

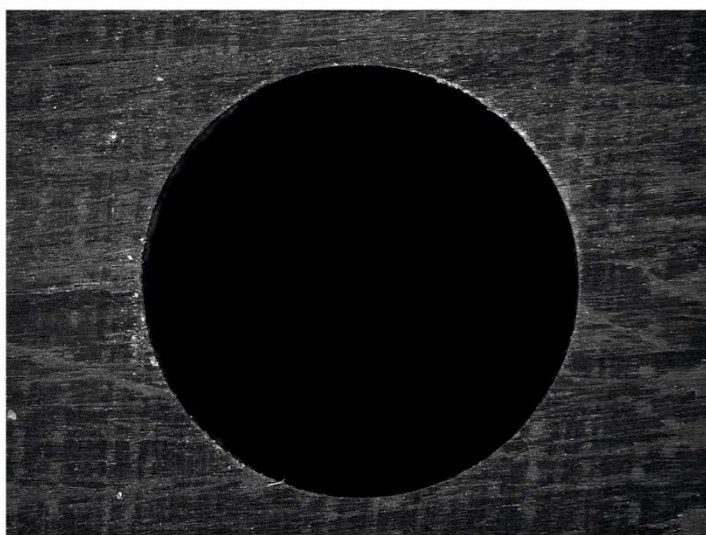


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ  
ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ  
ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ  
ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ  
ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ**



**ΦΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗΣ  
ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 129**

**ΧΑΝΙΑ 2025**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.1	Αντικείμενο εργασίας .....	4
1.2	Δομή εργασίας.....	4
2.	ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ .....	5
2.1	Ορισμός των σύνθετων υλικών και του ινοπλισμένου ανθρακονήματος (CFRP)	5
2.2	Η κατεργασία, η κινηματική και οι δυνάμεις της διάτρησης.....	7
2.2.1	Γεωμετρία τρυπανιού .....	8
2.2.2	Δύναμη ώθησης και ροπή κατά τη διάτρηση .....	8
2.2.3	Παράγοντες που μεταβάλλουν τη δύναμη ώθησης και τη ροπή .....	10
2.3	Η κατεργασία του ελικοειδούς φραιζαρίσματος .....	14
2.4	Μηχανισμός κοπής του ινοπλισμένου πολυμερούς ανθρακονήματος .....	16
2.5	Αποκόλληση κατά την κοπή ινοπλισμένου πολυμερούς ανθρακονήματος .....	21
2.6	Δημιουργία απόληξης (burr) κατά τη διάνοιξη οπής .....	26
2.6.1	Ορισμός και κατηγοριοποίηση απολήξεων .....	26
2.6.2	Μηχανισμός δημιουργίας απολήξεων σύνθετων υλικών .....	27
2.6.3	Παράγοντες ελαχιστοποίησης του σχηματισμού απόληξης .....	27
2.6.4	Μέθοδοι μέτρησης της απόληξης διάτρησης .....	28
2.6.5	Χαρακτηριστικά αξιολόγησης της απόληξης διάτρησης .....	30
2.7	Τραχύτητα εσωτερικής επιφάνειας και εσωτερικές κενώσεις (cavities) της οπής 33	
2.8	Προβλήματα λόγω θερμότητας .....	35
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	37
3.1	Πειραματικός εξοπλισμός .....	37
3.2	Σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας .....	40
3.2.1	Δοκίμια διάτρησης.....	40
3.2.2	Σχεδίαση βάσης συγκράτησης δοκιμίων .....	40
3.2.3	Κατασκευή της βάσης συγκράτησης δοκιμίων.....	42
3.2.4	Βάση συγκράτησης κάμερας υψηλής ταχύτητας .....	44
3.3	Προσδιορισμός συνθηκών πειραματικής διαδικασίας .....	46
3.4	Πειραματική διαδικασία.....	47
4.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	50
4.1	Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων και λογισμικά .....	50
4.2	Μετρητική διαδικασία .....	51
4.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	54
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	79
5.1.	Συμπεράσματα .....	79

5.2 Προοπτικές.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Αντικείμενο εργασίας**

Στην παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία μελετάται η κατεργασία της διάτρησης σε πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Carbon-fiber reinforced polymer). Συγκεκριμένα η εργασία εστιάζει στις ατέλειες που προκύπτουν γύρω από την περιοχή της διάτρησης στην επιφάνεια εισόδου και εξόδου του κοπτικού εργαλείου στο κατεργασμένο τεμάχιο. Οι διάφορες αστοχίες στην ευρύτερη περιοχή μπορούν να αποβούν καταστροφικές για το κατεργασμένο τεμάχιο. Σε περιπτώσεις προβλημάτων όπως απόληξη διάτρησης ενδέχεται η οπή να ξεφεύγει από τις επιτρεπτές ανοχές που έχουν οριστεί. Σε περίπτωση που υπάρχει αποκόλληση των στρώσεων λόγω των δυνάμεων κατά την κοπή είναι σημαντικό αυτή να εντοπιστεί διότι το τεμάχιο δεν έχει πλέον την ίδια αντοχή στα φορτία που πρόκειται να δεχθεί όταν χρησιμοποιηθεί.

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας δημιουργήθηκε μία βάση συγκράτησης των τεμαχίων ανθρακονήματος που θα ερευνηθούν, μία βάση συγκράτησης κάμερας υψηλής ταχύτητας για την καταγραφή της κατεργασίας με σκοπό την καλύτερη κατανόησή της και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν κατεργασίες διάτρησης με διαφορετικές συνθήκες κοπής. Έχοντας πληθώρα παραδειγμάτων, στόχος της εργασίας είναι ο προσδιορισμός των ιδανικών συνθηκών για την κατεργασία του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα ελαττώματα που προκύπτουν λόγω της διάτρησης. Οι τελικές οπές θα αξιολογηθούν με τη χρήση στερεοσκόπιου και ενός λογισμικού. Συγκεκριμένα θα συγκριθούν βάση του μεγέθους της επιφάνειας που έχει επηρεαστεί και της σημαντικότητας του ελαττώματος που βρέθηκε στην εκάστοτε είσοδο και έξοδο της κάθε οπής.

### **1.2 Δομή εργασίας**

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή στην εργασία και περιλαμβάνει τα βασικά σημεία ενδιαφέροντος και τη δομή της.

Το κεφάλαιο 2 αναφέρει μία βιβλιογραφική έρευνα για τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν σχετικά με το θέμα της εργασίας και προτείνει προτάσεις και λύσεις για το πείραμα που ακολουθεί.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και τη σχεδίαση των βάσεων συγκράτησης, την καταγραφή και την εκτέλεση του πειράματος.

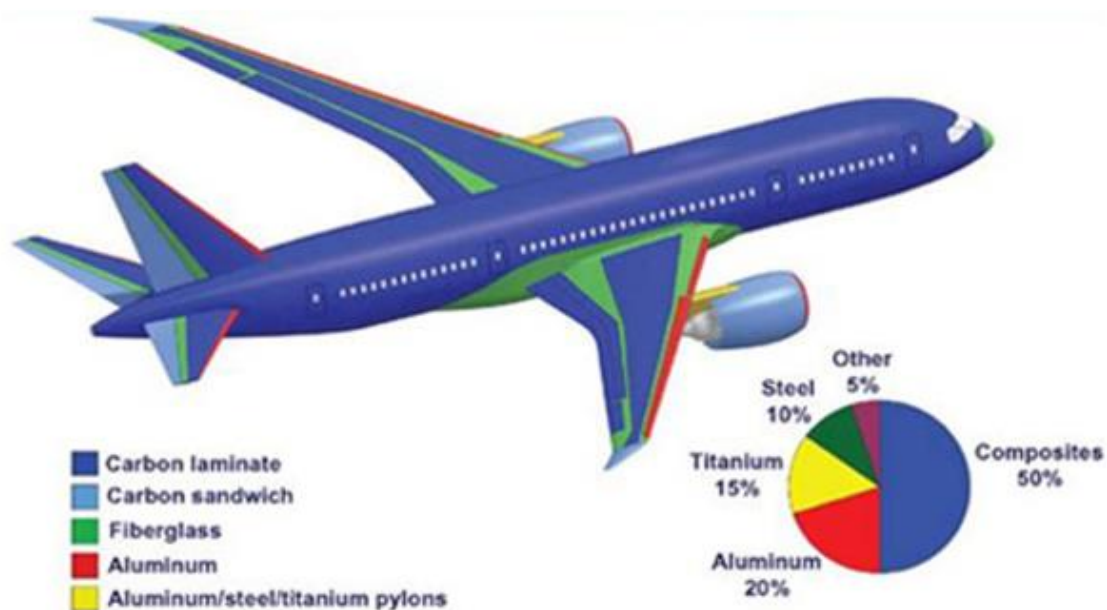
Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του πειράματος και προβάλλει το τρόπο που πραγματοποιείται η αξιολόγηση της εκάστοτε οπής.

