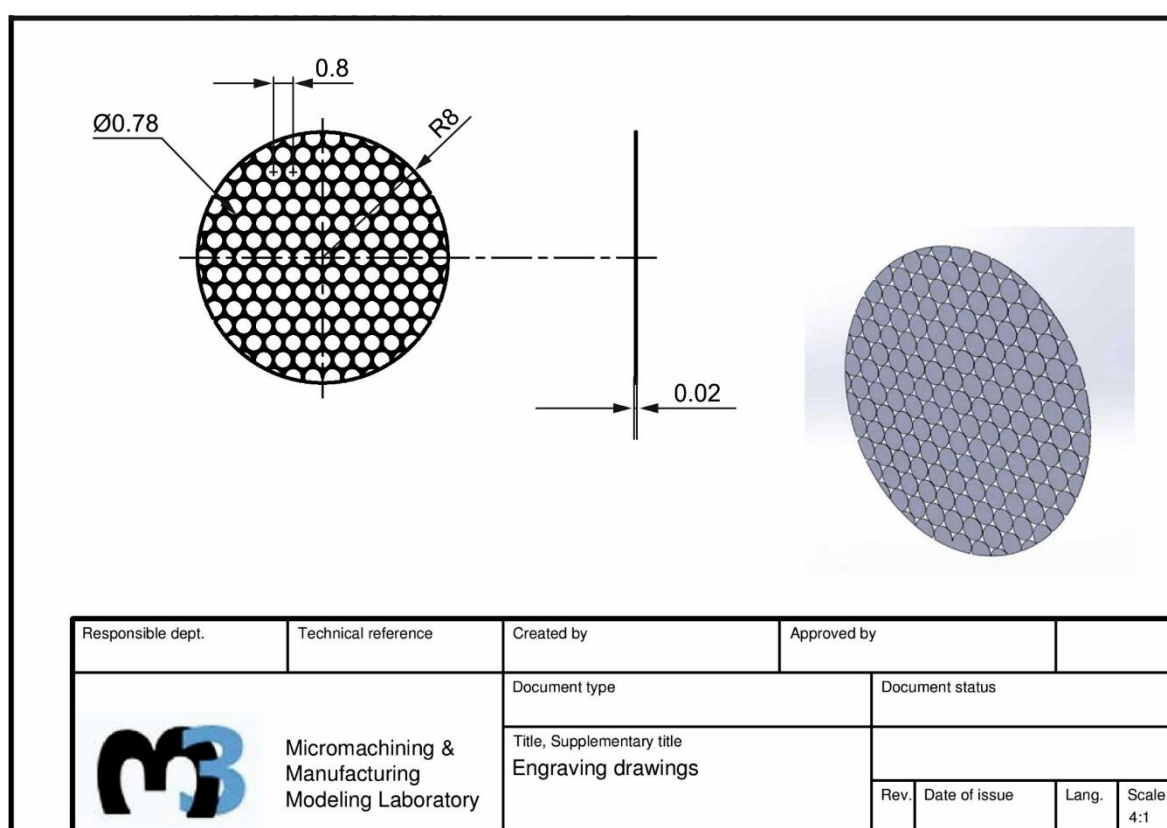


Σχήμα 4.6: Κατασκευαστικό σχέδιο δοκιμίου (χωρίς τον κώνναβο)

Για το σκοπό της καλύτερης παρατήρησης και μέτρησης της παραμόρφωσης του υλικού σχεδιάστηκε κάνναβος αποτελούμενος από κύκλους διαμέτρου 78μm, βάθους 20μm και διακέντρου 80μm. Ο κάνναβος χαράχθηκε σε καθένα από τα δοκίμια στην επιφάνεια εξόδου, με χρήση του κέντρου χάραξης Lasertec 40. Η τελική επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καννάβου έγινε μετά από σειρά δοκιμών και με κριτήρια:

- τη διευκόλυνση της παρατήρησης και των μετρήσεων της παραμόρφωσης,
- τη διάμετρο του εργαλείου διάτρησης,
- τη διαστασιακή απόκλιση του τελικού, κατεργασμένου από το κέντρο χάραξης, δοκιμίου λόγω της γεωμετρίας της δέσμης και της δημιουργίας του χαρακτηριστικού ξεχειλίσματος (kerf).

Το κατασκευαστικό σχέδιο του καννάβου δίνεται στο σχήμα 4.7. Ο κάνναβος σχεδιάστηκε ξεχωριστά από το δοκίμιο στο Inventor προκειμένου να είναι δυνατή η εξαγωγή του κατάλληλου αρχείου stl για τη χάραξη.



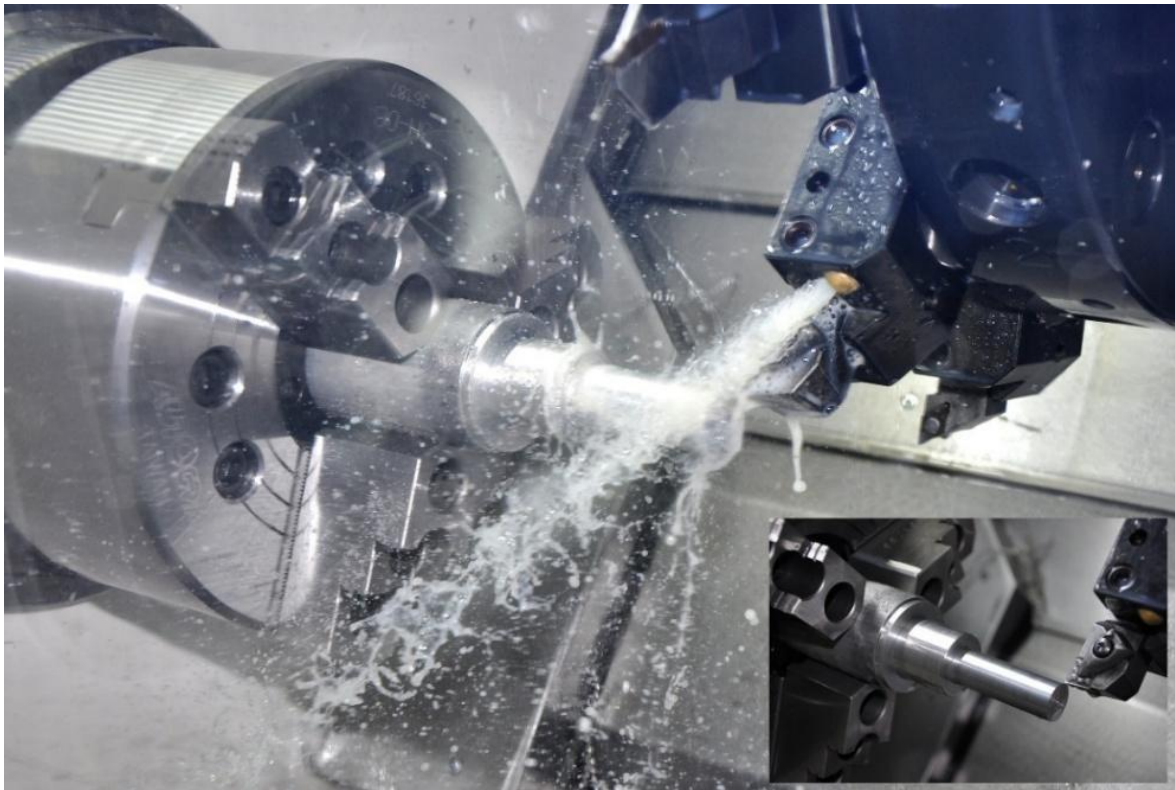
Σχήμα 4.7: Κατασκευαστικό και τριδιάστατο σχέδιο καννάβου

#### 4.3.2 Κατασκευή δοκιμών

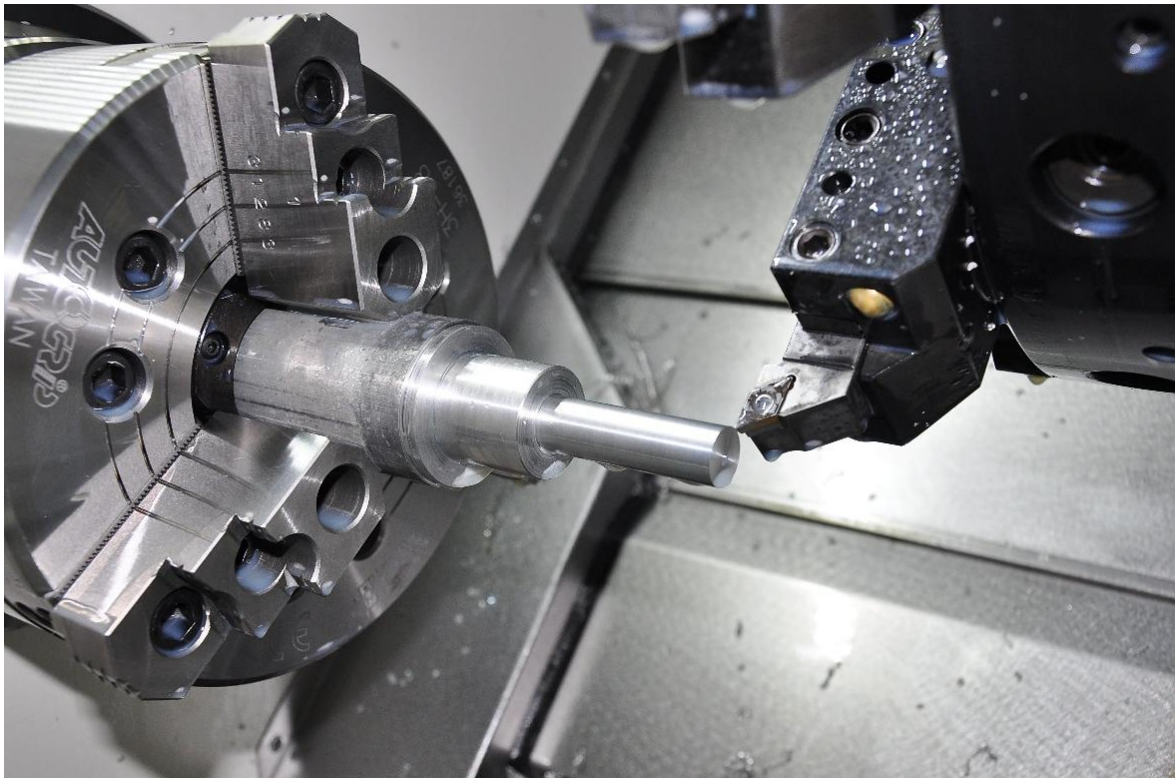
Προκειμένου να κατασκευαστούν τα δοκίμια διάτρησης πραγματοποιήθηκαν κατεργασίες τόννευσης, φραιζαρίσματος και χάραξης στα κέντρα κατεργασίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:

Με χρήση του λογισμικού ShopTurn προγραμματίστηκε και πραγματοποιήθηκε η εκχόνδριση και η αποπεράτωση της περιφέρειας του κυλίνδρου της για μείωση της διαμέτρου από Ø50mm σε Ø16mm.



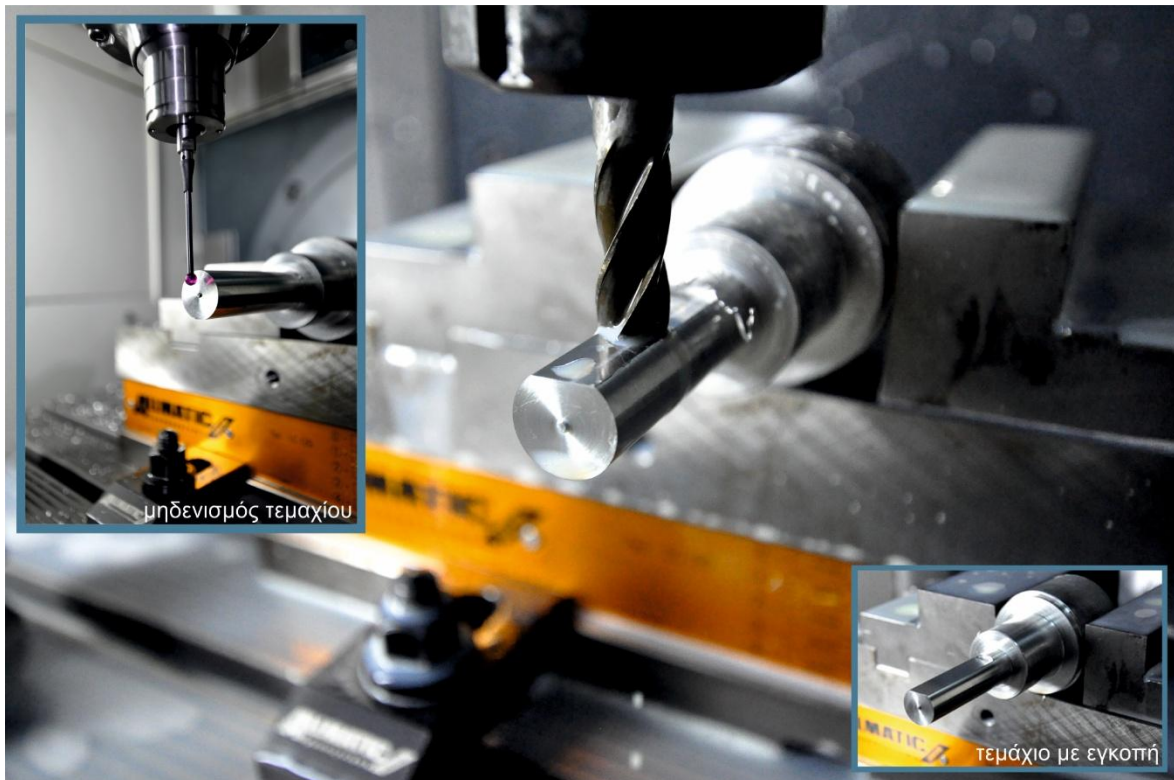


Σχήμα 4.8: Κατεργασία εκχόνδρινσης στον τόρνο



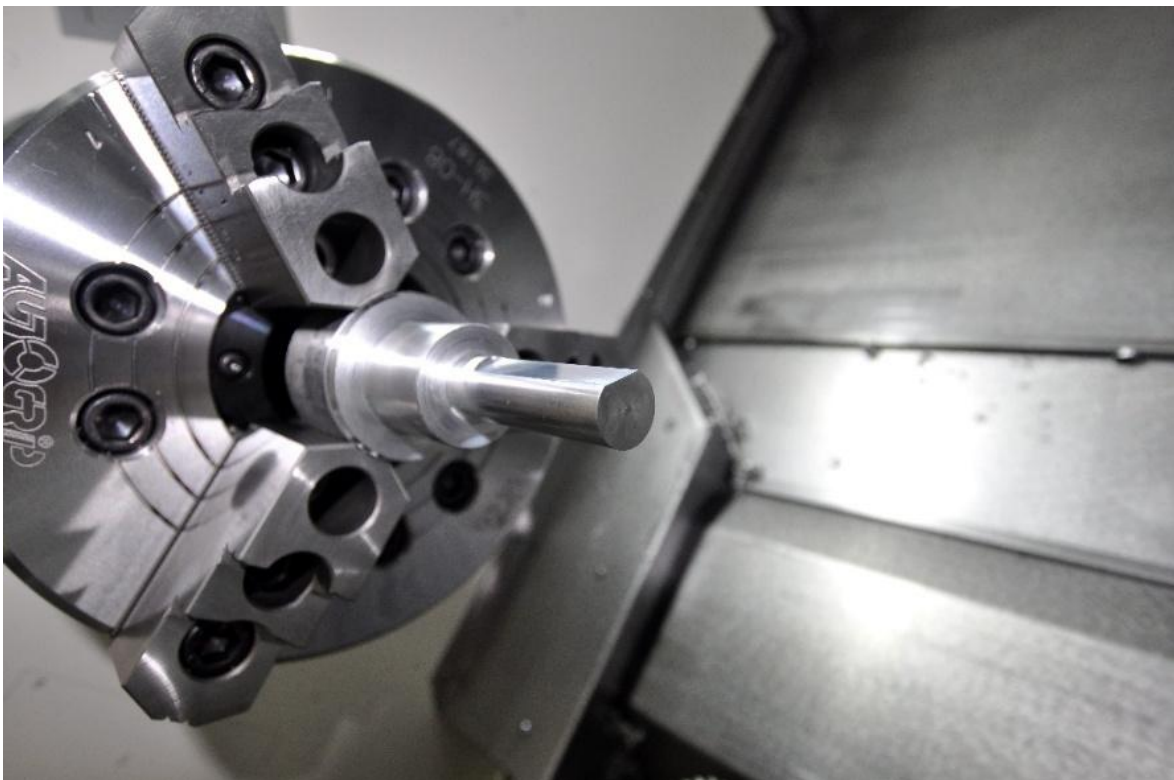
Σχήμα 4.9: Φινίρισμα κυλίνδρου

Στη συνέχεια στο κέντρο φραιζαρίσματος και με χρήση του Shopmill πραγματοποιήθηκε φραιζάρισμα του κυλίνδρου για τη δημιουργία της εγκοπής για παρεμπόδισης της στρέψης του δοκιμίου. Πριν από την κατεργασία πραγματοποιήθηκε μηδενισμός του τεμαχίου με τον αισθητήρα ανίχνευσης ακμών 3d probe. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για το φραιζάρισμα της εγκοπής μετρήθηκε στον προρρυθμιστή εργαλείων.

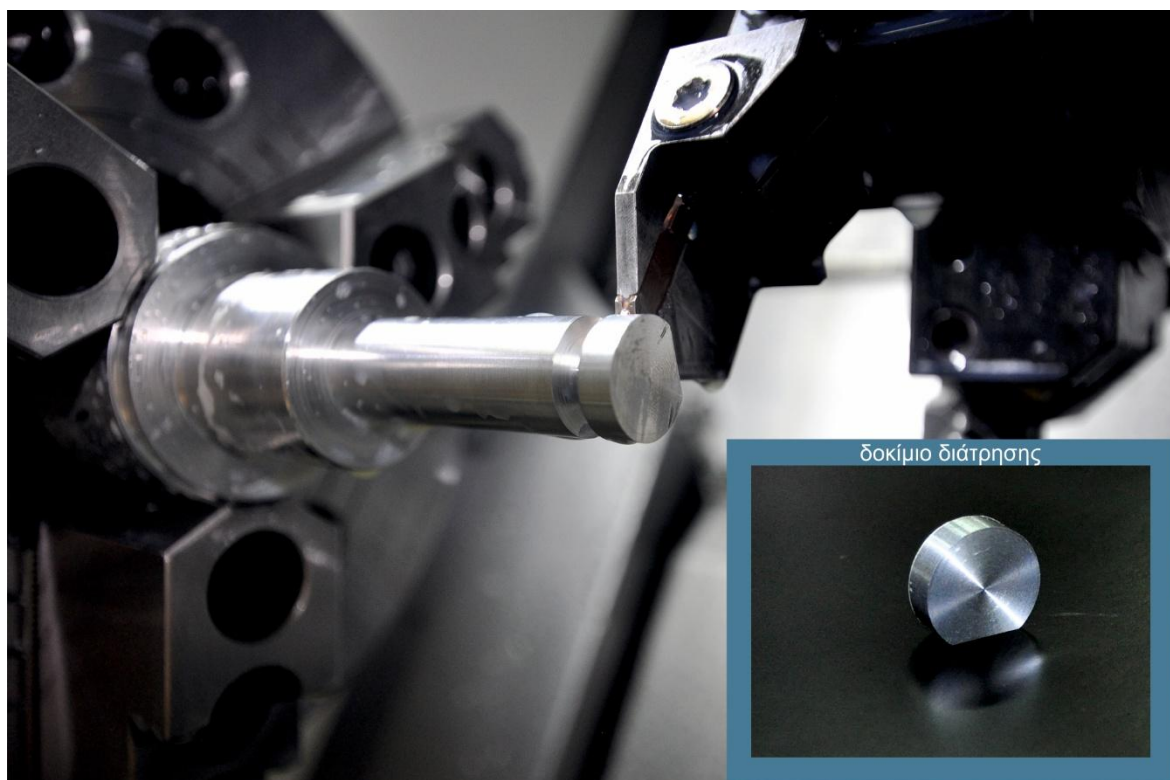


Σχήμα 4.10: Μηδενισμός τεμαχίου και δημιουργία εγκοπής

Τέλος, ο κύλινδρος δέθηκε στο κέντρο τórνευσης για την αποκοπή των δοκιμών αλλά και το φινίρισμα της επιφάνειας εξόδου ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν μικρότερη τραχύτητα που επιτρέπει τη σωστή και ακριβή μετέπειτα χάραξη του καννάβου.