Το κεφάλαιο 5 αναφέρει συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη και τα πειράματα.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

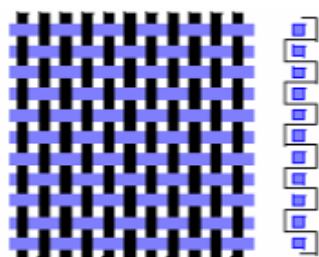
### 2.1 Ορισμός των σύνθετων υλικών και του ινοπλισμένου ανθρακονήματος (CFRP)

Ως σύνθετα υλικά ορίζονται υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά και ο συνδυασμός τους έχει ως αποτέλεσμα ένα τελικό υλικό με ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τα αρχικά του στοιχεία. Το ένα συστατικό είναι ένα σκληρό, άκαμπτο και ισχυρό υλικό που είναι η όπλιση του τελικού υλικού, και βρίσκεται ενσωματωμένο μέσα σε ένα πιο μαλακό υλικό που ονομάζεται μήτρα. Το πρώτο συστατικό είναι συνήθως ίνες αραμιδίου, γυαλιού ή άνθρακα, ενώ το δεύτερο είναι συχνά κάποια πολυμερής ρητίνη, είτε εποξική είτε πολυεστερική. Ενώ αυτά τα στοιχεία διατηρούν τα ατομικά τους χαρακτηριστικά, όταν συνδυάζονται για να σχηματίσουν το σύνθετο υλικό, επηρεάζουν θετικά τις τελικές ιδιότητες του υλικού δημιουργώντας ένα ισχυρότερο. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν επιλογές ιδιαίτερα ελκυστικές για εξαρτήματα στους τομείς της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, του αθλητικού εξοπλισμού και των ιατρικών συσκευών. Για παράδειγμα, η χρήση σύνθετων υλικών επεκτείνεται στη βιομηχανία πολιτικών αεροσκαφών, όπου περίπου το 50% του συνολικού βάρους του νέου Boeing 787 Dreamliner (σχήμα 2.1) αποτελείται από σύνθετα υλικά σε σύγκριση με το λιγότερο από 5% στο Boeing 757/767 που παραγόταν τη δεκαετία του 1980. Το αποτέλεσμα είναι το σύγχρονο αεροσκάφος να έχει χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου λόγω του μικρότερου βάρους του).

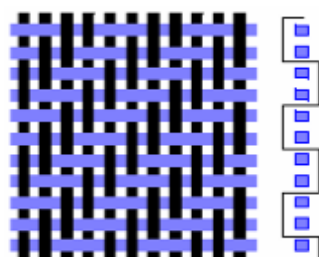


Σχήμα 2.1. Η χρήση σύνθετων υλικών στο σύγχρονο Boeing 787 Dreamliner

Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας συχνά αναφέρονται ως Fiber- Reinforced -Plastics (ινοπλισμένα πολυμερή) όταν ισχυρές/άκαμπτες ίνες ενσωματώνονται μέσα σε μια ελαστική/μαλακή πολυμερή μήτρα. Συνεχείς ίνες/νήματα που έχουν μονή κατεύθυνση (Uni Directional) ή μορφή υφαντών με κάποια πλέξη είναι τα κυρίαρχα υφάσματα στα FRP



(a) Plain weave

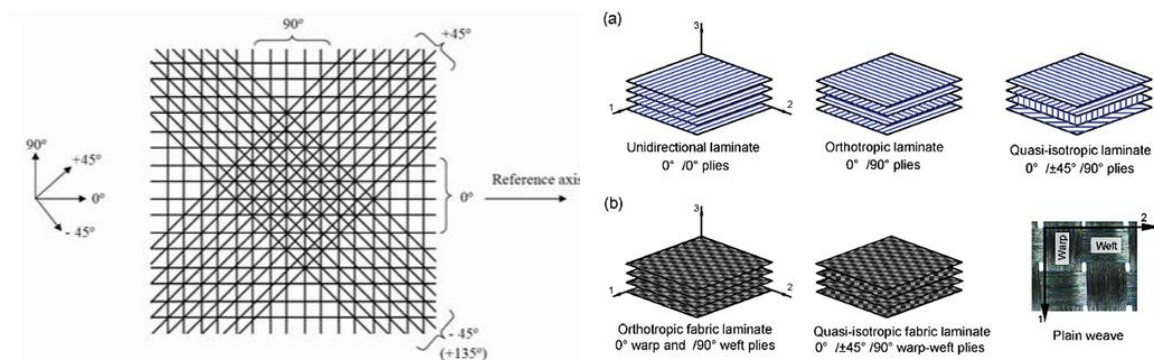


(b) 2 x 2 Twill weave

σύνθετα υλικά. Ως μονοδιάστατα ορίζονται τα υλικά που οι ίνες τους έχουν μία κατεύθυνση και ως υφαντά ορίζονται τα υλικά που έχουν κάθετα τέμνουσες ίνες (σχήμα 2.2). [1]

Σχήμα 2.2. Παραδείγματα υφάσματος με πλέξη.

Τα υφαντά υλικά περιλαμβάνουν διάφορες πλέξεις που δίνουν διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορές στο υλικό ανάλογα το είδος. Τόσο οι UD όσο και οι υφασμένες στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν για να παραχθούν πολυκατευθυντικά σύνθετα τεμάχια ώστε να έχουν ορθοτροπική ή σχεδόν ισοτροπική συμπεριφορά. Τα τελικά προϊόντα κατασκευάζονται συνήθως με την τοποθέτηση στρωμάτων υφασμάτων μονοδιάστατης ή υφαντής κατεύθυνσης σε διαφορετικές κατευθύνσεις ινών σύμφωνα με την προοριζόμενη εφαρμογή (σχήμα 2.3). Για ένα προϊόν N στρώσεων, κάθε στρώση έχει ένα διακριτό προσανατολισμό των ινών του που αριθμείται από την πάνω επιφάνεια. Το προϊόν κωδικοποιείται σύμφωνα με τις γωνίες του ινοπλισμού μέσα στις στρώσεις από έναν άξονα αναφοράς ( $0^\circ$ ), με τα σημεία (+) και (-) να αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση (από τον άξονα αναφοράς) μιας μεμονωμένης στρώσης στη στοίβα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. [2]

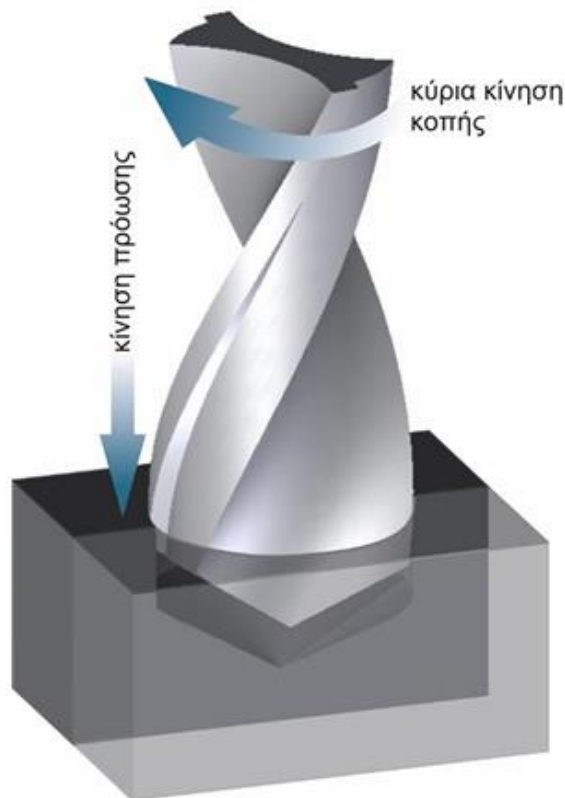


Σχήμα 2.3. Αριστερά η κατεύθυνση τεσσάρων UD στρώσεων και δεξιά (a) ύφασμα μονής κατεύθυνσης, (b) ύφασμα με πλέξη και τις ιδιότητές τους βάση την κατεύθυνση που τοποθετήθηκαν.

Στα σύνθετα υλικά FRP, η μήτρα χρησιμοποιείται για να στηρίζει και να συνδέει την ινοπλίσση, να μεταφέρει και να διανέμει τα εξωτερικά φορτία που δέχεται το τελικό προϊόν στις ίνες του υλικού, να ελέγχει τις χημικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού και να προλαμβάνει και να περιορίζει οποιαδήποτε διάδοση ρωγμών. Επιπλέον, επειδή η μήτρα συνήθως έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης από τις ίνες, καθορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας για το τελικό προϊόν. Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας το πολυμερές ινοπλισμένο με ανθρακόνημα θα αναφέρεται και ως CFRP.