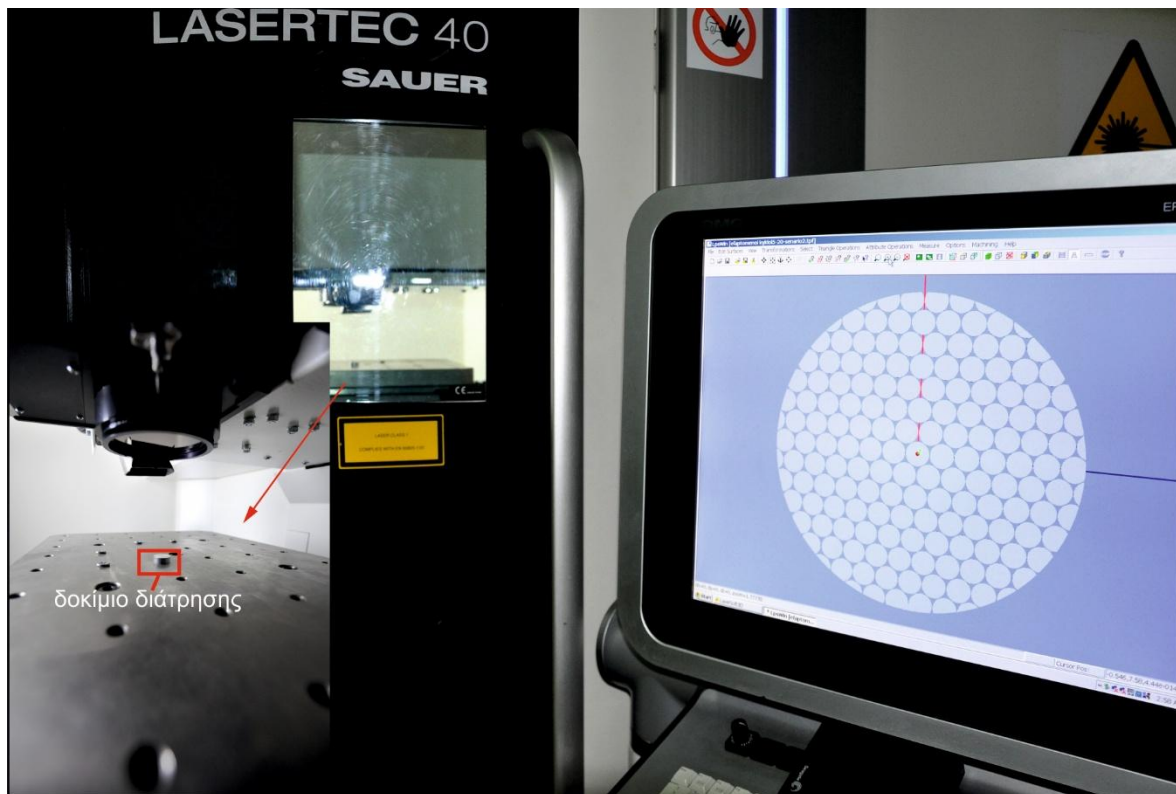






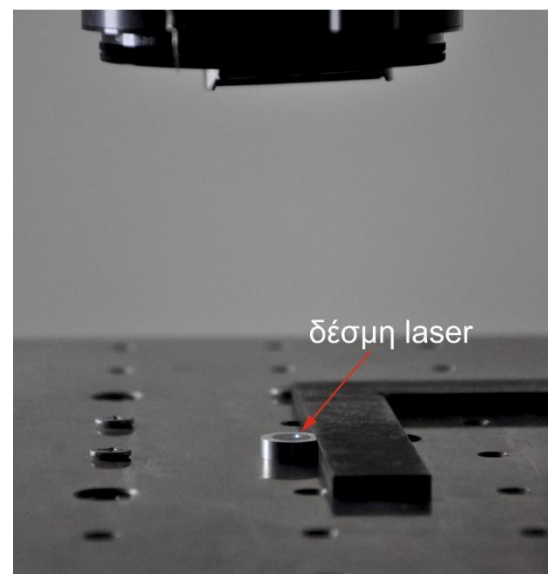
Σχήμα 4.11: Τελικό φινίρισμα και απόσχιση δοκιμίων διάτρησης πάχους 5mm

Με το πέρας της κατασκευής των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε η χάραξη του καννάβου στην επιφάνεια εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, μετά την τριδιάστατη μοντελοποίησή του καννάβου στο λογισμικό τριδιάστατης μοντελοποίησης, το σχέδιο δόθηκε σε μορφή .stl ως είσοδος στο λογισμικό προγραμματισμού LPSWin του Κέντρου χάραξης προκειμένου να γίνει ο προγραμματισμός της κατεργασίας με βάση το σχέδιο. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η εξαγωγή του αρχείου .l4d για να δοθεί ως είσοδος στο λογισμικό ελέγχου της κατεργασίας, Lasersoft 3D. Ακολούθησε εντοπισμός του κέντρου του κυλίνδρου και μηδενισμός του με συντεταγμένες (X, Y, Z) στην επιφάνεια εξόδου με χρήση της ενσωματωμένης κάμερας του κέντρου και παρακολούθησής της μέσα από το λογισμικό Lasersoft 3D. Μέσω του ίδιου λογισμικού έγινε προγραμματισμός καινούριας τεχνικής χάραξης (technology). Η τεχνική χάραξης περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η συχνότητα και η ταχύτητα της δέσμης Laser καθώς και το βάθος επιπέδου χάραξης, οι οποίες προσαρμόζονται αυτόματα από το λογισμικό ανάλογα με τη σύσταση του εκάστοτε, υπό χάραξη, κράματος. Τέλος, με την εκτέλεση του προγράμματος .l4d, πραγματοποιήθηκε η χάραξη του καννάβου σε καθένα από τα δοκίμια.



Σχήμα 4.12: Χάραξη καννάβου

Η διάρκεια χάραξης του κάθε δοκιμίου δεν ξεπέρασε τα 90sec. Στο σχήμα 4.12 καθώς και στο σχήμα 4.13 φαίνεται η τοποθέτηση του δοκιμίου στο τραπέζι του κέντρου χάραξης καθώς και το stl σχέδιο στο λογισμικό LPSWin για τον προγραμματισμό της κατεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγους ορθότερης παρατήρησης της διαδικασίας αλλά και επιβεβαίωσης της επιτυχούς ή μη αποτροπής στρέψης του δοκιμίου κατά τη διάτρηση, ο κάνναβος στο κάτω μέρος περιλαμβάνει δύο κύκλους οι περιφέρειες των οποίων είναι ενωμένες.



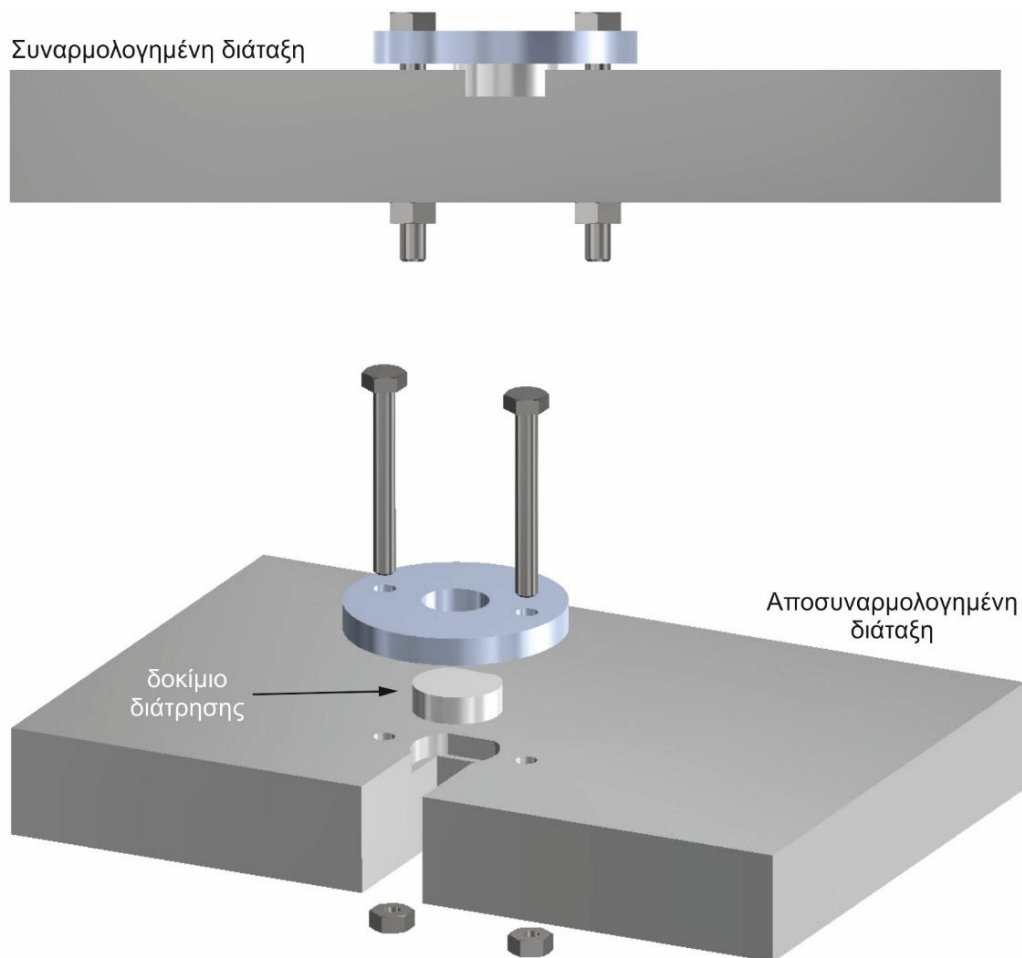
Σχήμα 4.13: Χάραξη καννάβου

#### 4.3.3 Σχεδίαση βάσης συγκράτησης δοκιμών

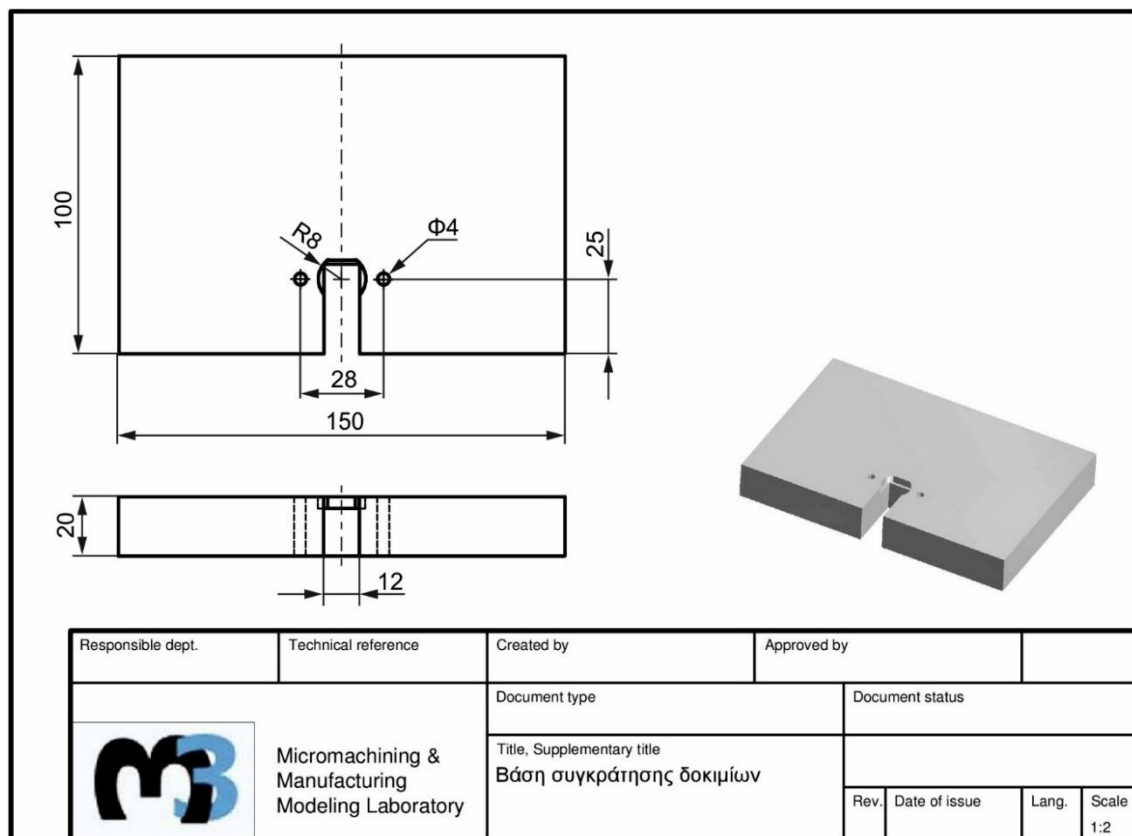
Για τη συγκράτηση των δοκιμών σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε βάση συγκράτησης. Ο τρόπος συγκράτησης του δοκιμίου, που περιγράφεται στη συναρμολογημένη και αποσυναρμολογημένη διάταξη του σχήματος 4.14, προσδιορίστηκε με γνώμονα την ανάγκη παρακολούθησης της κατεργασίας από την κάμερα υψηλής ταχύτητας, ο φακός της οποίας πρέπει να είναι κάθετα τοποθετημένος στην επιφάνεια εξόδου του δοκιμίου. Δεδομένου αυτού, αλλά και της μοναδικότητας τοποθέτησης του εργαλείου στον κάθετο άξονα (Z-axis) του κέντρου κατεργασίας διαμορφώθηκε η βάση ώστε:

- να είναι δυνατή η διεύθυνση του εργαλείου κάθετα στο δοκίμιο, δεδομένων των γεωμετρικών και διαστασιακών περιορισμών του κέντρου κατεργασίας,
- να υπάρχει κυκλική εσοχή τοποθέτησης του δοκιμίου,
- να υπάρχει εγκοπή αντίστοιχη της εγκοπής στο κυκλικό δοκίμιο για την αποτροπή περιστροφής του λόγω δράσης της στρεπτικής ροπής της διάτρησης,
- να υπάρχει κατάλληλη εσοχή η οποία επιτρέπει τον επαρκή φωτισμό της περιοχής διάτρησης και την καταγραφή της κατεργασίας με την κάμερα υψηλής ταχύτητας,
- να επιτευχθεί η σύσφιξη του δοκιμίου μέσω κοχλιοσύνδεσης της βάσης και ενός κυλινδρικού επίσης ελάσματος σύσφιξης.

Στο κυλινδρικό έλασμα σύσφιξης σχεδιάστηκε οπή  $\varnothing 12\text{mm}$  η οποία επιτρέπει την πρόσβαση του εργαλείου στο δοκίμιο, χωρίς να χάνεται η δυνατότητα σύσφιξης του τελευταίου στη βάση.



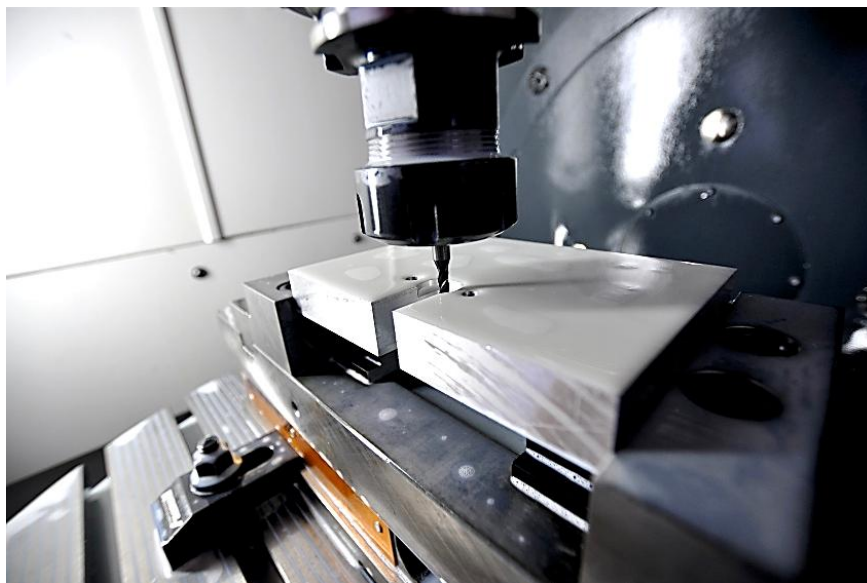
Σχήμα 4.14: Συναρμολογημένο και αποσυναρμολογημένο 3D μοντέλο της ιδιοκατασκευής συγκράτησης των δοκιμίων διάτρησης



Σχήμα 4.15: Συναρμολογημένο και αποσυναρμολογημένο 3D μοντέλο της ιδιοκατασκευής συγκράτησης των δοκιμών διάτρησης

#### 4.3.4 Κατασκευή βάσης συγκράτησης δοκιμών

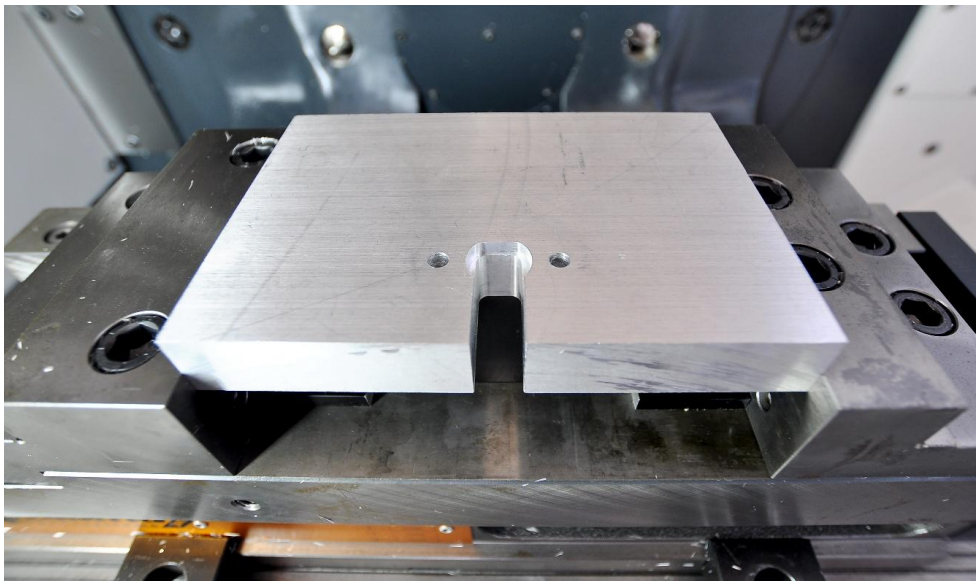
Η κατασκευή της βάσης συγκράτησης πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο κέντρο κατεργασίας DMU50 ecoline, όπου έγινε το φραιζάρισμα της κυκλικής εσοχής και του διαμπερούς αυλακιού καθώς και η διάνοιξη οπών για την κοχλιοσύνδεση της βάσης με το έλασμα σύσφιξης. Το έλασμα σύσφιξης αφού διαμορφώθηκε και αποκόπηκε στον τόρνο, κατεργάστηκε επίσης στο κέντρο κατεργασίας για τη διάνοιξη των απαραίτητων οπών.



Σχήμα 4.16 Κατασκευή βάσης συγκράτησης



Στα σχήματα 4.16, 4.17 και 4.18 φαίνεται η βάση κατά την κατεργασία της, μετά το πέρας όλων των κατεργασιών και η συναρμολογημένη ιδιοκατασκευή συγκράτησης των δοκιμών διάτρησης αντίστοιχα.



Σχήμα 4.17: Βάση συγκράτησης μετά το πέρας των κατεργασιών



Σχήμα 4.18: Συναρμολόγηση ιδιοκατασκευής συγκράτησης των δοκιμών διάτρησης

#### 4.3.5 Προσδιορισμός συνθηκών πειραματικής διαδικασίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων κοπής, συγκεκριμένα της ταχύτητας κοπής  $v_c$  και της πρόωσης  $f_n$  στη δημιουργία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής και ισάριθμες προώσεις, δημιουργώντας συνολικά 9 συνδυασμούς παραμέτρων προς πειραματική διερεύνηση. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων κοπής κάθε πειράματος.

Προκειμένου να εισαχθούν ως δεδομένα στη μηχανή, οι παράμετροι της πρόωσης ανά περιστροφή  $f_n$  και της ταχύτητας κοπής  $v_c$  μετασχηματίστηκαν σε ταχύτητα πρόωσης  $F$  (mm/min) και ταχύτητα περιστροφής  $S$  (rpm) με βάση τους τύπους των εξισώσεων 2.1 και 2.2:

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \text{ (m/min)}, \text{ όπου } n=S : \text{ η ταχύτητα περιστροφής}$$

$$v_f = F = f_n \times n \text{ (mm/min)}$$

α/α πειρά- ματος	Πρόωση $f_n$ (mm/rev)	Ταχύτητα Κοπής $v_c$ (m/min)
1	0.1	37
2	0.1	56
3	0.1	75
4	0.15	37
5	0.15	56
6	0.15	75
7	0.2	37
8	0,2	56
9	0,2	75

Πίνακας 4.1: Παράμετροι πειραματικής διαδικασίας

Στον πίνακα 4.2 αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων που τελικά εισήχθησαν στο σύστημα ελέγχου της μηχανής.