## 2.2 Η κατεργασία, η κινηματική και οι δυνάμεις της διάτρησης

Ο όρος διάτρηση ως κατεργασία αναφέρεται στη διάνοιξη οπής σε κάποιο τεμάχιο με χρήση τρυπανιού για κοπτικό εργαλείο. Η διαδικασία διεκπεραιώνεται μέσω δύο βασικών κινήσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4. Κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονά του. Η δευτερεύουσα είναι η γραμμική μεταφορική κίνηση (πρόωση) που πραγματοποιεί η άτρακτος για να προσεγγίσει το τεμάχιο με μία δοσμένη ταχύτητα πρόωσης από τον χειριστή. Η κινηματική της διάτρησης περιγράφεται από δύο βασικά μεγέθη, την ταχύτητα κοπής  $V_c$  και την ταχύτητα πρόωσης  $V_f$ . [3]



Σχήμα 2.4. Κινηματική της διάτρησης

Ο τύπος της ταχύτητας κοπής είναι ο ακόλουθος:

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad [\text{mm/min}]$$

όπου:  $d$  είναι η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου σε mm,

και  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε rpm

ενώ ο τύπος που περιγράφει την ταχύτητα πρόωσης είναι:

$$V_f = F_z \times n \quad [\text{mm/min}]$$

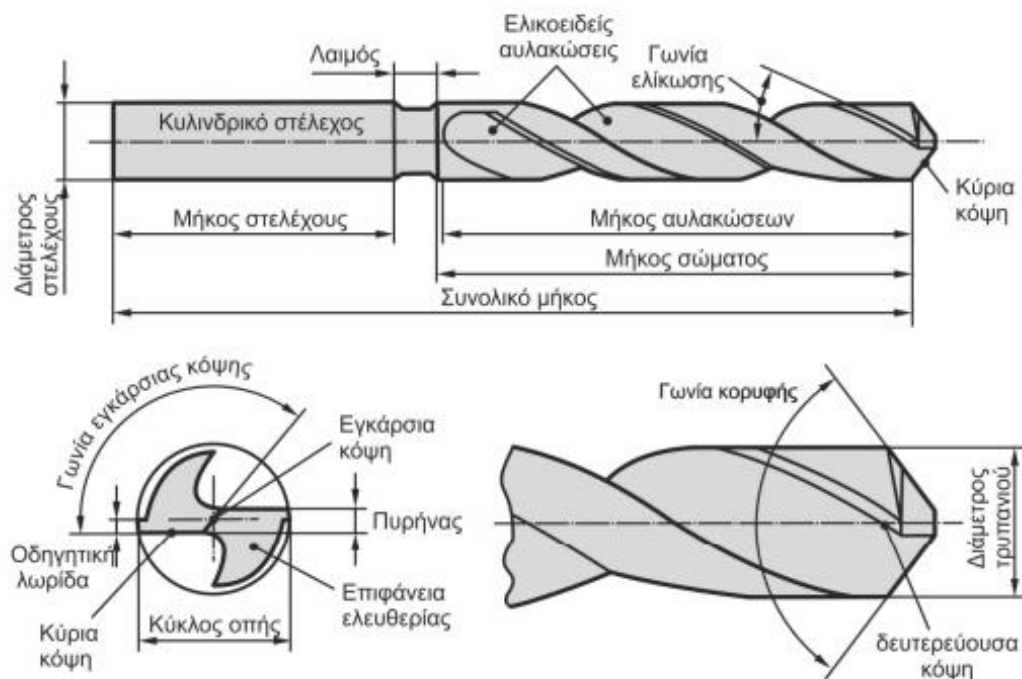
όπου:  $n$  ορίζεται ομοίως με την προηγούμενη σχέση

και  $F_z$  είναι η πρόωση ανά περιστροφή σε mm/rev



### 2.2.1 Γεωμετρία τρυπανιού

Το πιο διαδεδομένο εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά τη διάτρηση σύνθετων υλικών είναι το δρέπανο και συγκεκριμένα το ελικοειδές τρυπάνι (twist drill). Τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά έχουν σημαντικό ρόλο στη δύναμη ώθησης που ασκεί το κοπτικό εργαλείο στο τεμάχιο και κατ' επέκταση ασκούν μεγάλη επιρροή στην τελική επιφάνεια του τεμαχίου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά περιγράφονται στο σχήμα 2.5. [4]



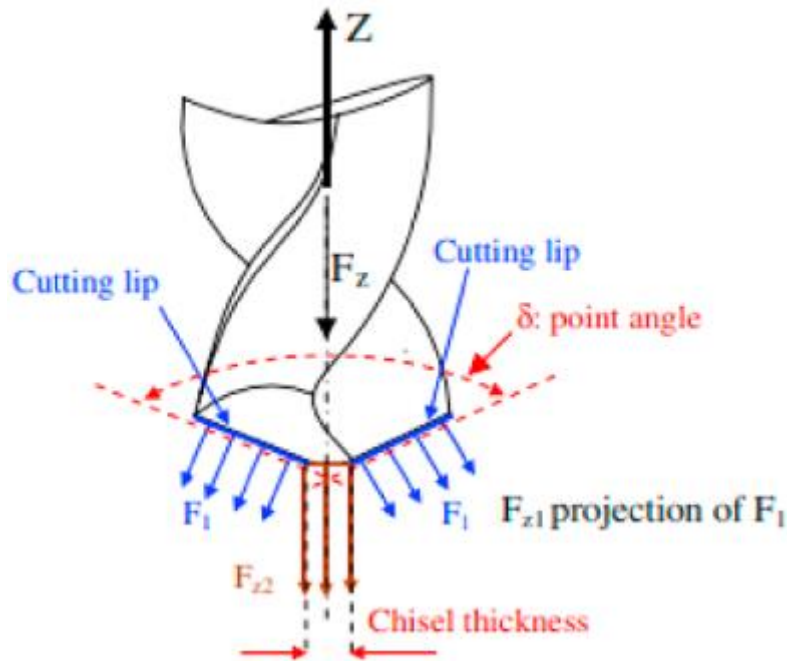
Σχήμα 2.5. Περιγραφή του εργαλείου διάτρησης (τρυπάνι)

### 2.2.2 Δύναμη ώθησης και ροπή κατά τη διάτρηση

Η δύναμη ώθησης είναι η συνισταμένη δύναμη που προκύπτει αθροίζοντας τη δύναμη που παράγεται από τη δευτερεύουσα κόψη (cutting lip) με τη δύναμη που παράγει η εγκάρσια κόψη (chisel edge) του κοπτικού λόγω της επαφής με το τεμάχιο (σχήμα 2.6). Άρα η συνολική δύναμη που παράγεται κατά τη διάνοιξη οπής περιγράφεται από την εξίσωση 2.1 που περιγράφεται παρακάτω [5]:

$$F_z = 2F_{z1} + F_{z2} \quad (2.1)$$

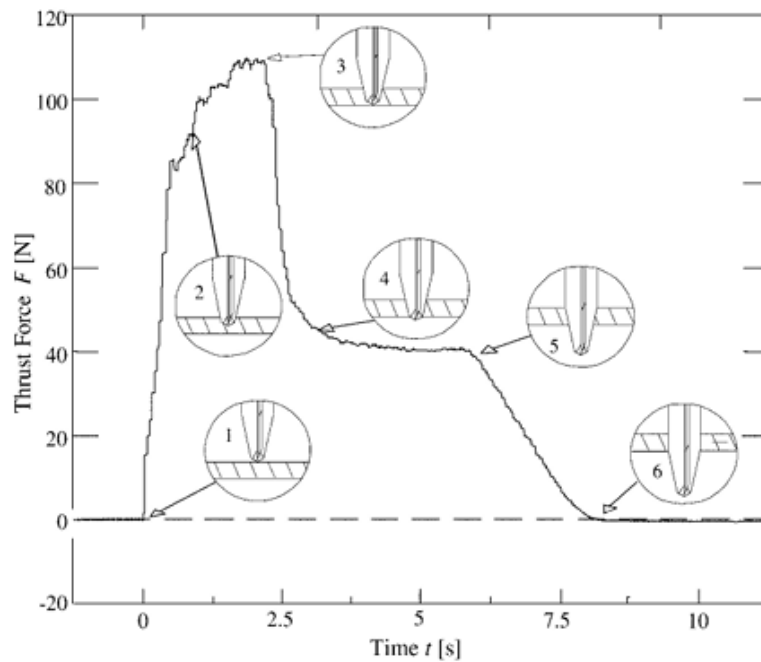




Σχήμα 2.6: Κατανομή δυνάμεων στη άκρη του κοπτικού εργαλείου

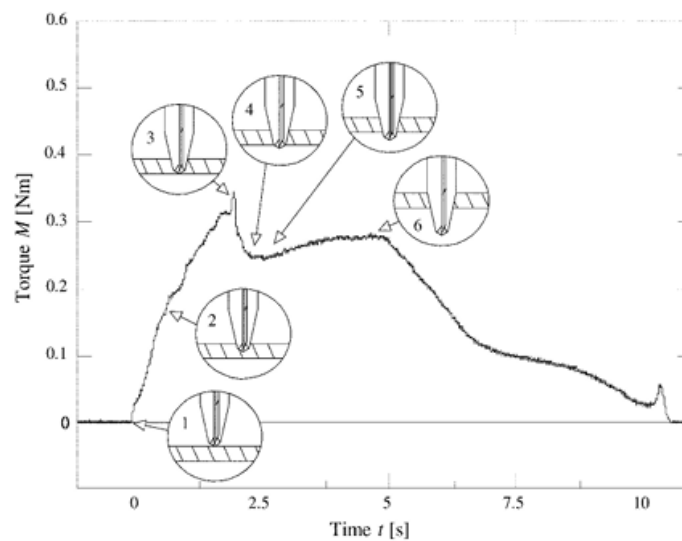
Η δύναμη ώθησης έχει πολύ σημαντικό ρόλο στη συχνότερη αστοχία υλικού που συναντάται κατά την κοπή σύνθετων υλικών, την αποκόλληση των στρώσεων (delamination) που μελετάται στη συνέχεια. Για αυτόν το λόγο θα αναλυθεί η δύναμη και η ροπή που ασκείται καθ' όλη τη διάρκεια της διάνοιξης οπής. Το διάγραμμα που ακολουθεί στο σχήμα 2.7 είναι χωρισμένο σε 6 στάδια.

Στο πρώτο στάδιο υπάρχει μια μεγάλη αύξηση της δύναμης ώθησης καθώς εκείνη τη στιγμή ξεκινάει η διαδικασία διάνοιξης της οπής. Στο δεύτερο στάδιο η δύναμη αυτή αυξάνεται καθώς η δεύτερη κοπτική ακμή περνάει στο υλικό και εισέρχεται στην οπή. Στο τρίτο στάδιο παρατηρείται και η μέγιστη δύναμη ώθησης καθώς το τρυπάνι πλησιάζει προς το μέγιστο ονομαστικό βάθος της οπής. Όπως αναλύεται παρακάτω η αποκόλληση των τελευταίων στρώσεων σε τεμάχια ανθρακονήματος είναι η πιο συχνή αστοχία και αυτή συμβαίνει λόγω της μέγιστης δύναμης ώθησης που προκύπτει. Στο τέταρτο στάδιο η δύναμη ώθησης πέφτει ταχύτατα καθώς η άκρη του κοπτικού εργαλείου έχει περάσει ολόκληρη το τεμάχιο. Η δύναμη πέφτει κι άλλο καθώς η πρώτη εγκάρσια κόψη διαπερνάει το τεμάχιο και στο τελευταίο στάδιο η δύναμη μηδενίζεται καθώς βρίσκεται πλέον σε διαδικασία διεύρυνσης της οπής (reaming). [6]



Σχήμα 2.7. Γραφική παράσταση δύναμης ώθησης-χρόνου κατά τη διάτρηση

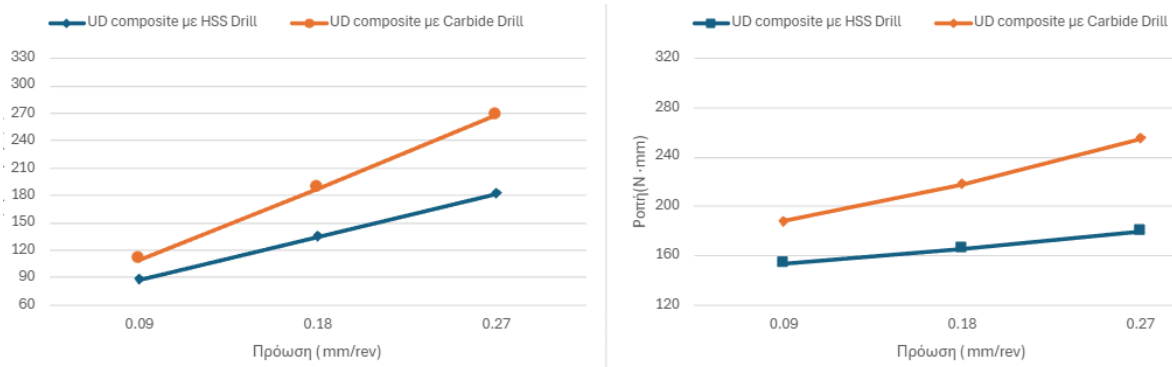
Το διάγραμμα της ροπής έχει πανομοιότυπη μορφή και οι μεγάλες διακυμάνσεις προκύπτουν κατά τα ίδια στάδια αλλά με μικρότερη ένταση παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.8](#).



Σχήμα 2.8. Γραφική παράσταση ροπής-χρόνου κατά τη διάτρηση

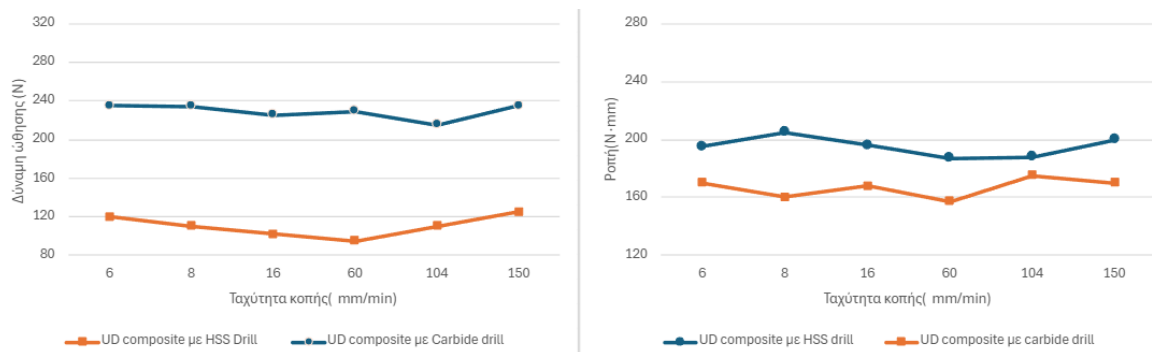
### 2.2.3 Παράγοντες που μεταβάλλουν τη δύναμη ώθησης και τη ροπή

Η δύναμη ώθησης καθώς και η ροπή επηρεάζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου και από τις συνθήκες κοπής. Ως συνθήκες κοπής ορίζονται η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Συγκεκριμένα κατά τον Chen [7], έδειξε ότι αυξάνοντας την πρόωση αυξάνεται και η δύναμη ώθησης και σε μικρότερο βαθμό η ροπή ([σχήμα 2.9](#)).



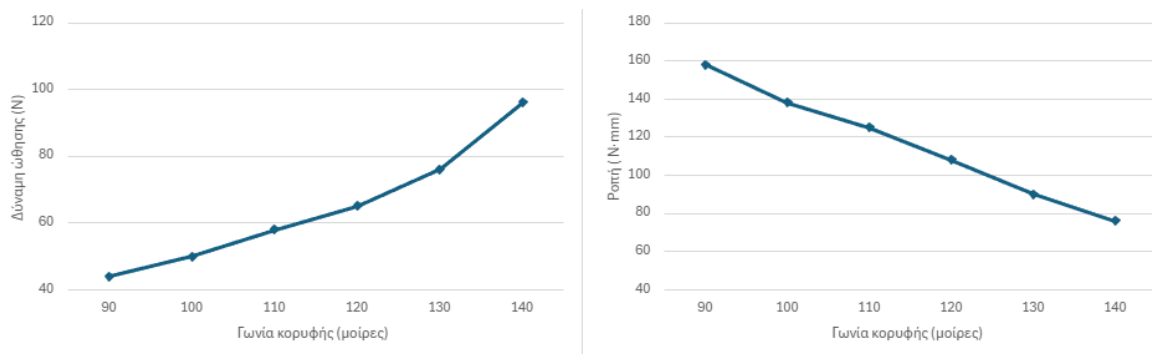
Σχήμα 2.9. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα δύναμης ώθησης με την πρόωση και δεξιά η ροπή με την πρόωση κατά τη διάτρηση

Όσον αφορά την ταχύτητα κοπής, με την αύξησή της παρατηρείται αρχικά μια πτώση στη δύναμη ώθησης αλλά μετά από ένα κατώφλι ταχύτητας η δύναμη ώθησης αρχίζει και αυξάνεται. Ομοίως και η ροπή αρχικά μειώνεται αλλά μετά από ένα κατώφλι ταχύτητας φαίνεται να έχει αυξητικές τάσεις (σχήμα 2.10).



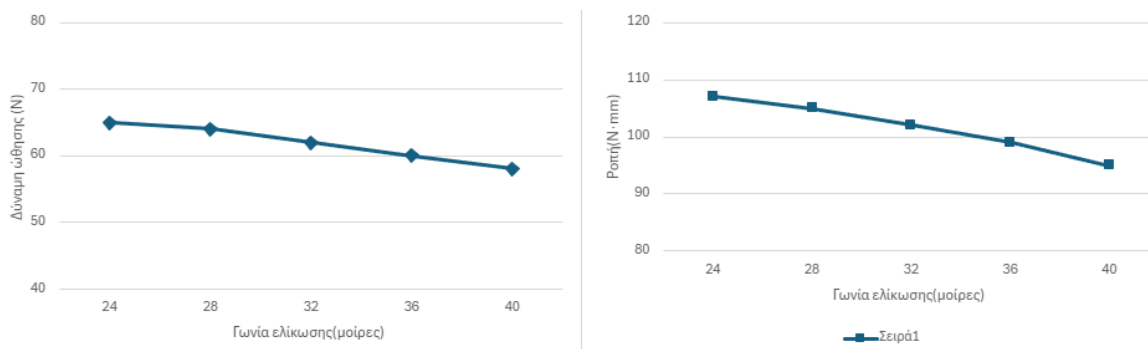
Σχήμα 2.10. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα δύναμης ώθησης με την ταχύτητα κοπής και δεξιά η ροπή με τη ταχύτητα κοπής κατά τη διάτρηση

Διάφοροι ερευνητές μετά τον Chen έχουν προσπαθήσει να εντοπίσουν την κρίσιμη ταχύτητα, η οποία είναι η βέλτιστη ως προς τη δύναμη ώθησης αλλά και τη ροπή. Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου κατά τον Chen αυξάνοντας τη γωνία κορυφής αυξάνεται η δύναμη ώθησης αλλά μειώνεται η ροπή (σχήμα 2.11).