α/α πειράματος	Ταχύτητα πρόωσης F (mm/min)	Ταχύτητα περιστροφής S (rpm)
1	200	2000
2	300	3000
3	400	4000
4	300	2000
5	450	3000
6	600	4000
7	400	2000
8	600	3000
9	800	4000

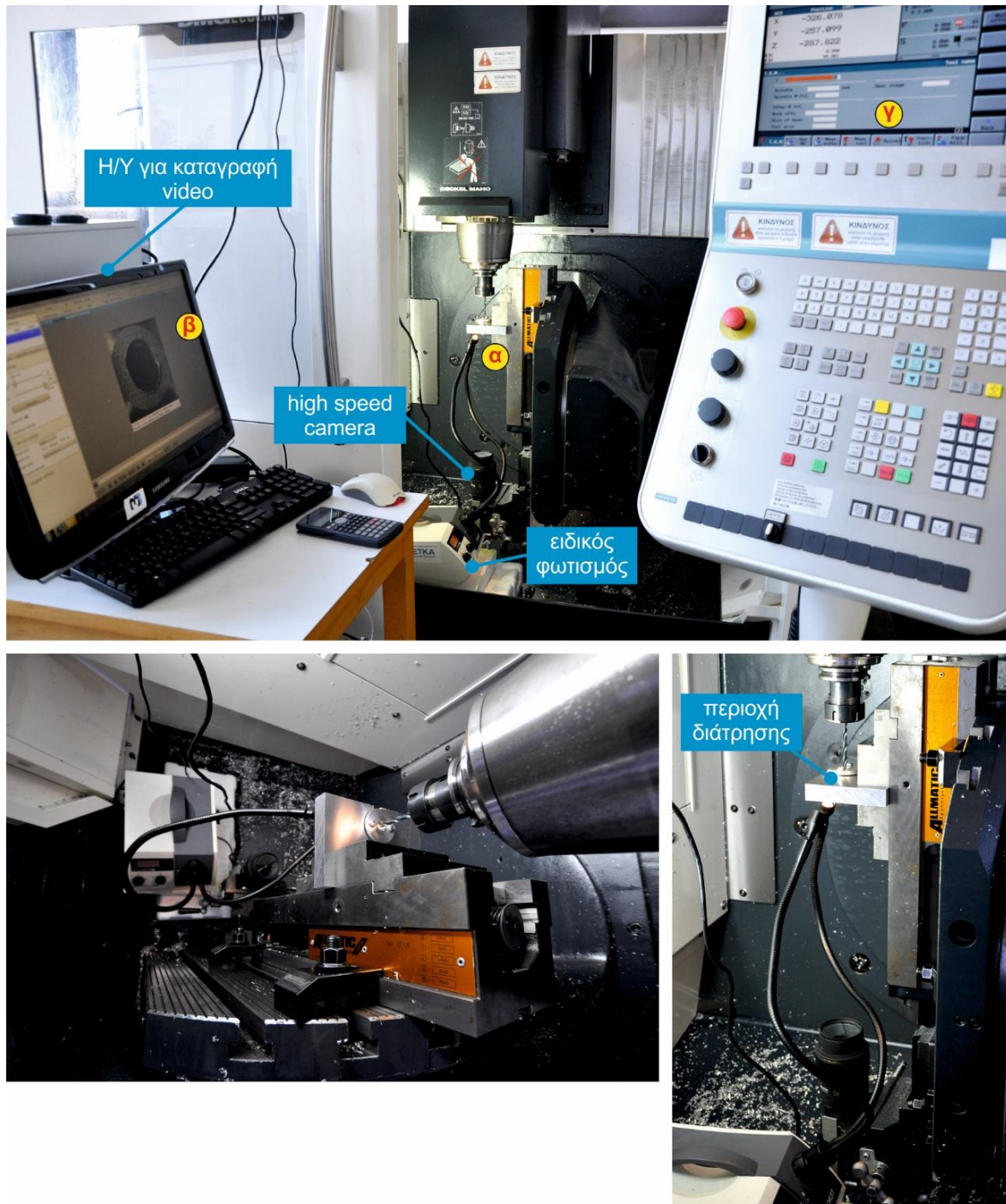
Πίνακας 4.2: Τιμές εισόδου στο λογισμικό ελέγχου του κέντρου κατεργασίας



#### 4.4 Πειραματική διαδικασία

Στο σχήμα 4.19 φαίνεται η διάταξη της πειραματικής διαδικασίας και το σύνολο του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων διάτρησης.

**α. Περιοχή διάτρησης:** Αρχικά διαμορφώθηκε η περιοχή της διάτρησης. Για το σκοπό αυτό, η συναρμολογημένη διάταξη της βάσης συγκράτησης με το δοκίμιο και το έλασμα σύσφιξης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19, δέθηκε στη μέγγενη Allmatic LC125



Σχήμα 4.19 : Διάταξη πειραμάτων διάτρησης στο κέντρο κατεργασίας

Η συγκεκριμένη μέγγενη έχει τη δυνατότητα σταθερής συγκράτησης τεμαχίων με εφαρμογή δύναμης έως και 4tn. Έπειτα, η κάμερα δέθηκε σε δεύτερη μέγγενη, προσαρμοσμένη σε

σταυρωτό τραπέζι X-Y για να είναι δυνατή η ασφαλής και γρήγορη μετατόπισή της στους δυο άξονες. Αυτό κατέστη απαραίτητο λόγω της ανάγκης για πολύ μικρή περιοχή καταγραφής (μεγάλο ζουμ και μικρό καρέ και της πολύ μικρής περιοχής εστίασης του φακού και άρα της ανάγκης για συνεχή και ακριβή προσαρμογή της. Στη συνέχεια, λόγω της δυνατότητας τοποθέτησης του εργαλείου μόνο κατά τον Z-άξονα, το τραπέζι περιστράφηκε κατά  $90^\circ$  ώστε η βάση συγκράτησης και κατ' επέκταση οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου του εργαλείου διάτρησης, να τοποθετηθούν κάθετα στον άξονα του εργαλείου. Τέλος, τοποθετήθηκε ειδική πηγή φωτισμού με δύο εύκαμπτους σωλήνες που καταλήγουν σε δύο λαμπτήρες για τον επαρκή φωτισμό της περιοχής διάτρησης, καθότι είναι απαραίτητος για την καταγραφή βίντεο σε τόσο υψηλές ταχύτητες.

**β. Περιοχή καταγραφής:** Η κάμερα υψηλής ταχύτητας συνδέθηκε αφενός με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και αφετέρου με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή ώστε να είναι δυνατή, μέσω του λογισμικού MotionBlitz η καταγραφή, η αναπαραγωγή και αποθήκευση του βίντεο αλλά και των μεμονωμένων καρέ.


**γ. Περιοχή προγραμματισμού και ελέγχου του πειράματος:** Μέσω του χειριστηρίου ελέγχου του κέντρου κατεργασίας έγινε μηδενισμός του δοκιμίου αλλά και προγραμματισμός σε G κώδικα της διαδικασίας διάτρησης, ώστε να είναι ελεγχόμενες και μεταβαλλόμενες οι παράμετροι της ταχύτητας περιστροφής, πρόωσης αλλά και η θέση εκκίνησης του εργαλείου ώστε να προσαρμόζεται ανάλογα με την πρόωση και την ταχύτητα καταγραφής του βίντεο.




#### 4.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Από την πειραματική διαδικασία, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, προέκυψαν τα εννέα δοκίμια που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3 με οπές διαμέτρου 6mm στο κέντρο τους. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό με μία ποιοτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων, η αλλαγή των παραμέτρων της κατεργασίας, έχει μεγάλη επίδραση στο σχηματισμό της απόληξης, δηλαδή το μέγεθος και τη μορφή της.

Πιο συγκεκριμένα, μικρές τιμές τις πρόωσης συμβάλλουν στην αύξηση της ανομοιομορφίας της απόληξης, ενώ όταν η διάτρηση πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης, η απόληξη που σχηματίζεται είναι πιο ομοιόμορφη και μικρότερη σε μέγεθος. Ένα επίσης συμπέρασμα που εξάγεται ποιοτικά, είναι ότι η ταχύτητα περιστροφής ως παράγοντας επιδρά περισσότερο σε χαμηλές παρά σε υψηλές προώσεις.

Πέρα από τα δοκίμια διάτρησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3, από την καταγραφή της πειραματικής διαδικασίας προέκυψαν ισάριθμα βίντεο καθώς και τα μεμονωμένα καρέ από τα οποία αυτά αποτελούνται. Όλα τα βίντεο εγγράφηκαν με ταχύτητα αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας πρόωσης ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση κατά την ταυτόχρονη αναπαραγωγή τους.

α/α Πειρά- ματος	Πρώση (mm/rev)	Ταχύτητα περι- στροφής (rpm)	Δοκίμιο	Τύπος Απόληξης
1	0.1	2000		Μικρή ομοιόμορφη
2	0.1	3000		Τύπου Crown
3	0.1	4000		Τύπου Crown
4	0.15	2000		Τύπου Crown
5	0.15	3000		Μικρή Ομοιόμορφη
6	0.15	4000		Τύπου Crown

α/α Πειράματος	Πρόωση (mm/rev)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Δοκίμιο	Τύπος
7	0.2	2000		Μεγάλη Ομοιόμορφη
8	0.2	3000		Μεγάλη Ομοιόμορφη
9	0.2	4000		Μικρή Ομοιόμορφη

Πίνακας 4.3: Δοκίμια μετά τη διάτρηση οπών Ø 6mm

Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο ότι οι δυνατές τιμές της ταχύτητας εγγραφής ήταν από 5 έως 30 fps (fps: καρέ ανά δευτερόλεπτο) επιλέχθηκε ως ταχύτητα αναφοράς η ταχύτητα για το πείραμα με ταχύτητα πρόωσης  $F=800\text{mm/min}$ . Οι υπόλοιπες ταχύτητες εγγραφής προσαρμόστηκαν κατ' αναλογία με την ταχύτητα αναφοράς και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

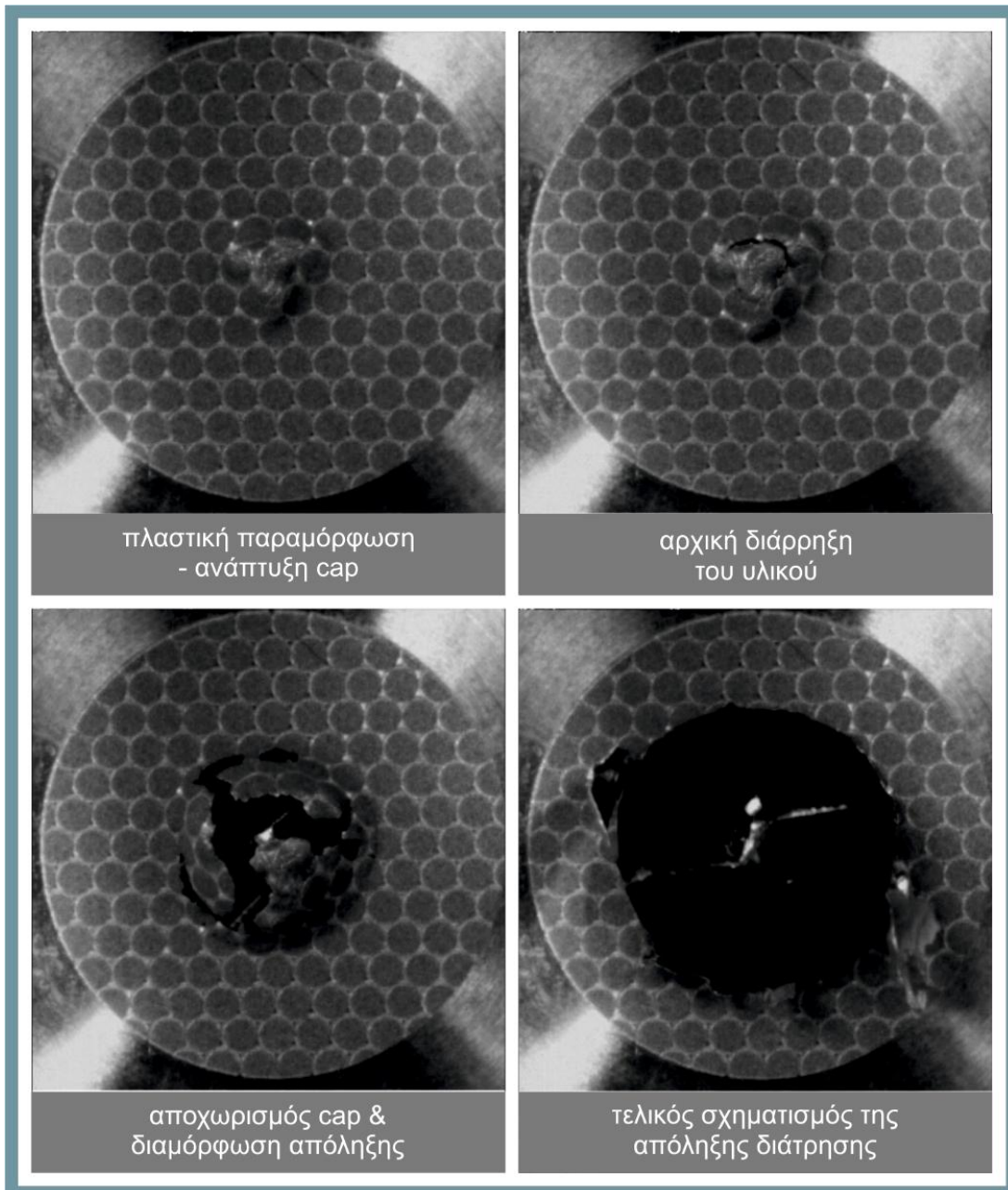
α/α Πειράματος	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Ταχύτητα εγγραφής (fps)
1	200	24
2	300	16
3	400	12
4	300	16
5	450	10,67≈11
6	600	8
7	400	12
8	600	8
9	800	6

Πίνακας 4.4: Ταχύτητες εγγραφής των βίντεο υψηλής ταχύτητας με βάση την ταχύτητα πρόωσης



Στο σχήμα 4.20 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά καρέ από την καταγραφή της κατεργασίας, στα οποία παρατηρούνται οι ακόλουθες τέσσερις διακριτές φάσεις σχηματισμού της απόληξης διάτρησης:

- αρχική πλαστική παραμόρφωση και ανάπτυξη του cap,
- η αρχική διάρρηξη του υλικού,
- ο αποχωρισμός του cap και η διαμόρφωση της απόληξης,
- ο τελικός σχηματισμός της απόληξης διάτρησης.



Σχήμα 4.20: Χαρακτηριστικά καρέ από την καταγραφή της κατεργασίας

## 5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων

#### Στερεομικροσκόπιο Leica M125

Το στερεοσκόπιο Leica M125 είναι ένα όργανο μέτρησης και παρατήρησης της εξωτερικής μορφολογίας αντικειμένων. Διαθέτει αντικειμενικούς φακούς μεταβαλλόμενης εστιακής απόστασης από 8x έως 100x με ικανότητα μέγιστης μεγέθυνσης των αντικειμένων κατά 800x και μέγιστης ανάλυσης 864lp/mm. Μπορεί να εντοπίσει αντικείμενα ελάχιστου μήκους 578nm. Περιλαμβάνει σύστημα ρυθμιζόμενου ψυχρού φωτισμού με πηγές LED. Το στερεοσκόπιο λειτουργεί συνεργαζόμενο με το λογισμικό Leica Application Suite (LAS) το οποίο δίνει τη δυνατότητα πληθώρας ρυθμίσεων κατά την παρατήρηση και τη λήψη φωτογραφιών καθώς και πολλές επιλογές για την επεξεργασία αυτών.

#### 3D Οπτικό Προφیلόμετρο Bruker Contour GT-K

Το προφιλόμετρο Bruker contour GT-K αποτελεί ένα πολύ δυνατό εργαλείο για την άρτια μέτρηση και απεικόνιση της τοπομορφίας και της τραχύτητας επιφανειών σε τρεις διαστάσεις. Το εμβαδό της επιφάνειας που μπορεί να μετρήσει με τον αντικειμενικό φακό 10x, είναι 0,62mm x 0,47mm, ενώ μπορεί να εντοπίσει λεπτομέρειες μικρότερες του 1nm

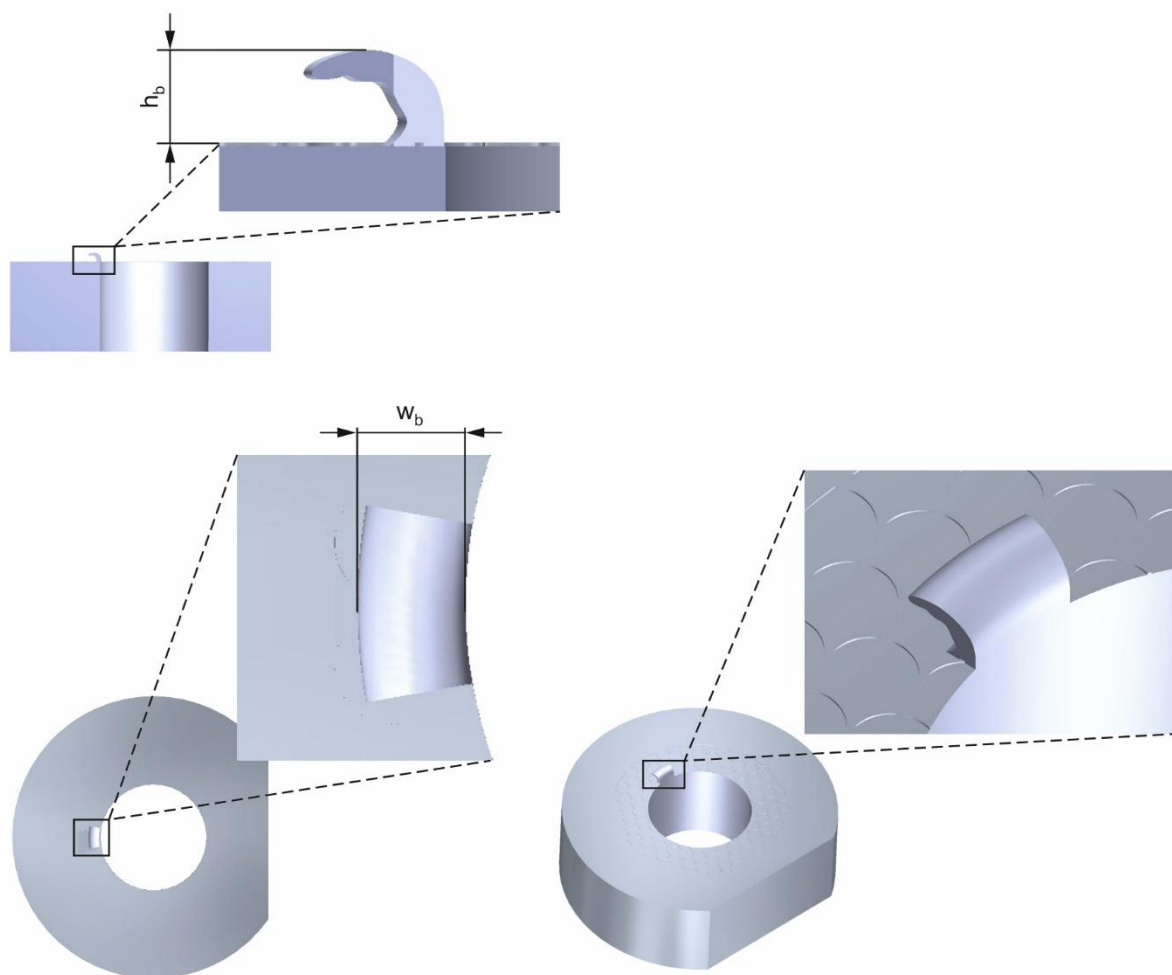


Σχήμα 5.1: Οπτικό Στερεομικροσκόπιο Leica M125 (αριστερά) και Οπτικό προφιλόμετρο Bruker ContourGT-K (δεξιά)



## 5.2 Μετρητική διαδικασία

Στα πλαίσια της εργασίας σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προκειμένου να μετρηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των απολήξεων διάτρησης που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση του εξοπλισμού που παρουσιάστηκε παραπάνω, μετρήθηκαν το ύψος  $h_b$  και το πλάτος  $w_b$  της απόληξης διάτρησης γύρω από τις περιφέρειες των οπών των δοκιμίων. Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2, έχει παρατηρηθεί και αποδειχθεί ότι δύο από τους παράγοντες που επιδρούν περισσότερο και εντείνουν τις συνέπειες σχηματισμού απόληξης διάτρησης είναι το ύψος της, το οποίο μετράται από τη βάση έως το σημείο που απέχει περισσότερο από αυτή και το πάχος της βάσης το οποίο μετράται επάνω στην επιφάνεια εξόδου κατά την ακτινική διεύθυνση, από την περιφέρεια της οπής έως το σημείο στο οποίο εκτείνεται η απόληξη. Λόγω της αδυναμίας μέτρησης του πάχους βάσης της απόληξης με τον υπάρχοντα εξοπλισμό, το μέγεθος αυτό αντικαταστάθηκε από το πλάτος της απόληξης  $w_b$ , το οποίο είναι η ίδια απόσταση από την περιφέρεια της οπής έως το πιο απομακρυσμένο σημείο της απόληξης κατά την ακτινική διεύθυνση, αλλά στο μέγιστο ύψος της, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.

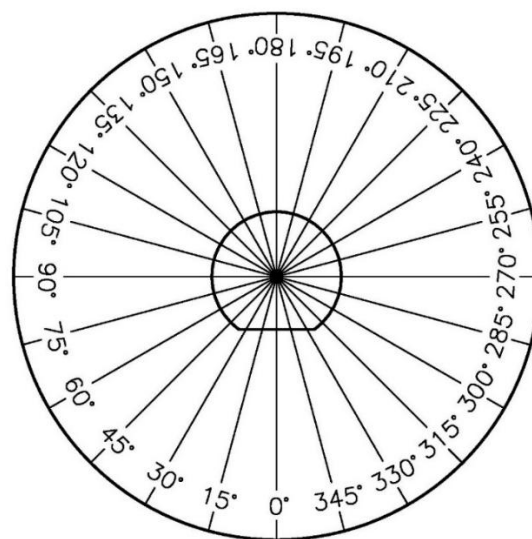


Σχήμα 5.2: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Απόληξης διάτρησης

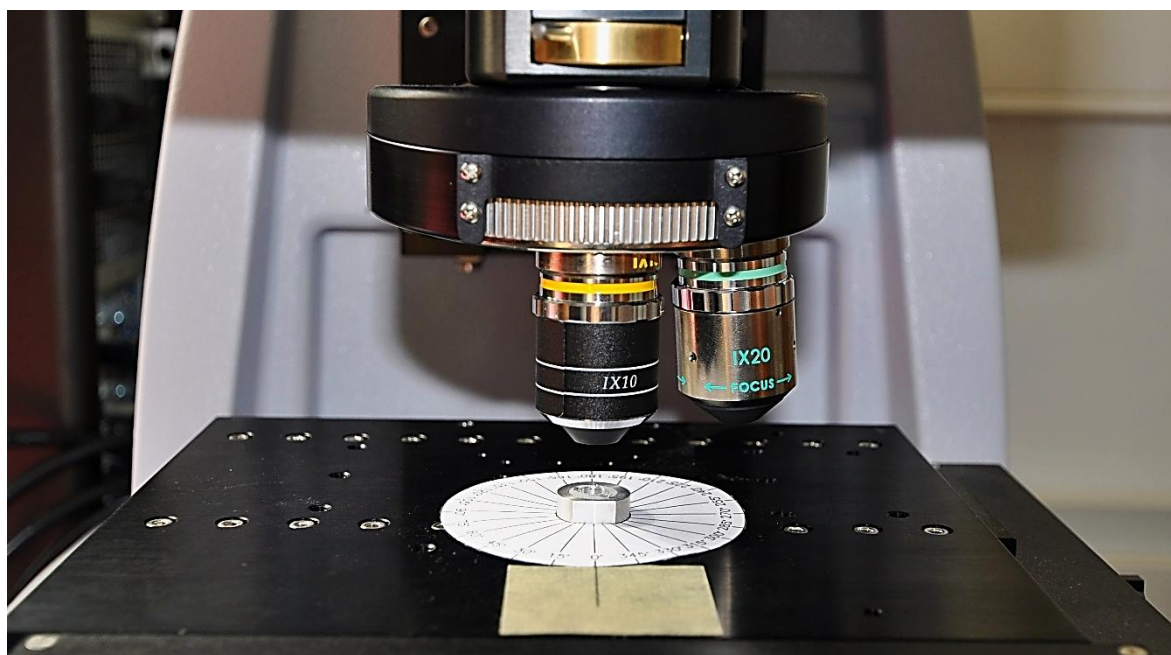
Προκειμένου να γίνει επαρκής και σχετικά ακριβής αποτύπωση της απόληξης, καθορίστηκαν 24 θέσεις μέτρησης γύρω από την περιφέρεια της οπής, επομένως οι μετρήσεις ελήφθησαν ανά 15° θεωρώντας τις 0° ως σημείο έναρξης των μετρήσεων. Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης πραγματοποιούνταν κάθε φορά στο επάνω ακραίο σημείο της περιφέρειας της οπής.

Για να επιτευχθεί η σωστή τοποθέτηση και περιστροφή του δοκιμίου σε κάθε γωνία μέτρησης σχεδιάστηκε η βάση που φαίνεται στο σχήμα 5.3 επάνω στην οποία τοποθετήθηκαν τα δοκίμια για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Η βάση έχει 24 ακτίνες για την ακριβή υπόδειξη των μοιρών σε κάθε γωνία καθώς και σχέδιο του περιγράμματος του δοκιμίου στις πραγματικές του διαστάσεις για τη σωστή τοποθέτησή του στη βάση. Η φορά περιστροφής και ο τρόπος τοποθέτησης των ακτίνων περιγράφονται παρακάτω.

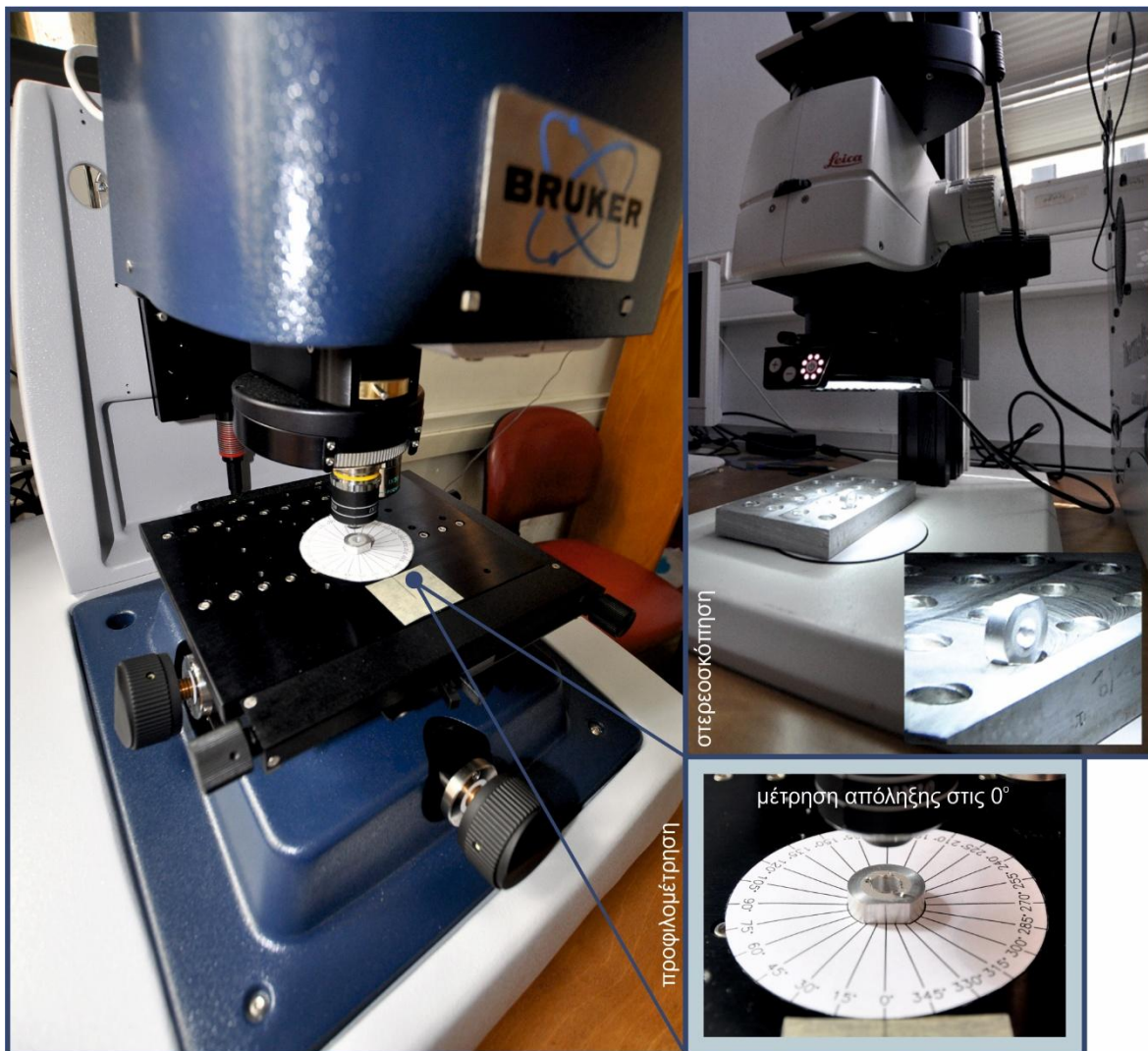


Σχήμα 5.3: Βάση δοκιμίων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων



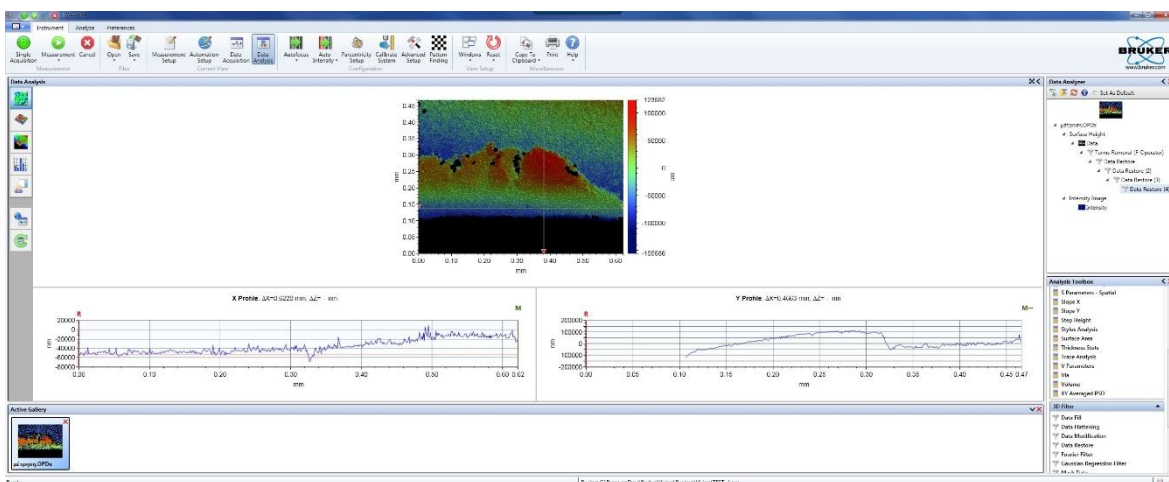
Σχήμα 5.4: Προφίλομέτρηση

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 και στο σχήμα 5.5, το δοκίμιο αφού προσαρμόστηκε επάνω στη χάρτινη βάση, τοποθετήθηκε στο τραπέζι του οπτικού προφιλόμετρου με τέτοιο τρόπο ώστε το κέντρο του φακού να στοχεύει πάντα το άνω ακραίο σημείο της περιφέρειας της οπής. Με τη βοήθεια του δείκτη που προσαρμόστηκε στο τραπέζι, η βάση με τις μοίρες τοποθετήθηκε έτσι ώστε οι 0 μοίρες να αντιστοιχούν στην αρχική θέση του δοκιμίου με την επίπεδη πλευρά του οριζόντια, ενώ με αριστερόστροφη περιστροφή της βάσης για μέτρηση στις 15°, 30° κ.λπ., η φορά συμπλήρωσης των 360° να είναι δεξιόστροφη. Η δυνατότητα μεταφοράς του τραπεζιού του προφιλόμετρου κατά τους άξονες X και Y, έκανε δυνατή τη ρύθμιση της θέσης του δοκιμίου έτσι ώστε ο άξονας του φακού να περνά από το εκάστοτε άνω ακραίο σημείο της οπής μετά και την έκκεντρη ως προς αυτόν περιστροφή του τεμαχίου κατά 15°.



Σχήμα 5.5: Μετρήσεις απόληξης με το οπτικό προφιλόμετρο και το οπτικό στερεοσκόπιο

Μετά την αρχική τοποθέτηση της βάσης και του δοκιμίου και μέσα από το λογισμικό Vision64, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, πραγματοποιήθηκαν 24 μετρήσεις του ύψους και πλάτους της απόληξης σε κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία της μέτρησης περιελάμβανε:



Σχήμα 5.6: Περιβάλλον λογισμικού Vision64

- Αρχική ρύθμιση της θέσης του τεμαχίου ώστε ο άξονας του φακού να διέρχεται από το άνω ακραίο σημείο της περιφέρειας της οπής.
- Ικανοποιητική εστίαση του φακού στην επιφάνεια εξόδου το δοκιμίου με τη βοήθεια των κροσσών συμβολής.
- Λήψη της μέτρησης.

Για τη λήψη όλων των μετρήσεων απαιτήθηκαν επιπλέον ρυθμίσεις στο λογισμικό μέτρησης, όπως το εύρος της σάρωσης του φακού πάνω και κάτω από την επιφάνεια εστίασης (backscan, length), η πολλαπλή ανάκτηση δεδομένων (data restore) σε περιπτώσεις όπου λόγω της τοπομορφίας της επιφάνειας και της ελλειπούς σάρωσης έλειπαν σημεία από την τελική μετρημένη επιφάνεια κ.λπ.

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της κάθε μέτρησης όπως αυτά προέκυψαν για τις 24 θέσεις σε κάθε ένα από τα εννέα δοκίμια. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το οποίο αντιστοιχεί στη γωνία μέτρησης 105° και στο δοκίμιο 3, για κάθε μέτρηση ελήφθησαν:

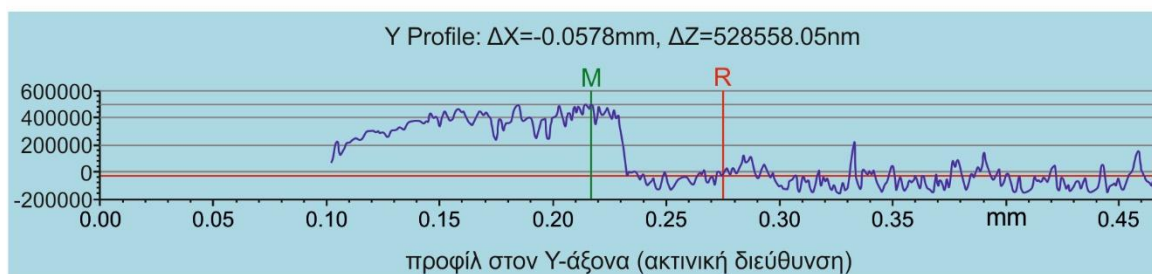
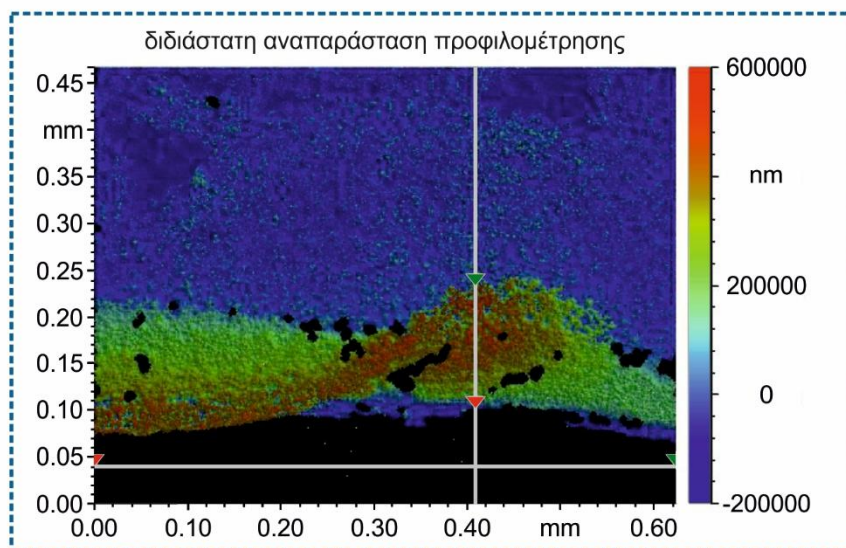
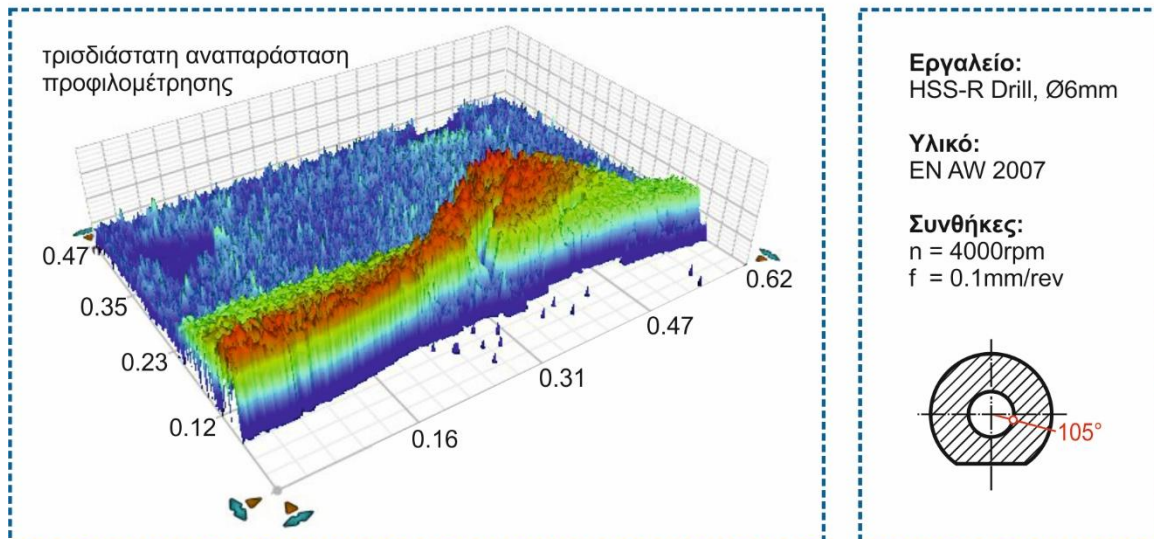
- η διδιάστατη αναπαράσταση της προφίλομέτρησης. Οι διαστάσεις του παραθύρου της διδιάστατης αναπαράστασης αντιστοιχούν στις διαστάσεις του οπτικού πεδίου του συγκεκριμένου φακού, δηλαδή 0.62 x 0.47 mm (X x Y). Δεξιά του παραθύρου υπάρχει η μία χρωματική κλίμακα η οποία αντιστοιχεί κατά βάση στον άξονα Z και διαχωρίζει τα διαφορετικά ύψη της απόληξης σε συγκεκριμένες κλάσεις. Για κάθε δοκίμιο ανάλογα με το ελάχιστο και μέγιστο ύψος επιλέχθηκε ένα εύρος για τη χρωματική κλίμακα το οποίο διατηρούνταν σταθερό σε όλες τις 24 μετρήσεις ώστε να είναι διακριτή και συγκρίσιμη η διαφορά στα ύψη μεταξύ διαφορετικών μετρήσεων.
- Η τριδιάστατη απεικόνιση της προφίλομέτρησης η οποία είναι μια μεταφορά της παραπάνω περιγραφόμενης διδιάστατης αναπαράστασης στο χώρο με την ενσωμάτωση σε αυτήν του άξονα Z, μέσω της χρωματικής κλίμακας. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα περιστροφής του τριδιάστατου διαγράμματος για την πληρέστερη επισκόπηση της τοπομορφίας της απόληξης.
- Το ακτινικό Y - προφίλ της επιφάνειας (διεύθυνση ακτίνας οπής) στο οποίο διακρίνονται:
  - η περιοχή της οπής από την απουσία υλικού, δηλαδή τη μη ύπαρξη καμπύλης (αριστερό μέρος διαγράμματος),
  - η περιοχή της απόληξης, με διακριτά υψηλότερα σημεία της καμπύλης (κέντρο διαγράμματος) και
  - η περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου με τα χαμηλότερα σημεία της καμπύλης (δεξιά περιοχή διαγράμματος).

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα εξάγονται πληροφορίες και για τα δύο μεγέθη που ενδιαφέρουν (πλάτος, ύψος) τοποθετώντας τους δείκτες R και M στις κατάλληλες θέσεις. Για μεν το πλάτος, στις ακραίες θέσεις της απόληξης (ακραία υψηλά σημεία καμπύλης) και για δε το ύψος, τοποθετώντας το δείκτη M στο πιο υψηλό σημείο της απόληξης, ενώ το R σε ένα από τα κοντινά σημεία της επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι η θέση στην οποία έγιναν οι τομές της οπής για τα διαγράμματα του προφίλ της, επιλέγονται από τη μετακίνηση της γραμμής - δείκτη στη διδιάστατη απεικόνιση.