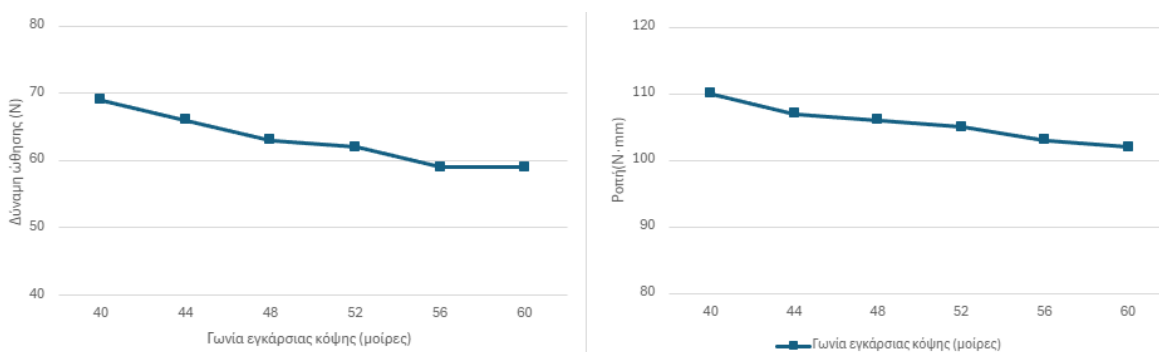
Σχήμα 2.11. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα δύναμης ώθησης με τη γωνία κορυφής και δεξιά η ροπή με τη γωνία κορυφής κατά τη διάτρηση

Εν συνεχεία η γωνιά ελίκωσης φαίνεται ότι αυξάνοντας την επηρεάζει σε πολύ μικρό βαθμό τη δύναμη ώθησης Και παράλληλα αυξάνοντας τη μειώνεται και η ροπή που ασκείται στο τεμάχιο (σχήμα 2.12).



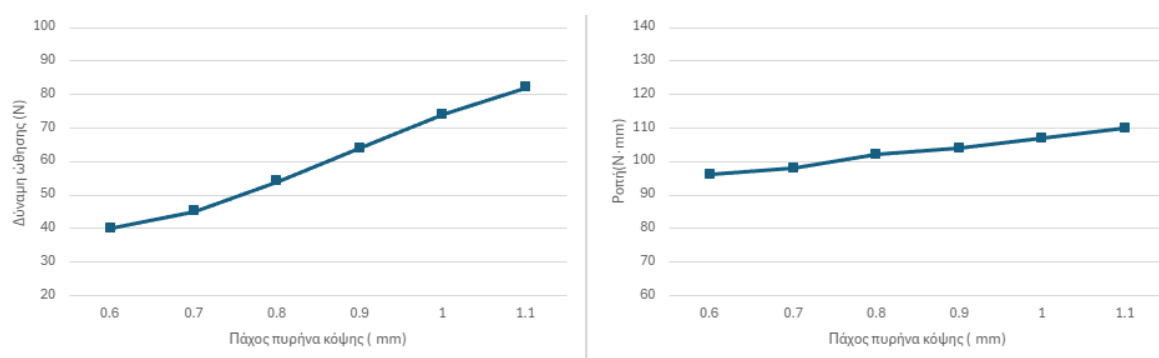
Σχήμα 2.12. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα δύναμης ώθησης με τη γωνία ελίκωσης και δεξιά η ροπή με τη γωνία ελίκωσης κατά τη διάτρηση

Έπειτα με την αύξηση της γωνίας εγκάρσιας κόψης παρατηρείται μικρή πτώση και στις δύο μεταβλητές (σχήμα 2.13) .



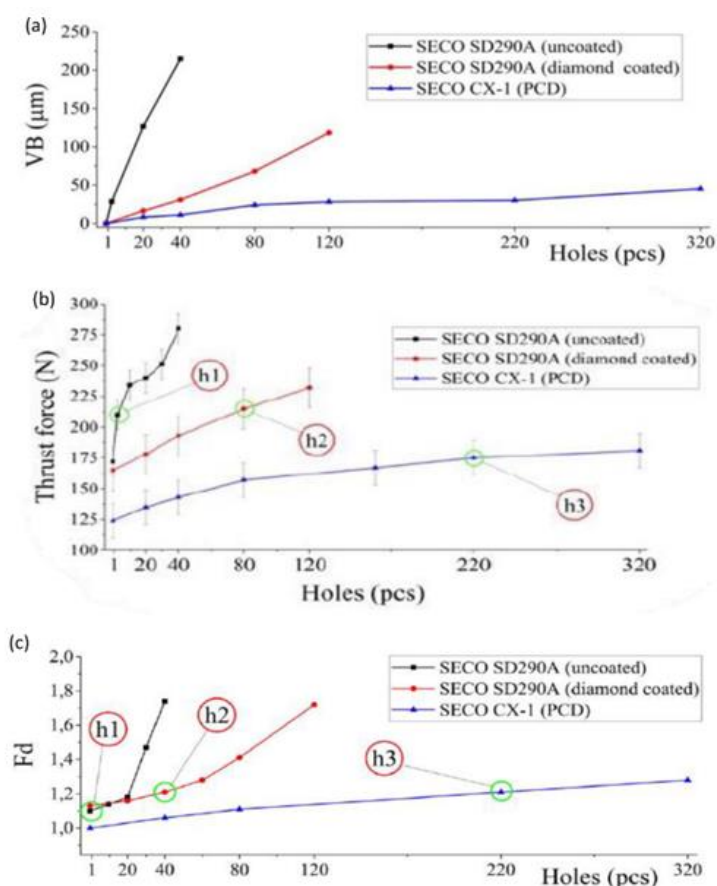
Σχήμα 2.13. Αριστερά φαίνεται το διάγραμμα δύναμης ώθησης με τη γωνία εγκάρσιας κόψης και δεξιά η ροπή με τη γωνία εγκάρσιας κόψης κατά τη διάτρηση

Τέλος με την αύξηση του πάχους του πυρήνα αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η δύναμη ώθησης τέλος επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό ή ροπή (σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Αριστερά το διάγραμμα δύναμης ώθησης με το πάχος του πυρήνα και δεξιά η ροπή με το πάχος του πυρήνα κόψης κατά τη διάτρηση

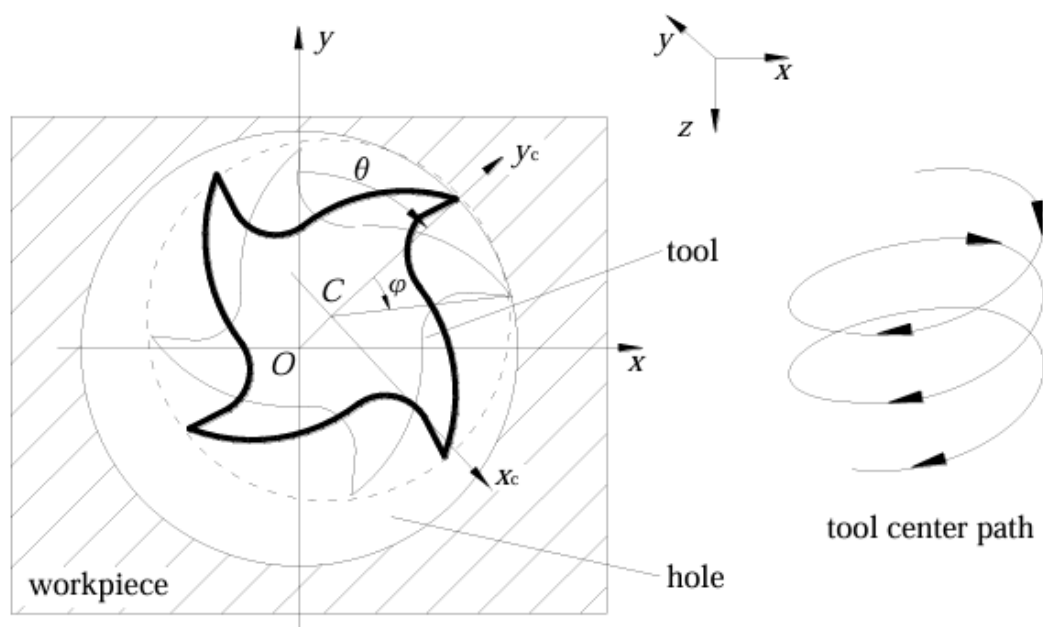
Ο επόμενος και τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει τη δύναμη ώθησης και τη ροπή έχει να κάνει με τη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου η οποία συμβαίνει λόγω του αριθμού κατεργασιών που έχει διεκπεραιώσει και προφανώς η φθορά αυτή, όπως και η δύναμη ώθησης που ασκείται στο τεμάχιο, επηρεάζονται από το υλικό του κοπτικού εργαλείου. Συγκεκριμένα, με βάση τη βιβλιογραφία [8], εργαλεία χωρίς κάποια επικάλυψη ασκούν τη μεγαλύτερη δύναμη ώθησης, με επικάλυψη διαμαντιού η δύναμη είναι μειωμένη και με επικάλυψη PCD η δύναμη είναι ακόμα μικρότερη. Έπειτα η δύναμη ώθησης παραμένει μικρότερη για μεγαλύτερο αριθμό οπών όσο σκληρότερο είναι το υλικό εάν το κοπτικό εργαλείο έχει επικάλυψη PCD (2.12) (σχήμα 2.15). [9]



Σχήμα 2.15. Στο διάγραμμα (α) συγκρίνεται η φθορά στην επιφάνεια ελευθερίας ανάλογα με το υλικό, (β) συγκρίνεται η δύναμη ώθησης ανάλογα το υλικό, και στο (c) συγκρίνεται ο συντελεστής αποκόλλησης ανάλογα το υλικό

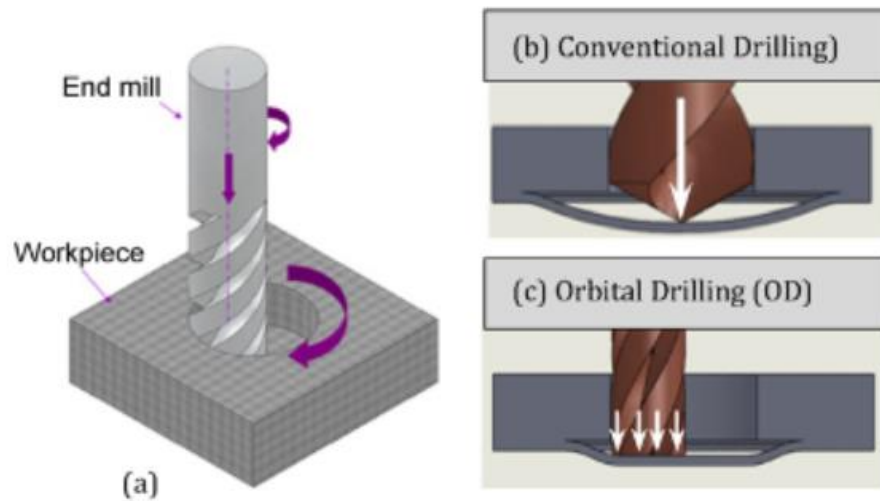
## 2.3 Η κατεργασία του ελικοειδούς φραιζαρίσματος

Ως ελικοειδές φραιζάρισμα (helical milling) ή αλλιώς τροχιακή διάτρηση (orbital drilling) ορίζεται η κατεργασία στην οποία το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με περιστροφή γύρω από το κέντρο της οπής έχοντας αξονική πρόωση, γεγονός που δημιουργεί μία σπειροειδής κίνηση. Στο [σχήμα 2.16](#) που ακολουθεί ορίζεται ως  $O$  το κέντρο της οπής και ως  $C$  ορίζεται το κέντρο του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.16. Η κίνηση του ελικοειδούς φραιζαρίσματος

Η κατεργασία αυτή βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε περίπλοκα ως προς την κατεργασία υλικά, όπως είναι τα σύνθετα υλικά και οι συνδυασμοί τους, όπως για παράδειγμα CFRP/Ti. Αυτό συμβαίνει λόγω αρκετών πλεονεκτημάτων απέναντι στη διάτρηση. Βασική διαφορά τους είναι ότι στη συμβατική διάτρηση στο κέντρο του κοπτικού εργαλείου η ταχύτητα κοπής είναι μηδενική, γεγονός που δημιουργεί μεγάλη παραμόρφωση στις τελευταίες στρώσεις ενός σύνθετου υλικού κατά την κοπή του. Συχνά αυτό δημιουργεί αποκόλληση των στρώσεων και άκοπες ίνες στην έξοδο της οπής. Παράλληλα το ελικοειδές φραιζάρισμα παράγει μικρότερη δύναμη ώθησης με αποτέλεσμα η οπή να έχει μικρότερη απόληξη και ελάχιστη έως καθόλου αποκόλληση των στρώσεων του υλικού. Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχει το ελικοειδές φραιζάρισμα είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία που παράγεται κατά την κοπή λόγω της διαλείπουσας κοπής και της μερικώς δεσμευμένης κοπτικής ακμής του εργαλείου (σχήμα 2.17). [10]



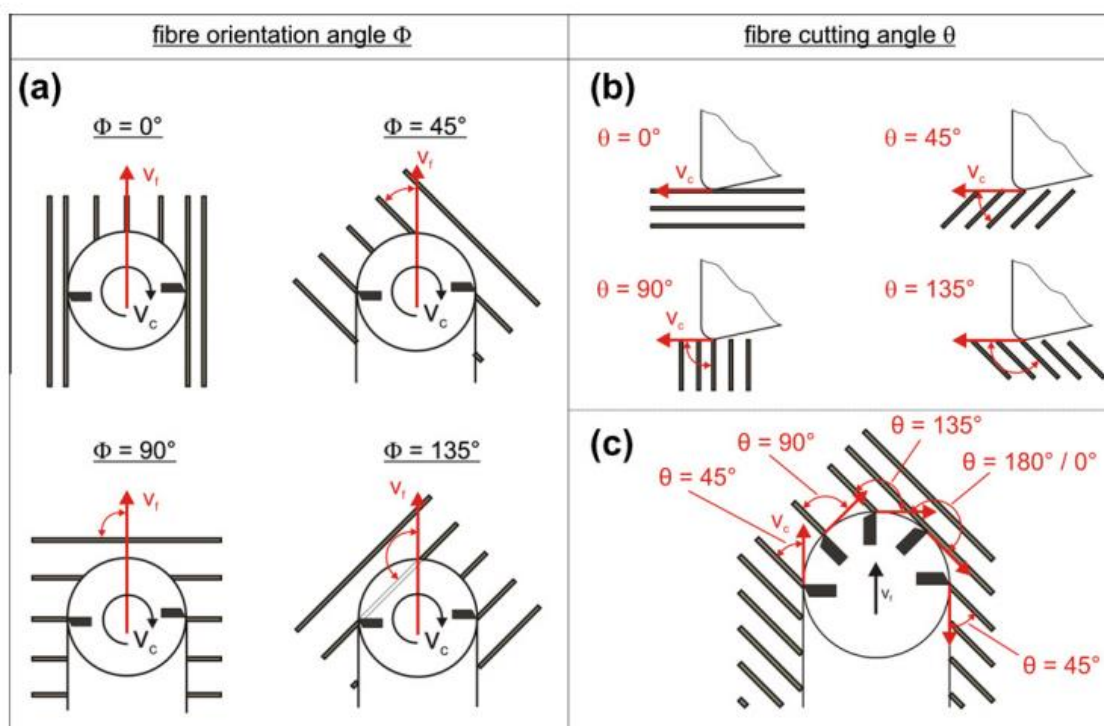
Σχήμα 2.17. Σύγκριση της παραμόρφωσης που προκαλείται στο τεμάχιο ανάμεσα σε (b) συμβατική διάτρηση και (c) ελικοειδούς φραιζαρίσματος

Τα παραπάνω μειώνουν την πιθανότητα να λιώσει η μήτρα του CFRP. Παράλληλα λόγω του μικρού και ασυνεχούς αποβλίπτου που παράγεται είναι ευκολότερη η αποβολή του, και η ευκολότερη εξαγωγή της θερμοκρασίας που παράγεται κατά την κοπή μαζί με αυτό. Τέλος έχοντας ένα κοπτικό εργαλείο είναι εφικτή η διάτρηση διαφόρων διαμέτρων οπών μειώνοντας το κόστος των διαφόρων κατεργασιών έχοντας ένα είδος κοπτικού εργαλείου. [11]