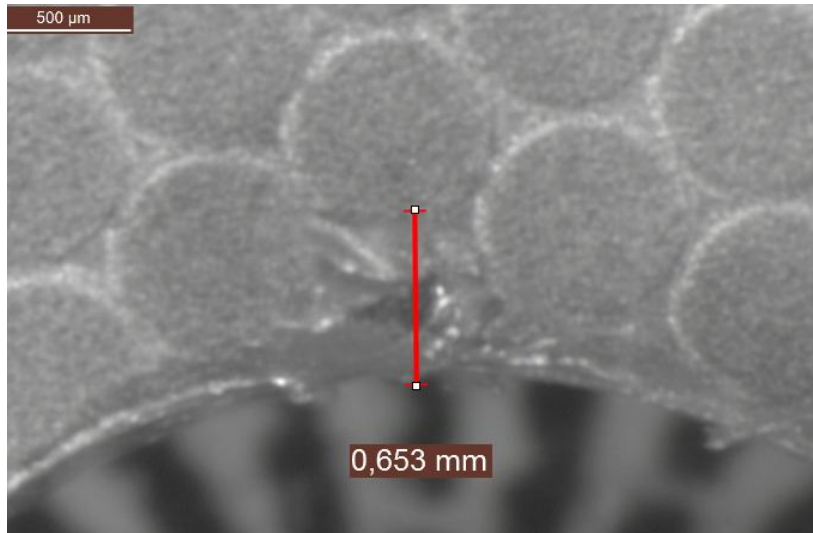


Δοκίμιο διάτρησης 3, Γωνία μέτρησης 105°

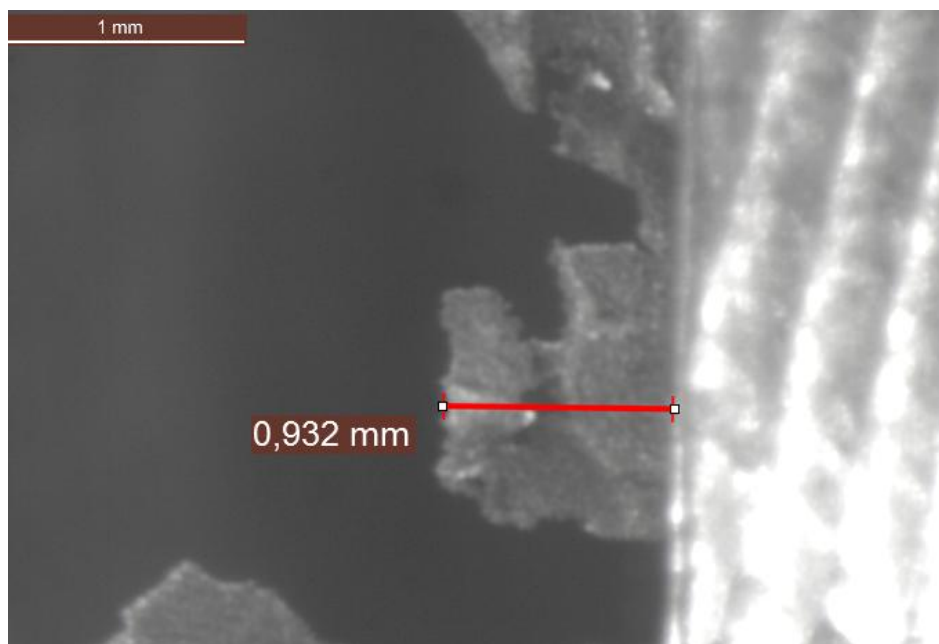


Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα μετρήσεων σε μία ενδεικτική γωνία μέτρησης

Τέλος, λόγω του περιορισμένου οπτικού πεδίου του συγκεκριμένου φακού ( $0.62 \times 0.47 \text{ mm}$ ), υπήρξαν αρκετές θέσεις στις οποίες το μεγάλο μέγεθος της απόληξης επέβαλε τη μέτρηση των απολήξεων στο οπτικό στερεοσκόπιο που φαίνεται στο σχήμα 5.4 και περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 5.2. Στα σχήματα 5.8 και 5.9 φαίνονται δύο φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο σε μία θέση μέτρησης στις οποίες σημειώνεται, μέσω του λογισμικού Leica Application Suite, το πλάτος και το ύψος της απόληξης αντίστοιχα.



Σχήμα 5.8: Μέτρηση πλάτους απόληξης με το οπτικό στερεομικροσκόπιο



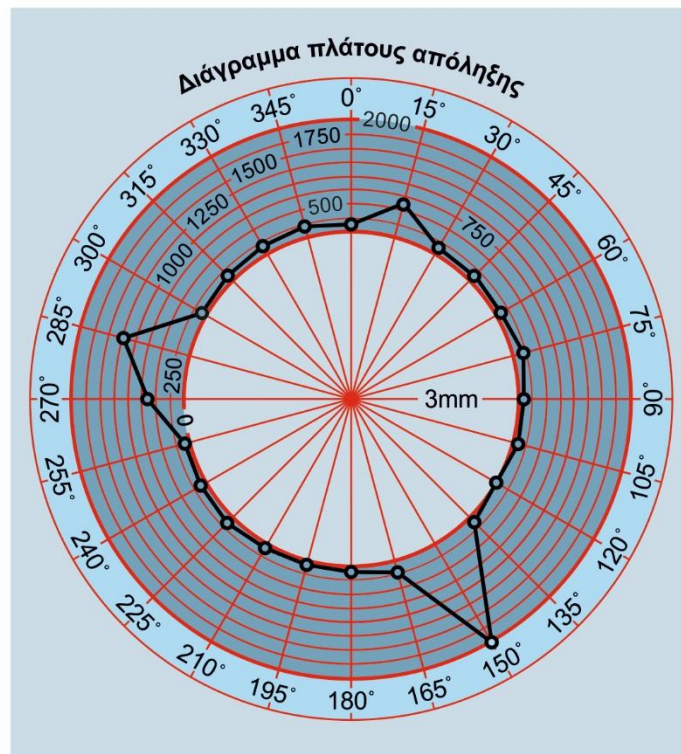
Σχήμα 5.9: Μέτρηση ύψους απόληξης με το οπτικό στερεομικροσκόπιο

Πέραν των αναλυτικών αποτελεσμάτων σε κάθε θέση μέτρησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω, στο σχήμα 5.10 καθώς και στα σχήματα του Παραρτήματος φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απόληξης διάτρησης για κάθε ένα από τα εννέα δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα του σχήματος παρουσιάζονται οι τιμές του ύψους  $h_b$  και του πλάτους  $w_b$ , στο κυκλικό διάγραμμα φαίνονται οι τιμές του πλάτους σε κάθε γωνία μέτρησης, ενώ υπάρχει και διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται οι αντίστοιχες τιμές του ύψους.



**Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 4**

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	278,4	168,8
15	<b>506,0</b>	629,0
30	231,8	126,6
45	356,3	126,1
60	240,5	87,2
75	360,5	179,7
90	292,2	83,0
105	212,8	91,0
120	0,0	0,0
135	327,8	107,6
150	492,0	<b>2035,0</b>
165	332,6	218,1
180	268,6	105,7
195	392,0	101,0
210	320,4	108,6
225	296,5	169,7
240	328,1	130,4
255	472,3	116,2
270	442,0	694,0
285	478,0	1264,0
300	95,7	129,8
315	241,2	161,2
330	280,0	201,1
345	256,4	228,1



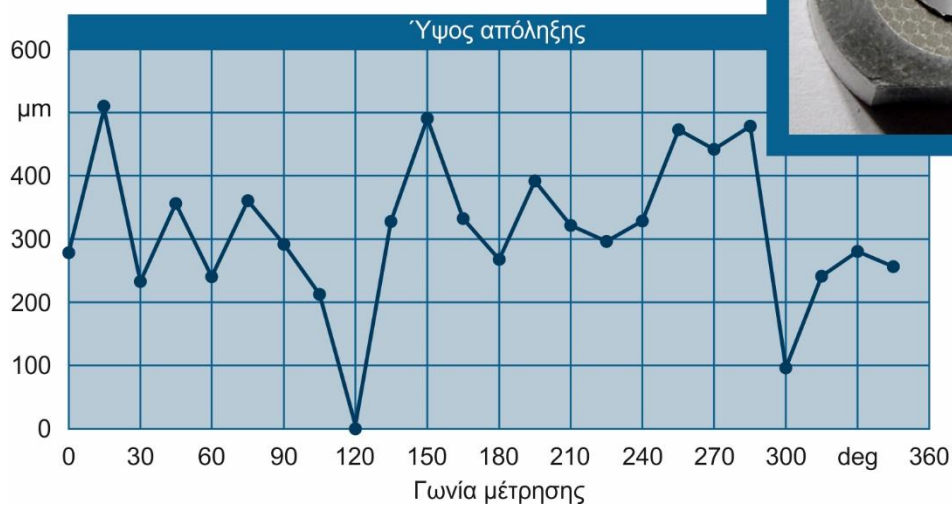
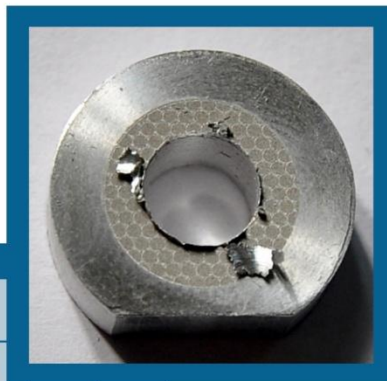
**Εργαλείο:**  
HSS-R Drill,  $\varnothing 6\text{mm}$

**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000\text{rpm}$   
 $f = 0,15\text{mm/rev}$

**Μέγιστο ύψος:**  
 $h_{b\text{max}} = 506\mu\text{m} - 15^\circ$

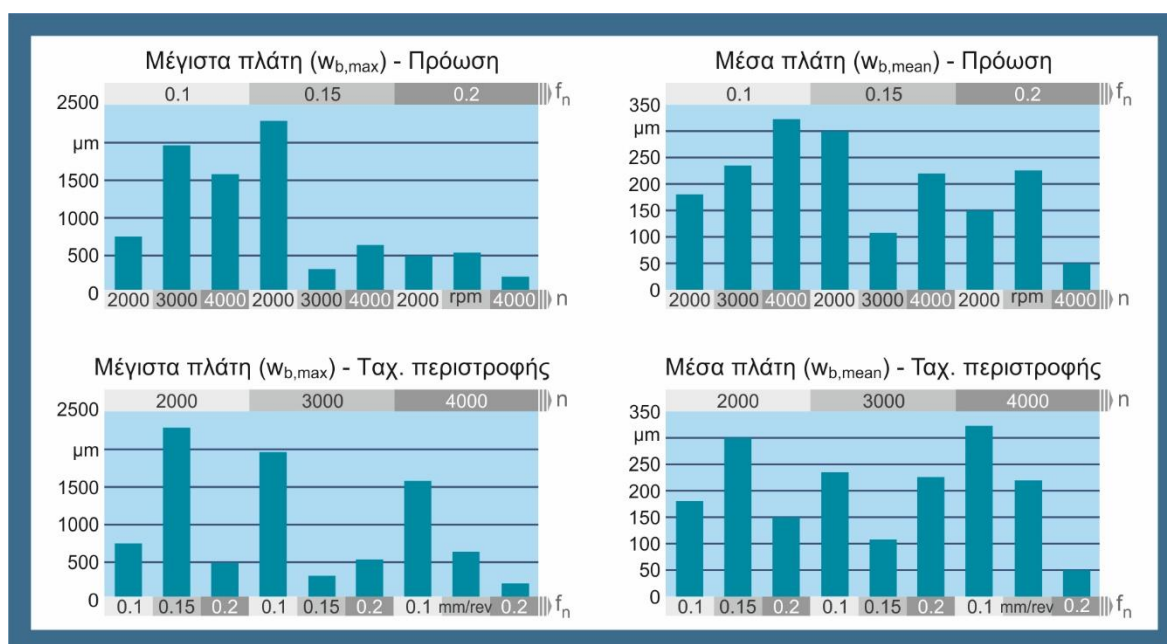
**Μέγιστο πλάτος:**  
 $w_{b\text{max}} = 2035\mu\text{m} - 150^\circ$



Σχήμα 5.10: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων ύψους και πλάτους απόληξης διάτρησης για το δοκίμιο 4.

Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται διαγράμματα των μέγιστων και μέσων τιμών του πλάτους της απόληξης για καθένα από τα πειράματα, εστιάζοντας αφενός στην επίδραση της πρόωσης και αφετέρου στην επίδραση της ταχύτητας περιστροφής. Είναι προφανές ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τις μέσες τιμές του πλάτους αφορούν συνολικά την ποσότητα της απόληξης σε κάθε οπή, αφού η μέση τιμή του πλάτους είναι ένας δείκτης αυτής.

Αναφορικά με την επίδραση της πρόωσης και όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το πρώτο διάγραμμα, υπάρχει αξιόλογη μείωση του μέγιστου πλάτους της απόληξης με την αύξηση της πρόωσης από τα 0.1mm/rev έως τα 0.2mm/rev, ενώ η διαφορά αυτή μικραίνει όταν εξετάζονται όχι τα μέγιστα αλλά οι μέσες τιμές του πλάτους. Αυτό υποδεικνύει ότι παρ' όλο που η αύξηση της πρόωσης μειώνει σε μικρό σχετικά βαθμό τη συνολική "ποσότητα" της απόληξης στην περιφέρεια της οπής, επιδρά πολύ πιο δραστικά στη μεγαλύτερη ομοιομορφία της απόληξης. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό γιατί όσο πιο ανομοιομορφή είναι η απόληξη τόσο πιο επικίνδυνη είναι για την ασφάλεια των εργαζομένων αλλά και τη λειτουργία των εκάστοτε εξαρτημάτων. Επίσης, από το πρώτο διάγραμμα προκύπτει ότι σε μεσαίες προώσεις η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μειώνει το μέγιστο πλάτος ενώ στη μεγάλη πρόωση το μέγιστο πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό παρά τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής. Ένα επιπλέον συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι σε χαμηλές προώσεις η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνει το μέσο πλάτος, άρα και την ποσότητα της απόληξης πάνω στην περιφέρεια της οπής.

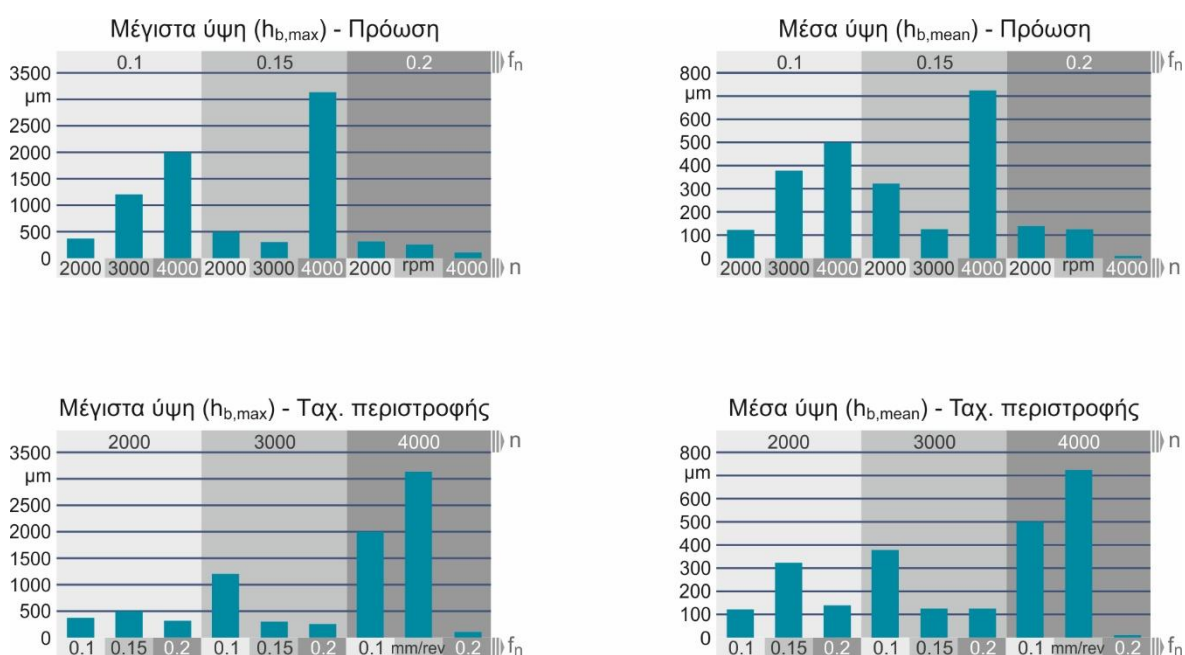


Σχήμα 5.11: Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης και περιστροφής στο μέγιστο και μέσο πλάτος  $w_b$  απόληξης κάθε οπής

Σε σχέση με την επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στο μέγιστο πλάτος της απόληξης, όπως παρουσιάζεται στο τρίτο διάγραμμα, φαίνεται μια γενική τάση για μείωση του μέγιστου πλάτους με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ενώ το ίδιο δεν ισχύει για την περίπτωση των μέσων τιμών όπου η επίδραση αυτής της αύξησης δεν είναι εμφανής. Παρ' όλα αυτά, το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο όσο στην περίπτωση επίδρασης της πρόωσης όπως αναφέρθηκε παραπάνω οπότε και δε μπορεί να διατυπωθεί ασφαλώς το αντίστοιχο συμπέρασμα για τη βελτίωση της ομοιομορφίας της απόληξης.

Στο σχήμα 5.12 αποτυπώνεται η επίδραση των ίδιων παραμέτρων (πρόωση, ταχύτητα περιστροφής) στα μέγιστα και τις μέσες τιμές των υψών της απόληξης σε κάθε οπή. Εύκολα συμπεραίνεται από τα διαγράμματα ότι αντίθετα με τα πλάτη της απόληξης, τα μέγιστα ύψη “ακολουθούν” τις μέσες τιμές ως προς την επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής σε αυτά.

Αναφορικά την επίδραση της πρόωσης, φαίνεται ότι η αύξηση της πρόωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέγιστου και μέσου ύψους της απόληξης στην περιφέρεια της οπής με εξαίρεση την περίπτωση  $f_n=0.15\text{mm/rev}$  και  $n=4000\text{rpm}$  όπου το ύψος της απόληξης εκτοξεύεται σε υψηλές τιμές. Επίσης το ύψος φαίνεται ότι αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής σε χαμηλές προώσεις, ενώ παραμένει σχετικά σταθερό με μικρή τάση για μείωση στα πειράματα με υψηλότερη πρόωση.



Σχήμα 5.12: Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης και περιστροφής στο μέγιστο και μέσο ύψος  $h_b$  απόληξης κάθε οπής

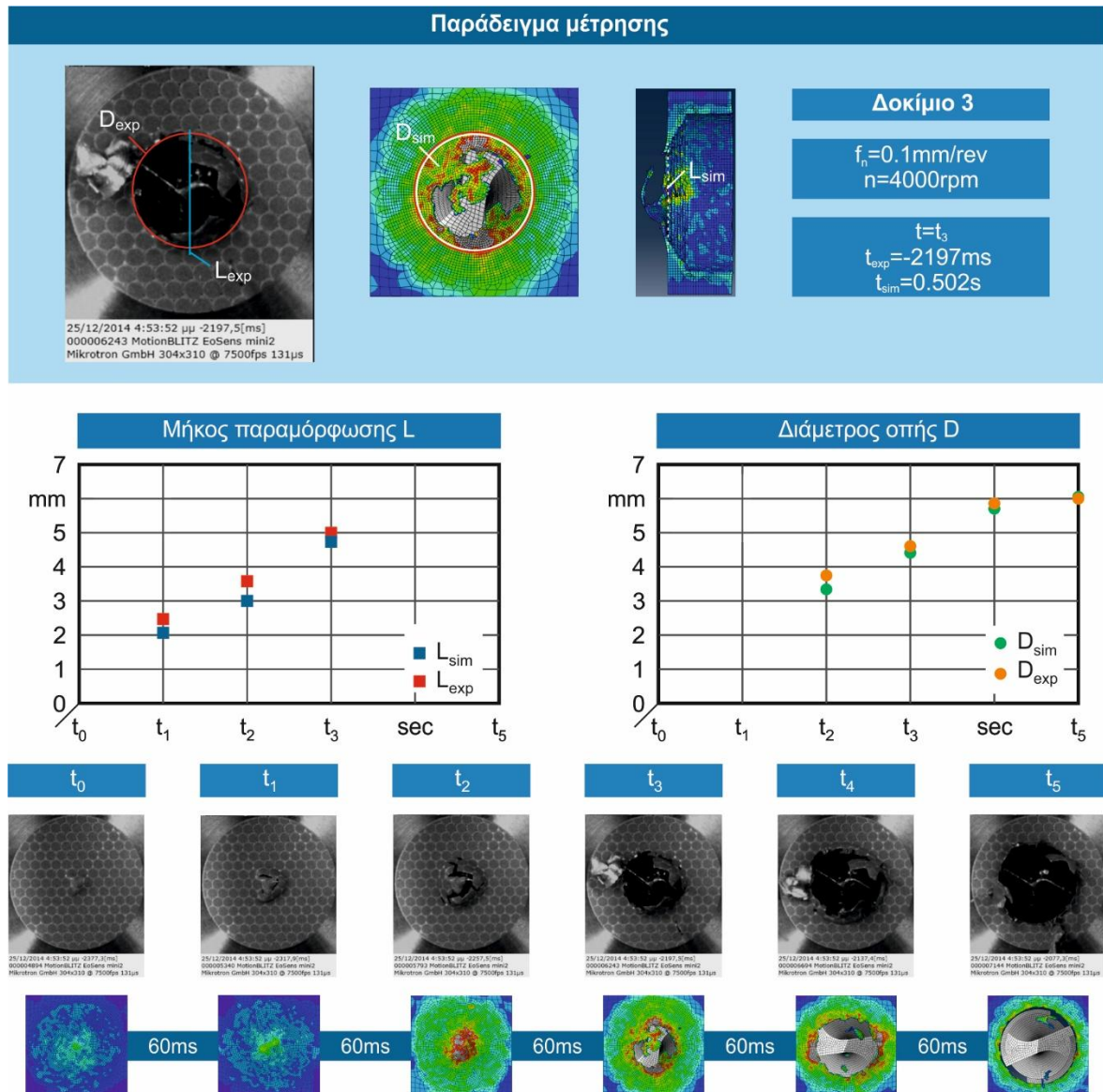
Σχετικά με την επίδραση της ταχύτητας περιστροφής, παρατηρείται, σε αντίθεση με το πλάτος, μία τάση προς αύξηση του μέγιστου ύψους της απόληξης με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής από τις 2000 έως τις 4000rpm. Την τάση αυτή ακολουθούν και οι μέσες τιμές του ύψους.



### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου προσομοίωσης με πειραματικά

#### 5.3.1 Εξέλιξη φαινομένου παραμόρφωσης: Σύγκριση προσομοίωσης με βίντεο καταγραφής της κατεργασίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα πειράματα διάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν με σκοπό την επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας, καταγράφηκαν με βίντεο υψηλής ταχύτητας. Αυτό επέτρεψε τον εντοπισμό και την εποπτεία της διαδικασίας παραμόρφωσης του υλικού στην επιφάνεια εξόδου και την επιβεβαίωση, μέσω αυτής, του μοντέλου. Στο σχήμα 5.13 φαίνεται ένα παράδειγμα μέτρησης δύο μεγεθών παραμόρφωσης, του μήκους παραμόρφωσης  $L_{sim}$ ,  $L_{exp}$  και της διαμέτρου σχηματισμού της οπής  $D_{sim}$ ,  $D_{exp}$ , όπως αυτά ορίζονται στο σχήμα.



Σχήμα 5.13: Συγκριτικές μετρήσεις υπολογισμένων και μετρημένων μεγεθών παραμόρφωσης L, D.

Σε όλες τις εννέα συγκριτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, ορίστηκε ένας αρχικός χρόνος  $t_0$  κατά τον οποίο ξεκινά η διαδικασία παραμόρφωσης του υλικού. Οι συγκριτικές μετρήσεις έγιναν για κάθε δοκίμιο ξεκινώντας από το χρόνο  $t_0$  έως το χρόνο  $t_5$  έτσι ώστε ο τελευταίος να συμπίπτει με τον τελικό σχηματισμό της οπής διαμέτρου  $\varnothing 6\text{mm}$ . Το διάστημα

$t_0 \rightarrow t_5$  χωρίστηκε σε πέντε ίσα υποδιαστήματα. Οι χρόνοι  $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  προσδιορίστηκαν για κάθε δοκίμιο ανάλογα με την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου διάτρησης ώστε, σε κάθε περίπτωση στους αντίστοιχους χρόνους το εργαλείο να έχει βυθιστεί κατά ίσα βάθη σε όλα τα δοκίμια.

Στα παραπάνω χρονικά σημεία μετρήθηκαν, τόσο στο βίντεο της κατεργασίας με γραφικό τρόπο, όσο και στο μοντέλο προσομοίωσης με συνδυασμό υπολογιστικού και γραφικού τρόπου:

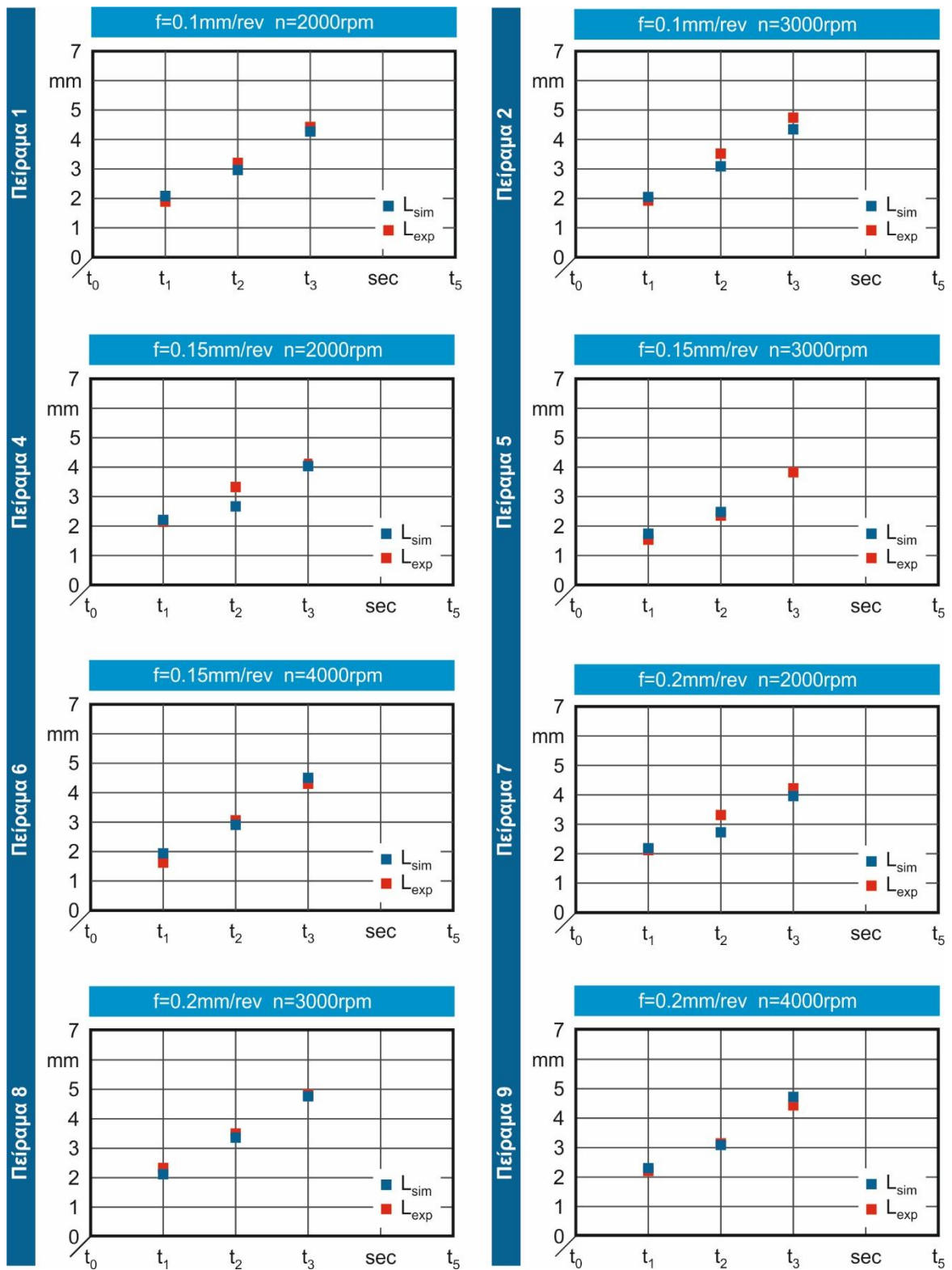
- τα μήκη παραμόρφωσης  $L$ , δηλαδή η κάθετη απόσταση των σημείων που οριακά έχουν αποκλίνει από την επιφάνεια εξόδου του δοκιμίου ως αποτέλεσμα της πλαστικής παραμόρφωσης και
- οι διαδοχικές διαμέτροι της οπής  $D$ , από τη στιγμή της πρώτης διάρρηξης του υλικού μέχρι τον τελικό σχηματισμό της οπής.

Προφανώς η μέτρηση των μηκών παραμόρφωσης είχε νόημα μόνο για τα χρονικά σημεία στα οποία δεν έχουμε καθαρό σχηματισμό οπής, καθότι μετά τη διάρρηξη του υλικού και κατά τον τελικό σχηματισμό, ο μηχανισμός παραμόρφωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την απουσία υλικού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μετρηθούν τα μήκη  $L$  στα πρώτα χρονικά σημεία και οι διαμέτροι  $D$  στα τελευταία.

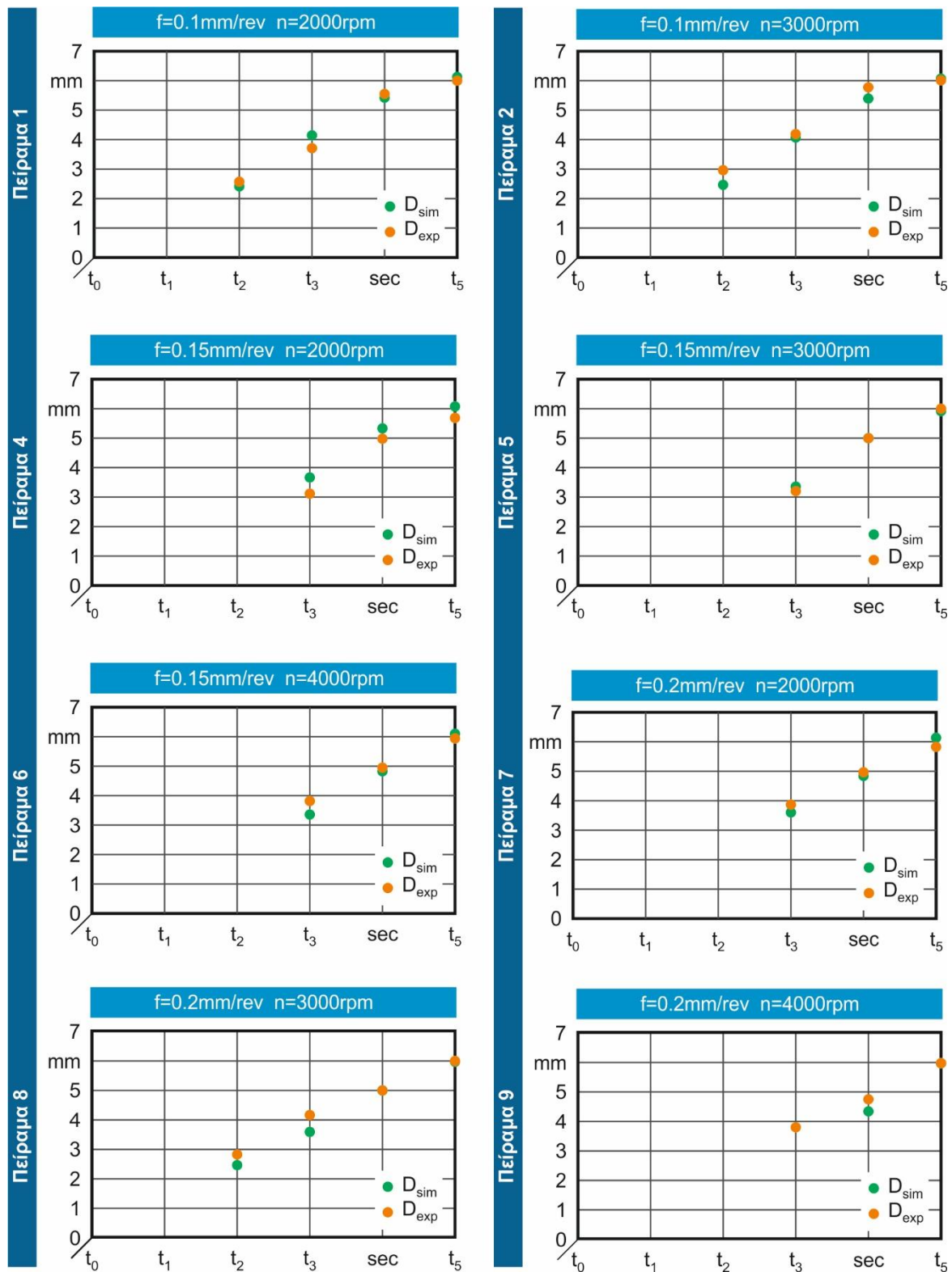
Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται επίσης ένα διάγραμμα σύγκρισης των πειραματικών με τις υπολογισμένες τιμές του μήκους παραμόρφωσης και της διαμέτρου της οπής για το παράδειγμα του δοκιμίου 3 με παραμέτρους κοπής  $f_n=0.1\text{ mm/rev}$  και  $n=4000\text{ rpm}$ . Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι μετρημένες από το βίντεο τιμές προσεγγίζονται με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια από το μοντέλο προσομοίωσης, τόσο σε σχέση με τα μήκη  $L$ , όσο και με τις διαμέτρους  $D$ . Η παραπάνω ταύτιση είναι ορατή και ποιοτικά με παρατήρηση και σύγκριση των διαδοχικών στιγμιotypών του βίντεο και του μοντέλου προσομοίωσης, όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα για όλα τα χρονικά σημεία  $t_0 \rightarrow t_5$ .

Στα σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών με τις υπολογισμένες τιμές των μεγεθών  $L$  και  $D$  για όλα τα πειράματα διάτρησης που πραγματοποιήθηκαν και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν υπολογιστικά. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα διαγράμματα, σε όλες τις περιπτώσεις πλην ελάχιστων εξαιρέσεων, οι πειραματικές τιμές του μήκους παραμόρφωσης και της διαμέτρου της οπής προσεγγίζονται σε μεγάλο βαθμό και σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται με τις, υπολογισμένες από το μοντέλο, τιμές.





Σχήμα 5.14: Διαγράμματα σύγκρισης υπολογισμένου και μετρημένου μήκους παραμόρφωσης για τα εννέα διαφορετικά πειράματα

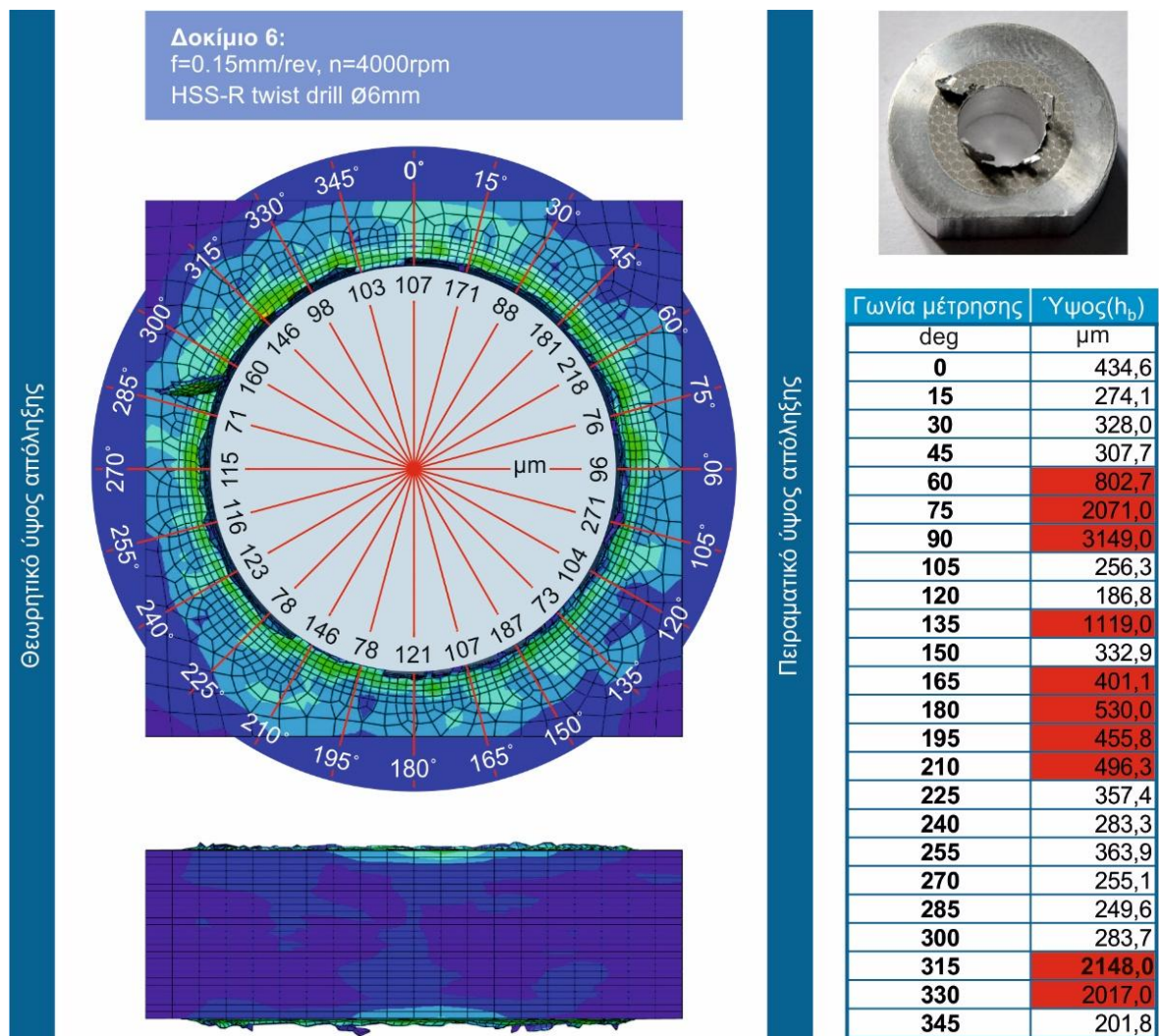


Σχήμα 5.15: Διαγράμματα σύγκρισης υπολογισμένου και μετρημένου μήκους παραμόρφωσης για τα εννέα διαφορετικά πειράματα

### 5.3.2 Σύγκριση μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης

Το μοντέλο προσομοίωσης, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, δημιουργήθηκε αφενός με σκοπό την προσομοίωση της κατεργασίας διάτρησης με μεταβαλλόμενες συνθήκες και αφετέρου για την προσέγγιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης. Αναφορικά με την προσέγγιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης, παρά το γεγονός ότι κατά την προσομοίωση της κατεργασίας σχηματίστηκαν επιτυχώς απολήξεις, τόσο εισόδου αλλά και εξόδου, δεν κατέστη δυνατό να προσεγγιστούν με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δεδομένου ότι οι τιμές του ύψους της απόληξης οι οποίες προέκυψαν από τη μέτρηση των δοκιμίων διάτρησης, εμφανίζονται μεγαλύτερες από τις θεωρητικές. Παρατηρήθηκε επίσης η απουσία σχηματισμού απολήξεων τύπου Crown και ο σχηματισμός αποκλειστικά μικρών και μεγαλύτερων ομοιόμορφων απολήξεων, τα ύψη των οποίων κυμαίνονται από 0 έως 300  $\mu\text{m}$ .

Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα το οποίο ενσωματώνει το μοντέλο διάτρησης όπως διαμορφώθηκε μετά το πέρας της προσομοίωσης, στην περιφέρεια του οποίου σημειώνονται τα ύψη της απόληξης που σχηματίστηκε σε 24 θέσεις, ανά 15° κατ' αντιστοιχία των πειραματικών μετρήσεων. Το διάγραμμα του σχήματος αναφέρεται στο δοκίμιο 6 με συνθήκες κοπής  $f_n = 0.15 \text{ mm/rev}$  και  $n = 4000 \text{ rpm}$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα ύψη των υπολογισμένων απολήξεων κυμαίνονται από 70 έως 270  $\mu\text{m}$ . Στον πίνακα του σχήματος παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές του ύψους  $h_b$  όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις. Εξαιρώντας τις τιμές του ύψους σε θέσεις όπου έχει σχηματιστεί απόληξη τύπου Crown (σημειώνονται με κόκκινο φόντο) και αντιπαραβάλλοντας τις υπόλοιπες τιμές με τις αντίστοιχες θεωρητικές, παρατηρείται σύγκλιση στην τάξη μεγέθους. Το εύρος των μετρημένων πειραματικών τιμών του ύψους στις θέσεις με ομοιόμορφη απόληξη κυμαίνεται από 180 έως 434  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 5.16: Υπολογισμένες και μετρημένες τιμές ύψους απόληξης διάτρησης δοκιμίου 6

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

**Πειραματικά αποτελέσματα:** Επιτεύχθηκε η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για την επίδραση των παραμέτρων της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής στο σχηματισμό της απόληξης διάτρησης, παρόλο που το εύρος τιμών το οποίο εξετάστηκε ήταν σχετικά περιορισμένο.

Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα που προέκυψαν αναφορικά με το πλάτος της απόληξης είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

- Παρατηρήθηκε αξιόλογη μείωση του μέγιστου πλάτους της απόληξης με αύξηση της πρόωσης.
- Παρατηρήθηκε μικρότερη μείωση στις μέσες τιμές του πλάτους της απόληξης με αύξηση της πρόωσης.
- Η αύξηση της πρόωσης επιδρά δραστικά στη μεγαλύτερη ομοιομορφία της απόληξης.
- Σε μεσαίες προώσεις η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μειώνει το μέγιστο πλάτος, ενώ σε μεγαλύτερες προώσεις το μέγιστο πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής.
- Σε χαμηλές προώσεις η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνει το μέσο πλάτος, άρα και την ποσότητα της απόληξης πάνω στην περιφέρεια της οπής.

Ακολούθως, τα αντίστοιχα συμπεράσματα που αφορούν το ύψος της απόληξης:

- Οι μέγιστες τιμές του ύψους “ακολουθούν” τις μέσες τιμές ως προς την επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής σε αυτά.
- Η αύξηση της πρόωσης γενικά επιφέρει τη μείωση του μέγιστου και μέσου ύψους της απόληξης.
- Το ύψος αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής σε χαμηλές προώσεις, ενώ παραμένει σχετικά σταθερό με μικρή τάση για μείωση σε υψηλότερες προώσεις.

**Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου προσομοίωσης με πειραματικά:** Το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τη διαδικασία παραμόρφωσης του υλικού στην επιφάνεια εξόδου του δοκιμίου. Τα στάδια της διαδικασίας παραμόρφωσης αλλά και τα μεγέθη παραμόρφωσης όπως αυτά υπολογίζονται από το μοντέλο προσεγγίζουν ή και ταυτίζονται με αυτά που έχουν προκύψει πειραματικά και έχουν καταγραφεί με την κάμερα υψηλής ταχύτητας.

Η ακρίβεια του μοντέλου και η ταύτιση των αποτελεσμάτων του με τα πειραματικά μειώνεται όταν εξετάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προκύπτουσας απόληξης διάτρησης. Ενώ στο μοντέλο εμφανίζονται επιτυχώς απολήξεις οι οποίες μάλιστα μεταβάλλονται ανάλογα με τις παραμέτρους κοπής, παρατηρείται αδυναμία του μοντέλου στο σχηματισμό μη ομοιόμορφων απολήξεων τύπου Crown αλλά και απόκλιση των τιμών του ύψους ομοιόμορφης απόληξης, παρ' όλο που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.