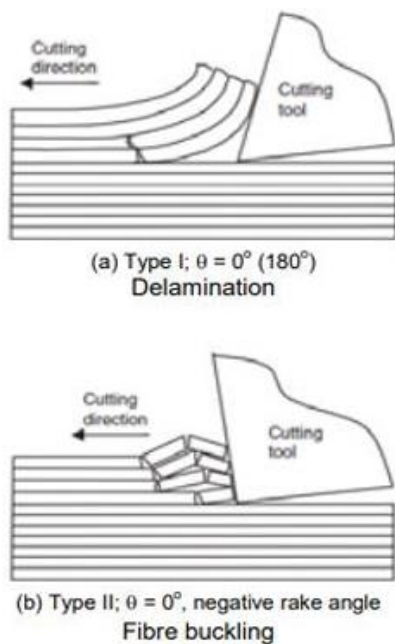


## 2.4 Μηχανισμός κοπής του ινοπλισμένου πολυμερούς ανθρακονήματος

Ο μηχανισμός κοπής των CFRP διαφέρει σημαντικά από τον μηχανισμό των ομοιογενών υλικών λόγω της εν γένει ανισότροπης και ετερογενούς φύσης των σύνθετων υλικών. Παράλληλα η διαδικασία αφαίρεσης υλικού διαφέρει σημαντικά με τα κράματα μετάλλου καθώς τα δύο συστατικά στοιχεία συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού στα CFRP εξαρτάται σημαντικά από τη διάταξη των ινών καθώς είναι αρκετά δύσκολο να ελεγχθεί η διαδικασία αφαίρεσης υλικού αφού η άκρη του κοπτικού συναντάει ενίοτε ίνες και ενίοτε ρητίνη. Συχνά όταν χρησιμοποιείται πλέξη μόνης κατεύθυνσης, για να επιτευχθούν σχεδόν ισοτροπικές ιδιότητες στο υλικό, οι πλέξεις τοποθετούνται σε τέσσερις κατευθύνσεις μοιρών  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $-45^\circ$ . Τα στρώματα χρειάζεται να έχουν στρώσεις  $0^\circ$  για να ανταποκρίνονται σε αξονικά φορτία,  $\pm 45^\circ$  στρώσεις για να αντέχουν σε διατμητικά φορτία και  $90^\circ$  στρώσεις για την αντοχή σε πλευρικά φορτία. Όμως ο προσανατολισμός των στρώσεων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της επιφάνειας των οπών καθώς αλλάζει ο μηχανισμός κοπής του υλικού ανάλογα με την κατεύθυνση των ινών σε σχέση με το κοπτικό. Συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της διάνοιξης οπής το υλικό αφαιρείται από μια σειρά θραύσεων και φορτίων που μοιράζονται άνισα ανάμεσα στις ίνες και στη ρητίνη. Η κοπτική ακμή έρχεται σε επαφή με διάφορες στρώσεις από διαφορετικά προσανατολισμένο ανθρακόνημα, κάτι το οποίο δημιουργεί μια δυναμική αλλαγή στη γωνία κοπής ινών και άρα και στη διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Ως γωνία κοπής ινών ορίζεται η γωνία που σχηματίζει η κοπτική ακμή του εργαλείου με την κατεύθυνση που έχουν οι ίνες κάποια χρονική στιγμή. Στο σχήμα 2.19 φαίνονται η κατεύθυνση της ακμής του εργαλείου ανά τις γωνίες ώστε να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός κοπής. Ως γωνία κατεύθυνσης της ίνας ορίζεται η γωνία βάση της οποίας έχει στρωθεί το ύφασμα στο τεμάχιο. [12]



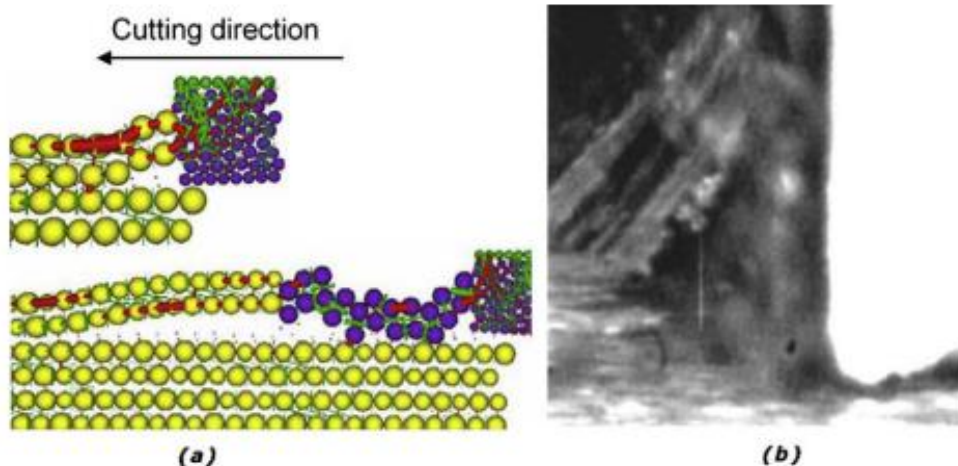
Σχήμα 2.19. (α) Γωνία κατεύθυνσης (ή προσανατολισμού) της ίνας. (β) Γωνία κοπής ινών. (γ) Παραδείγματα γωνίας κοπής ινών



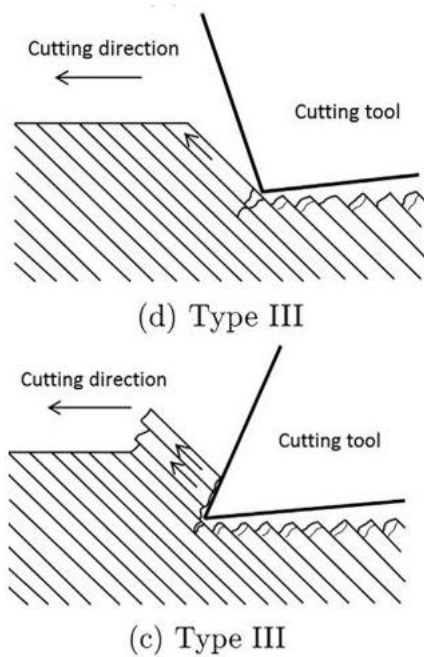
Σχήμα 2.20. (α) Αποκόλληση στις στρώσεις  $0^\circ$ , (β) λυγισμός ινών λόγω αρνητικής γωνίας κοπής στις  $0^\circ$ . [15]

Αναλυτικά υπάρχουν τέσσερις μορφές μηχανισμού κοπής. Όταν η γωνία που σχηματίζεται είναι  $0^\circ$  τότε η κοπή παρατηρείται να έχει δύο διαφορετικούς τύπους, ανάλογα με τη γωνία αποβλίπτου. Εάν η γωνία αποβλίπτου είναι θετική τότε ο μηχανισμός κοπής είναι τύπου I όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20. Η κοπή ξεκινάει όταν η ακμή του κοπτικού αρχίζει να χωρίζει τις στρώσεις του τεμαχίου προκαλώντας τη σταδιακή αποκοπή τους. Το ξεφλουδισμένο στρώμα ολισθαίνει προς τα πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού με αποτέλεσμα να του προκαλείται κάμψη. Το σπάσιμο της στρώσης που βρισκόταν σε κάμψη συμβαίνει μπροστά από την κοπτική ακμή του εργαλείου και κάθετα στην κατεύθυνση των ινών. Το απόβλιπτο αποβάλλεται σε μικρά ακανόνιστα και ασυνεχή ρινίσματα στις συγκεκριμένες συνθήκες. Οι δυνάμεις κοπής τείνουν να κυμαίνονται λόγω του κυκλικού φαινομένου αποφλοίωσης, κάμψης και τελικώς σπασίματος της εκάστοτε στρώσης. Έχοντας μηδενική ή αρνητική γωνία αποβλίπτου ο μηχανισμός κοπής τύπου 2 προκύπτει κυρίως από λυγισμό των ινών σχήμα 2.20(β).

Λόγω της συμπίεσης που δέχονται οι ίνες κατά μήκος του άξονά τους λυγίζουν με αποτέλεσμα όσο προχωράει η κοπτική ακμή του εργαλείου προκαλεί ρωγμές στη διεπιφάνεια ίνας-ρητίνης με αποτέλεσμα την κοπή τους μέσω του έντονου λυγισμού τους. Το απόβλιπτο αποβάλλεται σε μικρά ασυνεχή ρινίσματα. Αν και οι δυνάμεις κοπής έχουν μικρότερη διακύμανση από ότι στον τύπο κοπής I η κατεργασμένη επιφάνεια έχει παρόμοια ποιότητα (σχήμα 2.20). Στο σχήμα 2.21 φαίνεται η κοπή σε προσομοίωση διακριτών στοιχείων και σε φωτογραφία από κάμερα υψηλής ταχύτητας. [13,14,16]

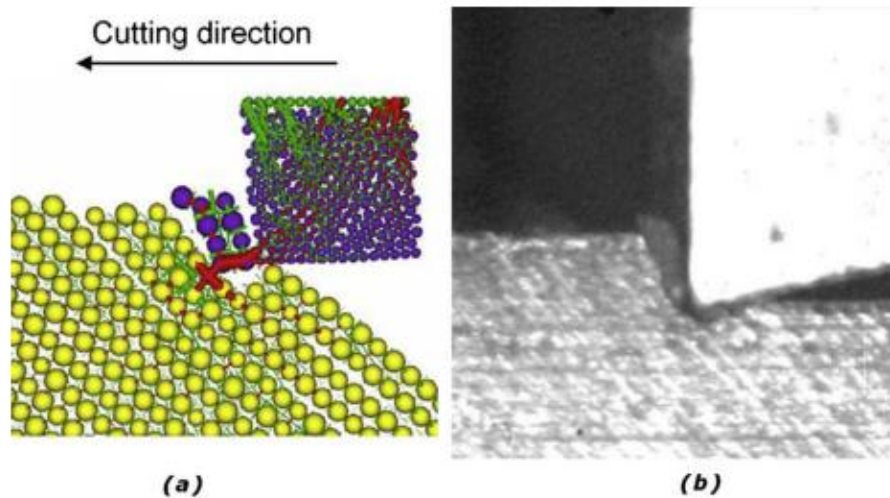


Σχήμα 2.21. Μηχανισμός κοπής στις  $0^\circ$  (α) προσομοίωση με διακριτά στοιχεία, (β) εικόνα από κάμερα υψηλής ταχύτητας