## 6.2 Προοπτικές

Οι προοπτικές εξέλιξης της παρούσας εργασίας αφορούν και τα τρία βασικά μέρη της, δηλαδή:

- το μοντέλο προσομοίωσης,
- την πειραματική διαδικασία και
- τη μετρητική διαδικασία.

Σε σχέση με το μοντέλο προσομοίωσης, σκόπιμη θα ήταν η περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωσή του με στόχο την πιο ακριβή προσέγγιση του σχηματισμού της απόληξης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της και φυσικά η επιβεβαίωσή του από μία σειρά πειραμάτων. Χρήσιμη είναι ωστόσο και η εκτέλεση περισσότερων πειραμάτων για την εξέταση της επίδρασης μεγαλύτερου εύρους τιμών των παραμέτρων κοπής. Παράλληλα, θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλες παράμετροι, όπως η γεωμετρία του εργαλείου.

Τέλος, η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης, δηλαδή του ύψους και του πλάτους της περιορίστηκε στα πλαίσια και τις δυνατότητες των διαθέσιμων μετρητικών οργάνων. Με τα συγκεκριμένα όργανα και μεθόδους μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, ένα σημαντικό κομμάτι της γεωμετρίας της απόληξης αγνοήθηκε αφού δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί. Για το λόγο αυτό σε κάποια μελλοντική συνέχιση της συγκεκριμένης μελέτης, θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος μέτρησης της απόληξης η οποία θα επιτρέπει τον προσδιορισμό ολόκληρης της τριδιάστατης γεωμετρίας της, μέσω π.χ. της τριδιάστατης σάρωσης του δοκιμίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L.K. Gillespie, P.T. Blotter, 1976, The Formation and Properties of Machining Burrs, Trans. ASME, J. Engineering for Industry, 98/1:66-74
- [2] F. Schäfer, 1978, Gratbildung und Entgraten beim Umfangsstirnfräsen. VDI-Zeitung 120, 1/2: 47-55
- [3] J.S. Kim, S. Min, D.A. Dornfeld, Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 41, Issue 7, May 2001, Pages 923–936
- [4] Y.B. Guo, D.A. Dornfeld, Finite Element Modeling of Burr Formation Process in Drilling 304 Stainless Steel, J. Manuf. Sci. Eng. 122(4), 612-619, 2000
- [5] V. Franke, L. Leitz, J. Aurich (2009) Burr Measurement: A Round Robin Test Comparing Different Methods. Proceedings of the CIRP sponsored International Conference on Burrs: Analysis, Control & Removal, Kaiserslautern, Germany, 167–178
- [6] D.A. Dornfeld, J.S. Kim, H. Dechow, J. Hewson, L.J. Chen, Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 1, 1999, Pages 73–76
- [7] S.L. Ko, J.E. Chang, Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling, 2003, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 52/1: 45-48
- [8] E. Kilickap, Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, Volume 49, Issue 9-12, pp 911-923
- [9] S.L. Ko, J.E. Chang, G.E. Yang, Burr minimizing scheme in drilling, Journal of Materials Processing Technology Volume 140, Issues 1–3, 22 September 2003, Pages 237–242
- [10] D. Biermann, H. Hartmann, Reduction of Burr Formation in Drilling Using Cryogenic Process Cooling, Procedia CIRP, Volume 3, 2012, Pages 85–90, 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012
- [11] L. Pilný, L.D. Chiffre, M. Píška, M. F. Villumsen, Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Volume 5, Issue 2, 2012, Pages 102–107
- [12] P. Shanmugasundaram, R. Subramanian, Study of parametric optimization of burr formation in step drilling of eutectic Al–Si alloy–Gr composites, Journal of Materials Research and Technology, Volume 3, Issue 2, 2014, Pages 150–157
- [13] C. Reich-Weiser, D.A. Dornfeld, Drilling Burr Control Chart- Adding a Material Property Axis
- [14] K. Lee, B. Stirn, D.A. Dornfeld, Burr formation in Micro-Machining Aluminum 6061-T6, Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, 2002, pp 47–51
- [15] J. Stein, D.A. Dornfeld, Burr Formation in Drilling Miniature Holes, (1997), CIRP Annals 46:63–66
- [16] R. Neugerbauer, G. Schmidt, M. Dix, Size Effects in Drilling Burr Formation, Burrs - Analysis, Control and Removal, 2010, pp 117-127
- [17] J. Kim, D.A. Dornfeld, Development of an Analytical Model for Drilling Burr Formation in Ductile Materials, Journal of Engineering Materials and Technology 124(2), 192-198 (Mar 26, 2002)
- [18] U. Heisel, M. Luik, R. Eisseler, M. Schaal, Prediction of parameters for the burr dimensions in short-hole drilling, Annals of the CIRP, 54 (1) (2005), pp. 79–82
- [19] S.S. Chang, G.M. Bone, Burr Height Model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6, Precision Engineering, 2010, Vol.34, 369-375

- [20] T. Matsumura, J. Leopold, Cutting force model for analysis of burr formation in drilling process, International Conference on Burrs, 2009, Kaiserslautern
- [21] S. Segonds, J. Masounave, V. Songmene, C. Bès, A simple analytical model for burr type prediction in drilling of ductile materials, Journal of Materials Processing Technology, 2013, Vol. 213, 971-977
- [22] S.Min, D.A. Dornfeld, Influence of Exit Surface Angle on Drilling Burr Formation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, Vol.125 (637-644)
- [23] U. Heisel, M. Schaal, Burr Formation in intersecting Holes, Production Engineering, April 2008, Volume 2, Issue 1, pp 55-62
- [24] J. Choi, and S. Min, "Finite Element Modeling of Burr Formation in Drilling of a Multi-Layered Material", 2002-2003 LMA Reports , University of California, , pp. 36-41.
- [25] J. Choi, S. Min, D. Dornfeld, M. Alam, T. Tzong, "Modeling of Inter-Layer Gap Formation in Drilling of a Multi-Layered Material, "Proc. 6th CIRP Workshop on Modeling of Machining", McMaster University (2003)
- [26] S. Bi, J. Liang, Experimental studies and optimization of process parameters for burrs in dry drilling of stacked metal materials, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, April 2011, Volume 53, Issue 9-12, pp 867-876
- [27] Y.B. Guo, and D.A. Dornfeld, "Integration of CAD of Drill with Drilling Burr Formation," Trans. North American Manufacturing Research Institute, SME, 1998, Vol. 26, pp. 201-206.
- [28] E. Kilickap, M. Huseyinoglu, Selection of Optimum Drilling Parameters on Burr Height Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm in Drilling of AISI 304 Stainless Steel, Materials and Manufacturing Processes, Volume 25, Number 10, October 2010, pp. 1068-1076(9)
- [29] V. N. Gaitonde · S. R. Karnik, Minimizing burr size in drilling using artificial neural network (ANN)-particle swarm optimization (PSO) approach,
- [30] B. Peña,G. Aramendi, A. Rivero, Luis N. López, Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issue 14, November 2005, Pages 1614–1621
- [31] S. Min, D.A. Dornfeld, J.S. Kim and B. Shyu, 2001, "Finite Element Modeling of Burr Formation in Metal Cutting," Proc. 4th CIRP Int'l Workshop on Modeling of Machining Operations, Delft, August, pp. 97-104
- [32] Ko, S.L., Dornfeld, D.A., 1991, A Study on Burr Formation Mechanisms, Trans. AMSE, J. Engineering Materials and Technology, 113/1:75-87
- [33] I.W. Park, D.A. Dornfeld, 2000, A Study of Burr Formation Processes Using the Finite Elements Method. Part II. The Influences of Exit Angle, Rake Angle, and Backup Material on Burr Formation Processes. Journal of Engineering Materials and Technology 122(2):229–238.
- [34] S.L. Ko, J.K. Lee, 2001, Analysis of Burr Formation in Drilling with a New concept Drill, Journal of Materials Processing Technology, 113/1–3:392–398
- [35] R. Link, 1992, Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung, Dissertation RWTH Aachen.
- [36] A. Vijayaraghavan, D.A. Dornfeld, Challenges in modeling machining in multilayer materials, Proceedings of the 8th CIRP Workshop on Modeling of Machining Operations, 2005
- [37] Abaqus Analysis User's Manual
- [38] N. S. Brar, V. S. Joshi, and B. W. Harris, Constitutive Model Constants for Al7075-T651 and Al7075-T6, AIP Conference Proceedings, 2009
- [39] Eivind Semb, Behavior of Aluminum at Elevated Strain Rates and Temperatures, Master Thesis, NTNU, 2013
- [40] Aerospace Specification for Metals Inc.

- [41] Sanjeev N K, Vinayak Malik, H. Suresh Hebbar, Verification of Johnson-Cook material model constants of AA2024-T3 for use in finite element simulation of friction stir welding and its utilization in severe plastic deformation process modelling, International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03 Issue: 06, 2014
- [42] Seshadri R, Naveen I, Sharan Srinivasan, Viswasubrahmanyam M, VijaySekar K S, Pradeep Kumar M, Finite Element Simulation of the Orthogonal Machining Process with Al 2024 T351 Aerospace Alloy, Procedia Engineering 64 1454 – 1463, 2013

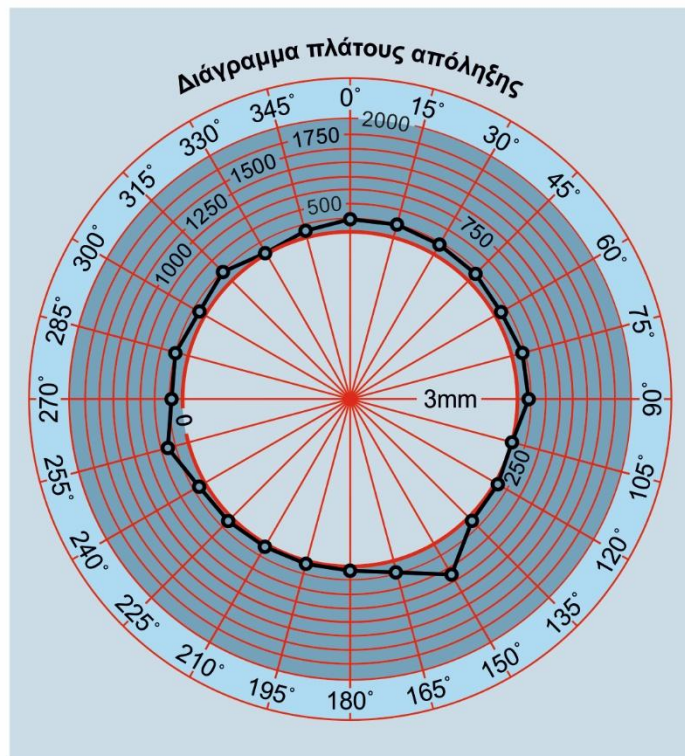






Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 1

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	149,7	239,4
15	117,5	262,2
30	116,3	211
45	145,5	201,5
60	154,7	131,3
75	128,2	210,5
90	98,6	204,9
105	0,0	0
120	62,2	60,2
135	65,3	81,8
150	304,0	640
165	156,1	216,7
180	103,1	80,4
195	84,1	58,8
210	42,8	40,6
225	91,6	90,8
240	138,0	123,6
255	346,9	382,1
270	111,5	202,5
285	172,1	244,6
300	139,0	142,7
315	134,3	230,3
330	52,2	45,2
345	131,1	144,4



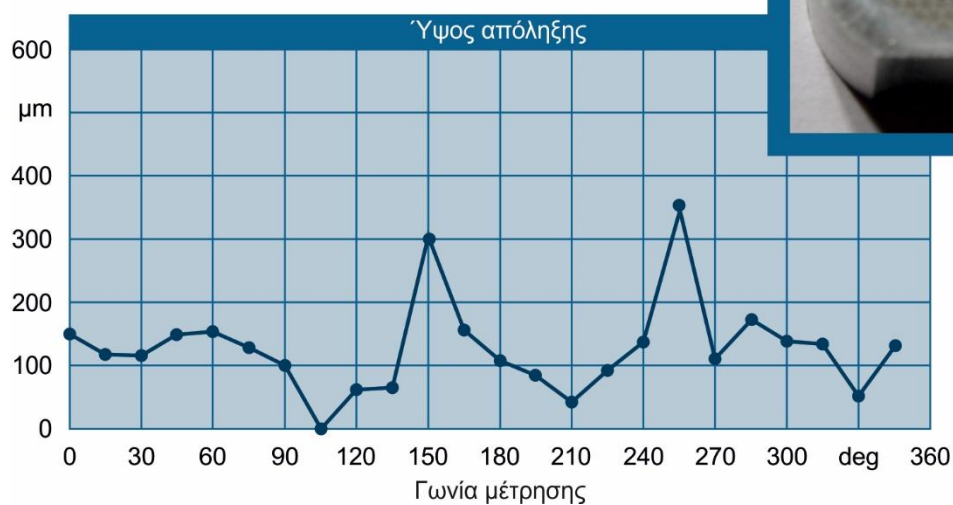
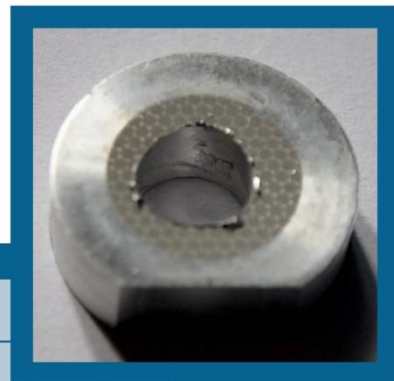
Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 1000\text{rpm}$   
 $f = 0,1\text{mm/rev}$

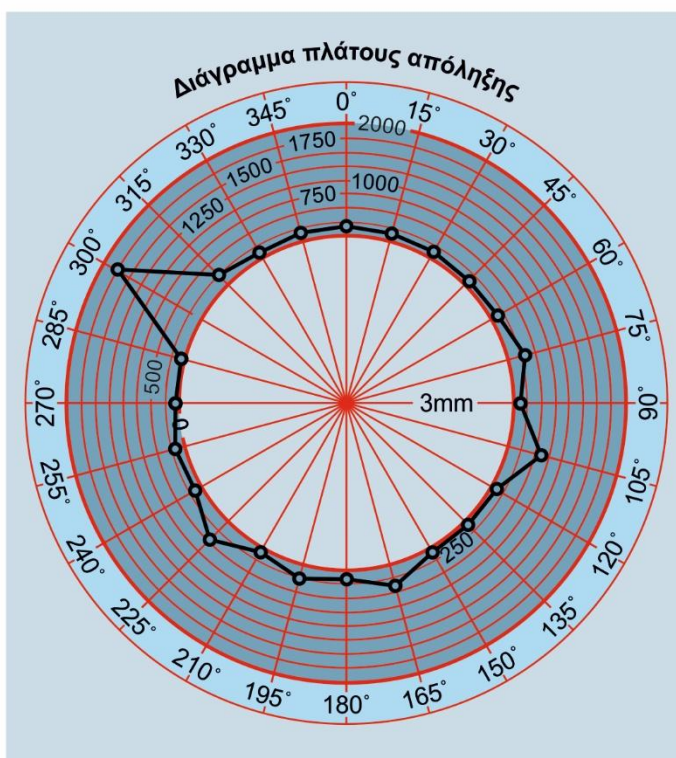
Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b,max} = 346,9\mu\text{m} - 255^\circ$

Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b,max} = 382,1\mu\text{m} - 255^\circ$



Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 2

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	60,6	119,5
15	187,6	106,2
30	336,0	91,0
45	150,1	66,1
60	407,2	111,4
75	305,7	281,6
90	399,0	70,2
105	674,0	579,0
120	182,2	72,1
135	98,9	76,0
150	500,1	67,2
165	919,0	375,0
180	458,6	136,1
195	433,3	258,5
210	392,5	83,9
225	1200,0	461,0
240	250,6	124,2
255	166,4	168,4
270	107,7	62,8
285	239,1	75,4
300	960,0	1741,0
315	339,6	213,4
330	217,4	100,5
345	334,4	130,1



Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

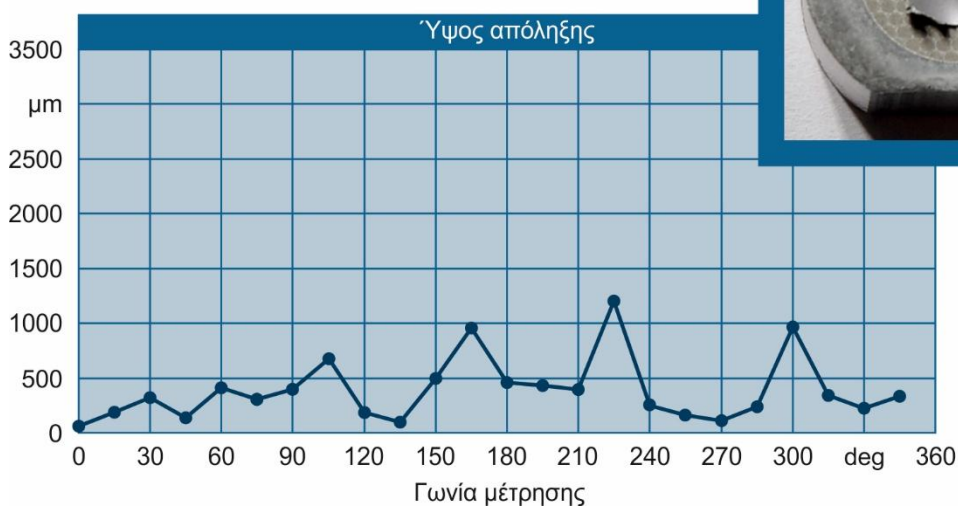
Συνθήκες:  
 $n = 3000\text{rpm}$   
 $f = 0,1\text{mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:

$h_{b,\text{max}} = 1200\mu\text{m} - 225^\circ$

Μέγιστο πλάτος:

$w_{b,\text{max}} = 1741\mu\text{m} - 300^\circ$

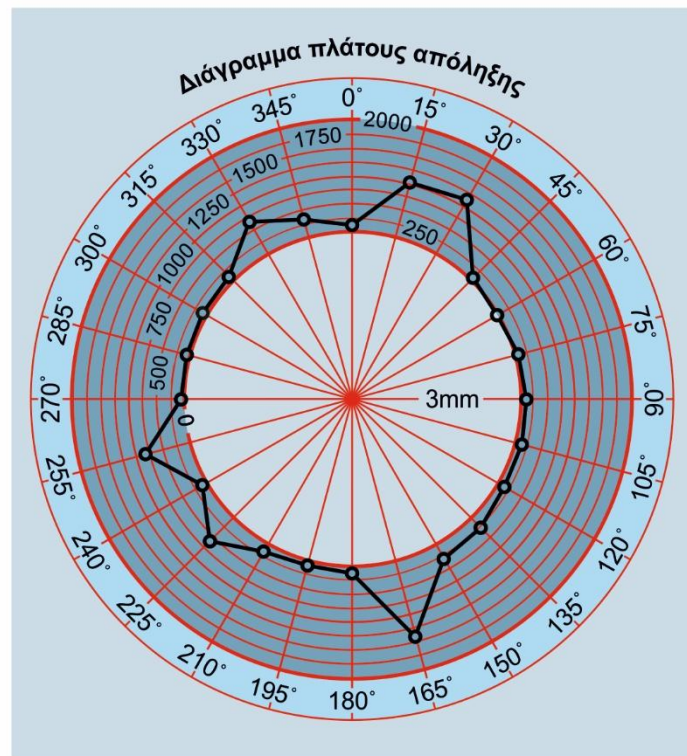






**Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 3**

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	425,9	112,4
15	2000,0	1009,0
30	1632,0	1121,0
45	135,0	64,0
60	0,0	0,0
75	183,2	82,9
90	373,1	114,7
105	528,6	131,4
120	586,4	139,4
135	809,2	245,0
150	296,7	296,3
165	1249,0	1395,0
180	178,3	109,5
195	189,7	77,8
210	200,2	151,2
225	540,0	584,0
240	136,7	81,7
255	1046,0	806,0
270	79,3	55,6
285	61,2	48,0
300	78,7	66,1
315	140,2	99,0
330	932,0	653,0
345	296,7	333,0



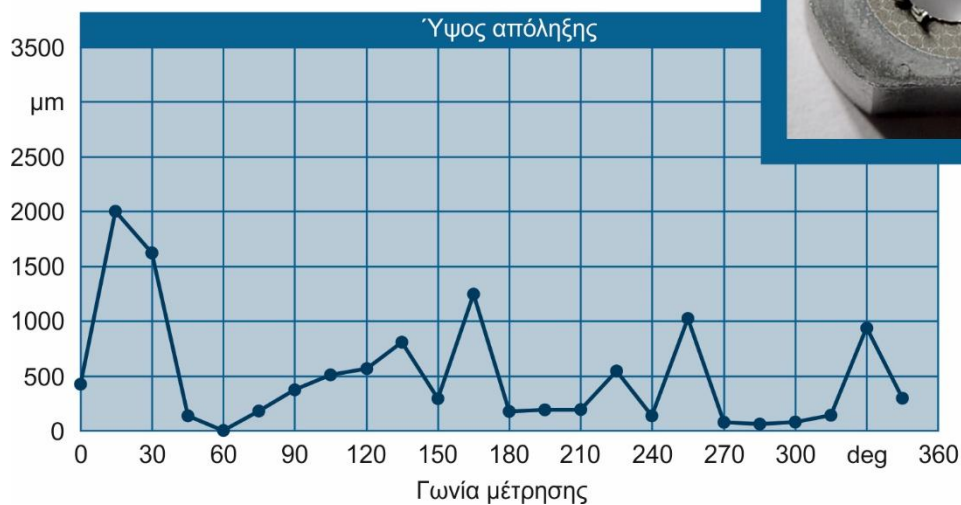
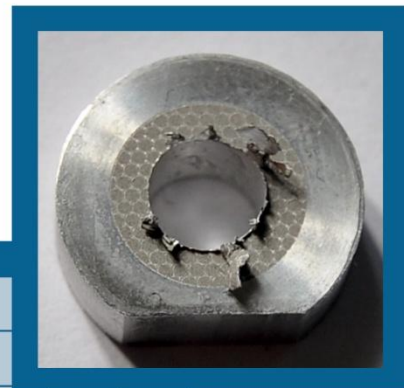
**Εργαλείο:**  
HSS-R Drill, Ø6mm

**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000\text{rpm}$   
 $f = 0,1\text{mm/rev}$

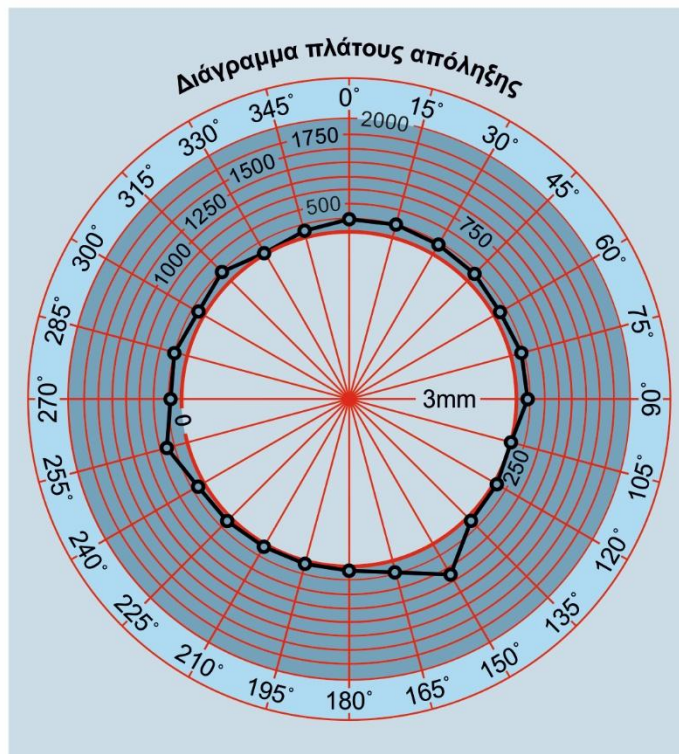
**Μέγιστο ύψος:**  
 $h_{b,max} = 2000\mu\text{m} - 15^\circ$

**Μέγιστο πλάτος:**  
 $w_{b,max} = 1395\mu\text{m} - 165^\circ$



Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 5

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	245,5	182,1
15	198,3	194,9
30	104,1	75,5
45	90,2	67,7
60	58,2	70,1
75	59,5	47,5
90	56,8	70,6
105	83,7	106,8
120	104,6	190,6
135	117,2	129,3
150	92,8	90,1
165	137,1	63,9
180	50,2	52,2
195	33,2	57,8
210	26,9	57,5
225	42,8	85,6
240	79,4	160,0
255	91,0	100,4
270	62,3	100,2
285	44,6	37,2
300	284,6	89,1
315	259,0	105,4
330	237,6	162,1
345	234,2	240,0



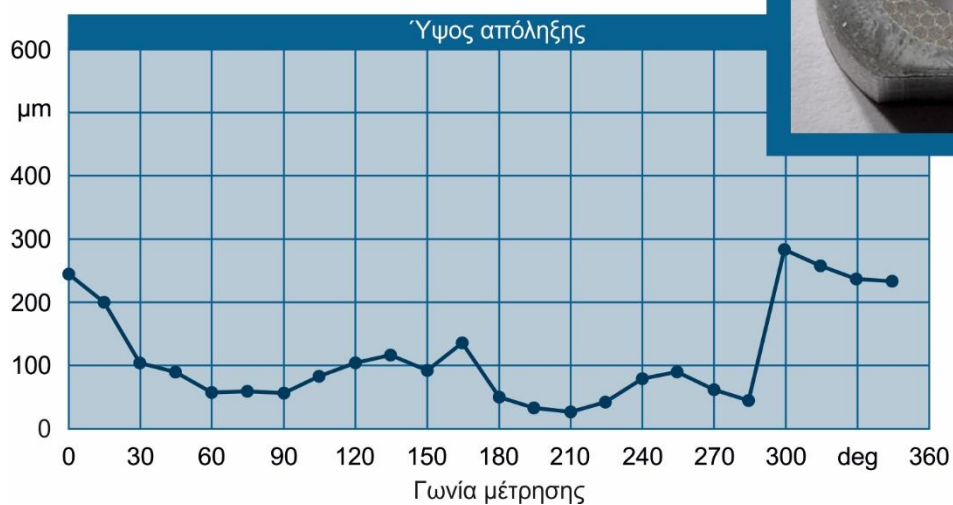
Εργαλείο:  
HSS-R Drill,  $\varnothing 6\text{mm}$

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 3000\text{rpm}$   
 $f = 0,15\text{mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b,\text{max}} = 284,6\mu\text{m} - 300^\circ$

Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b,\text{max}} = 240\mu\text{m} - 345^\circ$

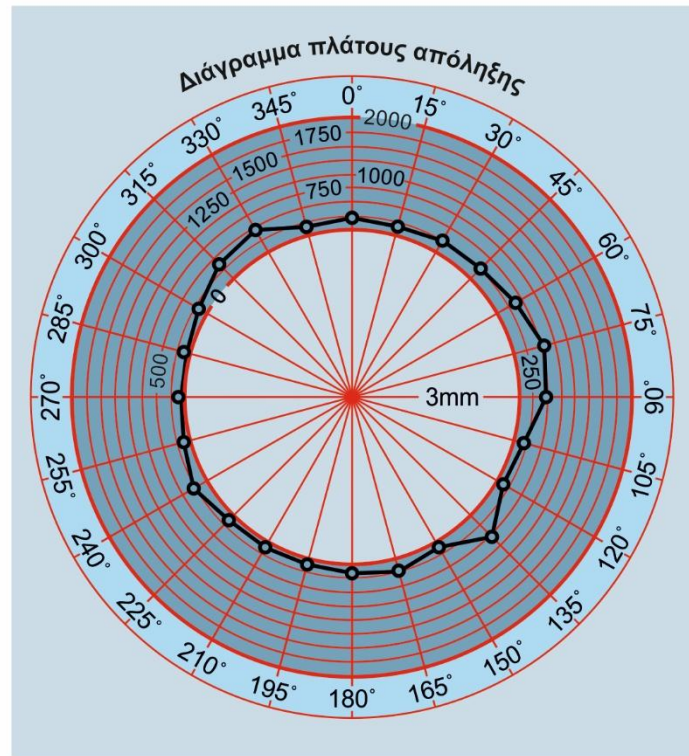






Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 6

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	434,6	199,6
15	274,1	147,9
30	328,0	226,6
45	307,7	242,8
60	802,7	356,1
75	2071,0	544,0
90	3149,0	440,0
105	256,3	167,4
120	186,8	95,3
135	1119,0	500,0
150	332,9	82,5
165	401,1	185,9
180	530,0	112,4
195	455,8	81,5
210	496,3	74,3
225	357,4	103,7
240	283,3	244,9
255	363,9	102,6
270	255,1	106,0
285	249,6	102,6
300	283,7	146,0
315	2148,0	388,0
330	2017,0	450,0
345	201,8	132,3



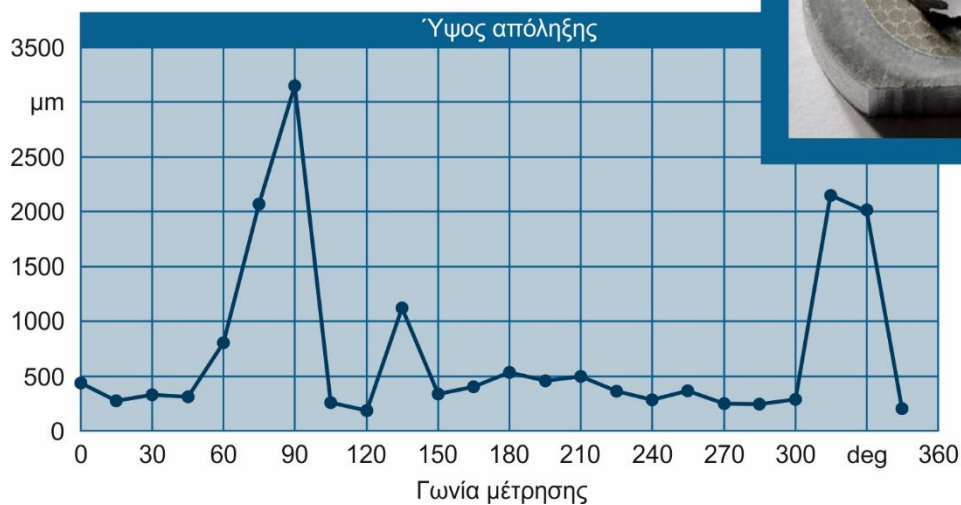
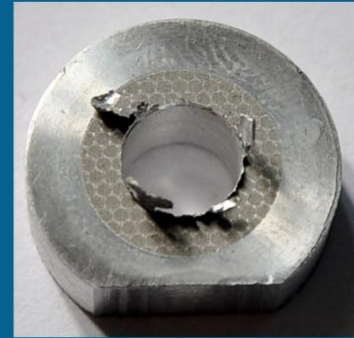
Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 4000\text{rpm}$   
 $f = 0,15\text{mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b\text{max}} = 2148\mu\text{m} - 315^\circ$

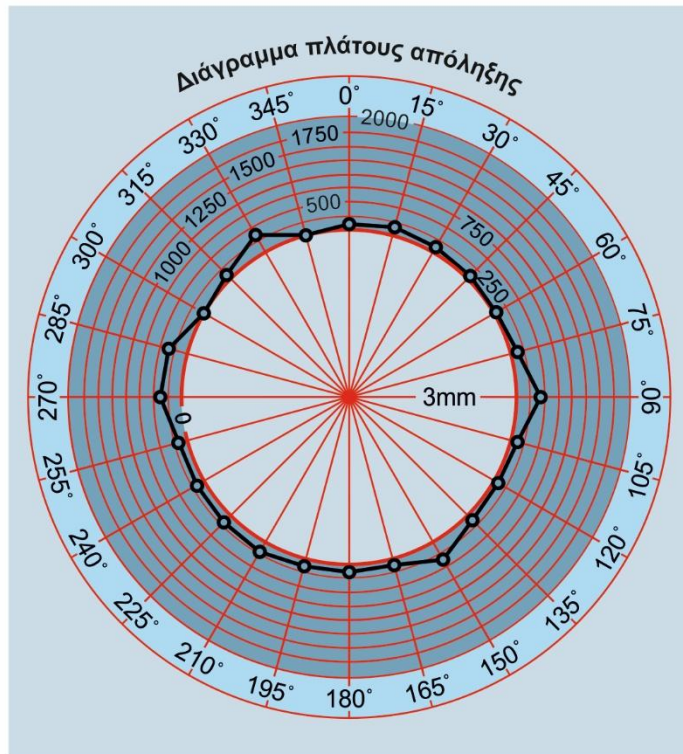
Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b\text{max}} = 588\mu\text{m} - 315^\circ$





Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 7

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu\text{m}$	
0	41,1	108,2
15	221,2	157,6
30	19,5	100,9
45	19,2	66,3
60	20,0	40,9
75	30,3	97,2
90	258,6	<b>405,8</b>
105	31,1	93,1
120	56,2	58,8
135	235,1	104,3
150	219,8	330,5
165	28,6	100,2
180	51,2	109,6
195	239,8	120,9
210	292,0	176,8
225	282,6	155,5
240	259,3	135,1
255	<b>307,4</b>	157,9
270	134,2	374,1
285	175,8	344,7
300	0,0	0,0
315	107,3	94,8
330	301,1	351,4
345	0,0	0,0



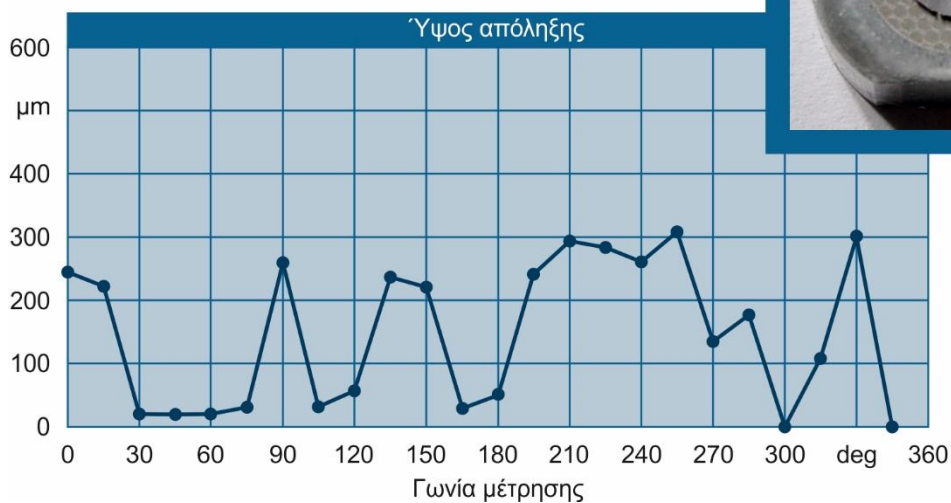
Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 2000\text{rpm}$   
 $f = 0,2\text{mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b\text{max}} = 307,4\mu\text{m} - 255^\circ$

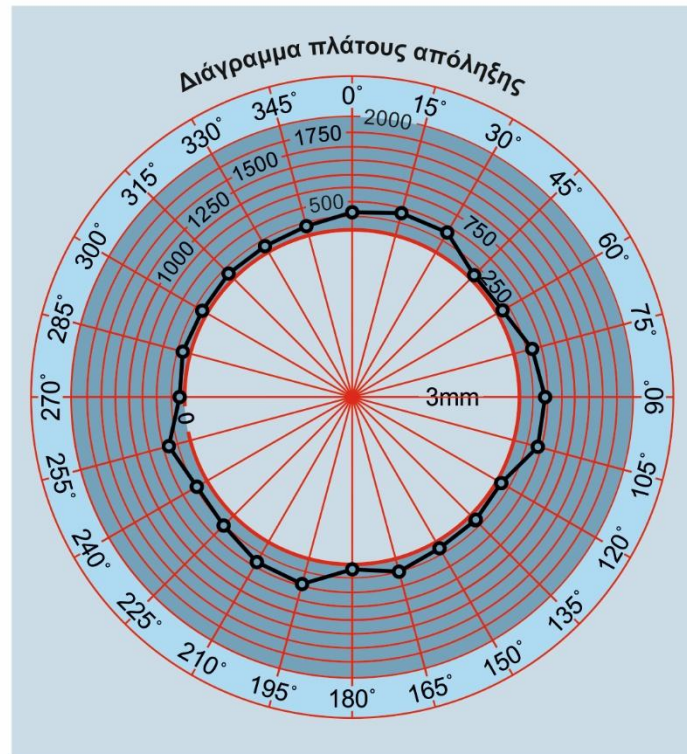
Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b\text{max}} = 405,8\mu\text{m} - 90^\circ$





Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 8

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu m$	
0	127,0	302,0
15	110,6	406,0
30	139,4	381,0
45	63,4	85,6
60	67,9	104,9
75	105,3	322,7
90	170,9	451,4
105	192,1	436,2
120	120,7	73,9
135	149,6	112,4
150	139,6	128,5
165	169,3	235,6
180	123,7	89,6
195	231,7	422,0
210	113,8	413,4
225	214,6	239,9
240	208,0	211,0
255	109,3	388,8
270	82,2	80,9
285	87,1	131,7
300	88,9	87,8
315	101,3	112,8
330	87,8	110,4
345	104,4	163,3



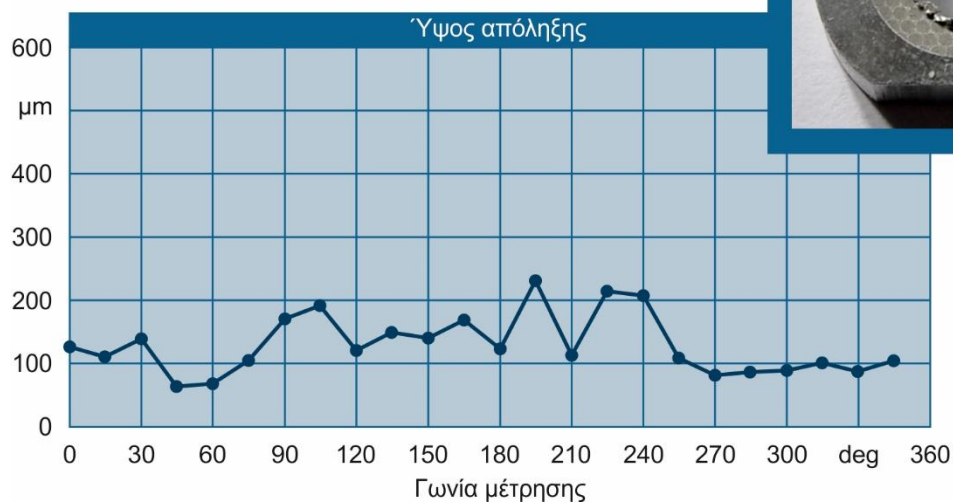
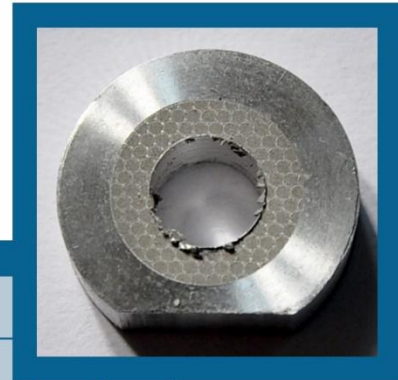
Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 3000 \text{ rpm}$   
 $f = 0,2 \text{ mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b, \max} = 231,7 \mu m - 195^\circ$

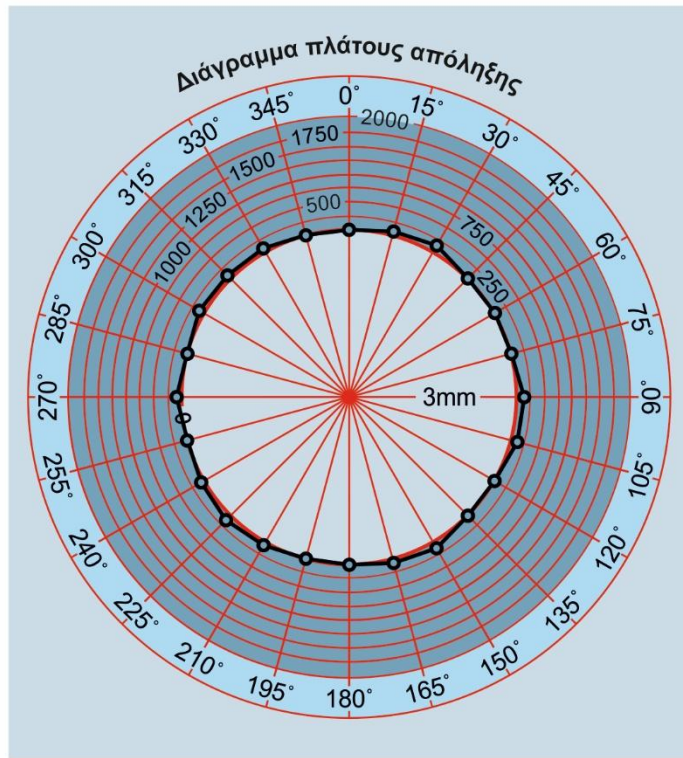
Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b, \max} = 451,4 \mu m - 90^\circ$





Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμίου 9

Γωνία μέτρησης	Ύψος( $h_b$ )	Πλάτος( $w_b$ )
deg	$\mu m$	
0	0,0	0,0
15	57,9	52,7
30	38,2	135,9
45	0,0	0,0
60	0,0	0,0
75	0,0	0,0
90	22,4	144,6
105	39,4	129,9
120	0,0	0,0
135	0,0	0,0
150	33,8	119,5
165	13,5	79,7
180	0,0	0,0
195	0,0	0,0
210	16,1	45,5
225	20,0	98,8
240	28,8	32,9
255	0,0	0,0
270	15,9	50,3
285	0,0	0,0
300	29,5	132,2
315	15,1	62,1
330	16,3	76,7
345	0,0	0,0



Εργαλείο:  
HSS-R Drill, Ø6mm

Υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες:  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0,2 \text{ mm/rev}$

Μέγιστο ύψος:  
 $h_{b, \max} = 57,9 \mu m - 15^\circ$

Μέγιστο πλάτος:  
 $w_{b, \max} = 144,6 \mu m - 90^\circ$