Όταν η γωνία που σχηματίζεται είναι ανάμεσα σε 0 και 90 μοίρες ο μηχανισμός κοπής είναι τύπου III και παρουσιάζεται στο σχήμα 2.22 και είναι ανεξάρτητος από τη γωνία αποβλίπτου καθώς είναι όμοιος είτε πρόκειται για θετική, για μηδενική ή για αρνητική γωνία. Σε αυτόν το μηχανισμό κοπής το απόβλιπτο δημιουργείται κυρίως μέσω διάτμησης που συμβαίνει λόγω συμπίεσης της διεπιφάνειας των ινών με τη ρητίνη κατά μήκος του άξονά τους. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης δημιουργούνται ρωγμές πάνω και κάτω από το επίπεδο της κοπής. Το κάτω επίπεδο δεν κόβεται και παραμένει πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια. Σε αυτές τις συνθήκες το απόβλιπτο είναι είτε συνεχές είτε ασυνεχές. Στο σχήμα 2.23 φαίνεται η κατεργασία σε προσομοίωση διακριτών στοιχείων και σε φωτογραφία από κάμερα υψηλής ταχύτητας. [13,14,16]

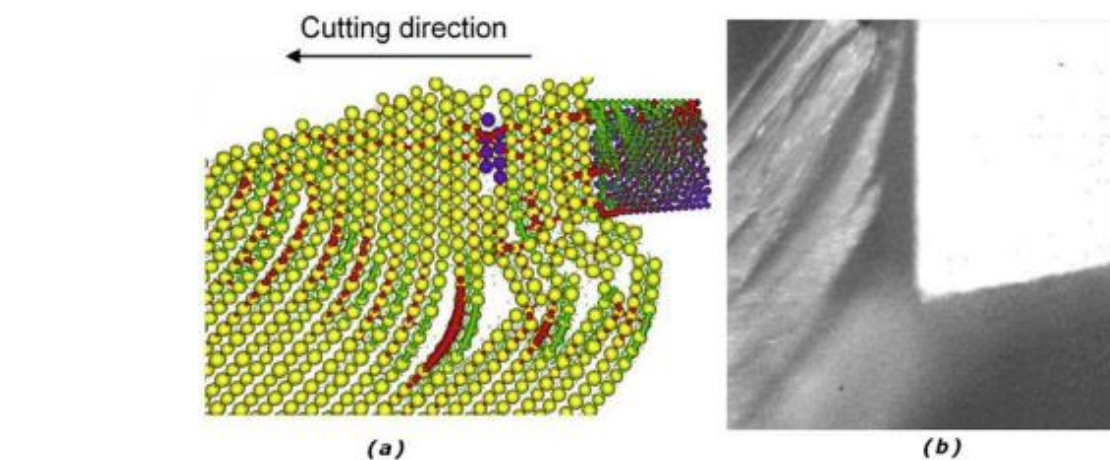
Σχήμα 2.22. Αναπαράσταση του μηχανισμού κοπής στις 45° [15]



Σχήμα 2.23. Μηχανισμός κοπής στις 45° (α) προσομοίωση με διακριτά στοιχεία, (β) εικόνα από κάμερα υψηλής ταχύτητας

Όταν η γωνία που σχηματίζεται είναι μεταξύ 105 και 150 μοίρες τότε η κοπή συμβαίνει κυρίως λόγω της διάτμησης, η οποία προκαλεί τελικώς τη θραύση (σχήμα 2.24). Όσο η κατεργασία βρίσκεται σε εξέλιξη υπάρχει σημαντική παραμόρφωση των ινών η οποία συνεπάγεται διάτμηση μεταξύ των στρώσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας ίνας/ρητίνης. Η αφαίρεση του αποβλήτου στη συνέχεια συμβαίνει λόγω της συνεχής και υπέρμετρης ελαστικής παραμόρφωσης γεγονός που δημιουργεί ρωγμές του σύνθετου υλικού και εν τέλει παράγει σχετικά μεγάλο απόβλητο. Σε αυτόν το μηχανισμό κοπής συχνά συναντάται ακανόνιστη κατεργασμένη επιφάνεια, λόγω του διαφορετικού μήκους των ινών που προκύπτουν επειδή η θραύση της κάθε ίνας προκύπτει σε διαφορετική στιγμή. Συχνά η ελαστική παραμόρφωση δημιουργεί άκοπες ίνες η οποίες επιστρέφουν στην αρχική τους θέση. Στο σχήμα 2.25 φαίνεται η κοπή σε προσομοίωση διακριτών στοιχείων και σε φωτογραφία από κάμερα υψηλής ταχύτητας. [13,14]

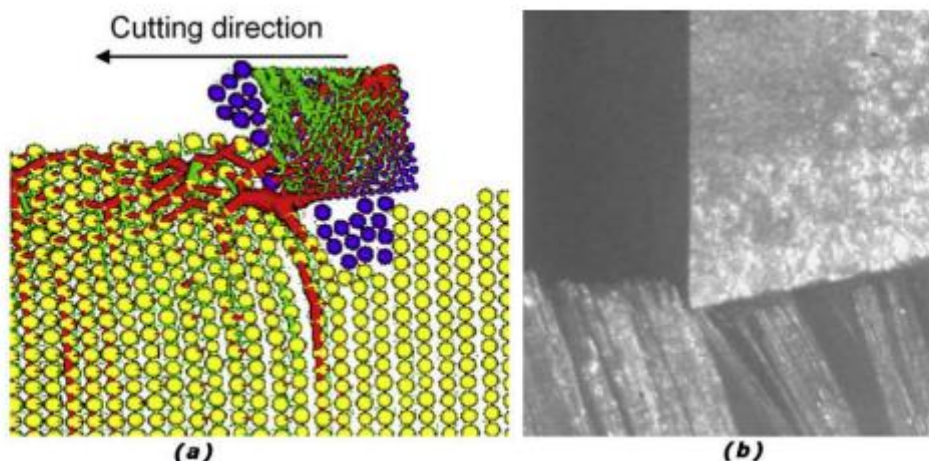
Σχήμα 2.24. Μηχανισμός κοπής στις  $90^\circ$  τύπος IV (πάνω) και στις  $135^\circ$  ή  $-45^\circ$  τύπου V(κάτω) [15]



Σχήμα 2.25. Μηχανισμός κοπής στις  $-45^\circ$  (α) προσομοίωση με διακριτά στοιχεία, (β) εικόνα από κάμερα υψηλής ταχύτητας



Όταν η γωνία που σχηματίζεται κατά την κοπή είναι  $90^\circ$  τότε η αφαίρεση υλικού συμβαίνει κυρίως λόγω της αυξανόμενης διαστρωματικής διάτμησης που οδηγεί σε θραύση του αποβλίπτου κατά μήκος της διεπαφής ίνας/μήτρας και γίνεται ο κυρίαρχος τρόπος αφαίρεσης του αποβλίπτου σχήμα 2.24 (Τύπος IV) . Μετά την κοπή, οι ίνες επιστρέφουν ελαστικά στην αρχική τους θέση και τρίβουν την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου δημιουργώντας του φθορά. Κατά την κοπή στις  $90^\circ$ , η ζώνη συμπίεσης που βρίσκεται κάτω από το εργαλείο οδηγεί σε σημαντικές βαθιές ρωγμές στο υλικό. [13,14,16]

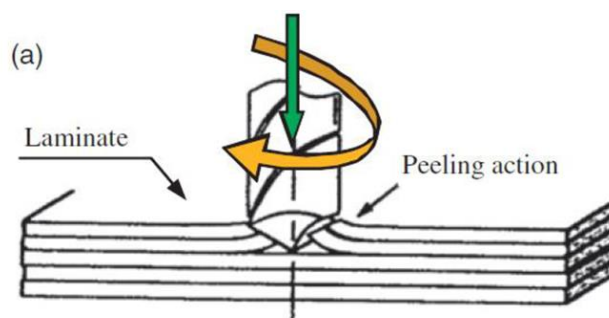


Σχήμα 2.26: Μηχανισμός κοπής στις  $90^\circ$  (α) προσομοίωση με διακριτά στοιχεία.(β) εικόνα από κάμερα υψηλής ταχύτητας

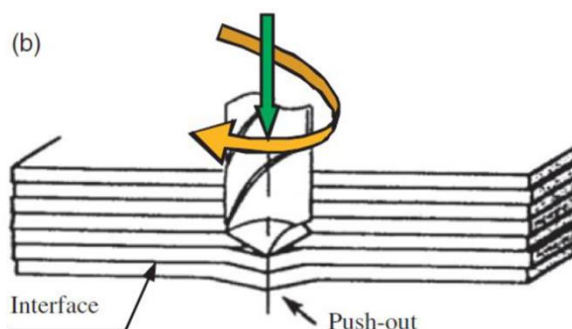
## 2.5 Αποκόλληση κατά την κοπή ινοπλισμένου πολυμερούς ανθρακόνηματος

### 2.5.1 Ορισμός και δημιουργία αποκόλλησης ( Delamination ) των επίπεδων του CFRP

Αποκόλληση είναι μία μορφή αστοχίας υλικού κατά την οποία το υλικό χωρίζεται σε πολλές στρώσεις. Έτσι ένα συμπαγές τεμάχιο που αποτελείται από πολλές στρώσεις CFRP διαλύεται και παύει να είναι συμπαγές. Η αποκόλληση που προκαλείται από τη διάτρηση συμβαίνει συνήθως στην είσοδο και στην έξοδο της περιφέρειας της οπής. Σύμφωνα με τον μηχανισμό που σχηματίζεται η αποκόλληση σε κάθε περίπτωση ονομάζεται peel-up, στην περίπτωση που βρίσκεται στην είσοδο της οπής (σχήμα 2.27 και σχήμα 2.28) και push-out όταν βρίσκεται στην έξοδο. [17]

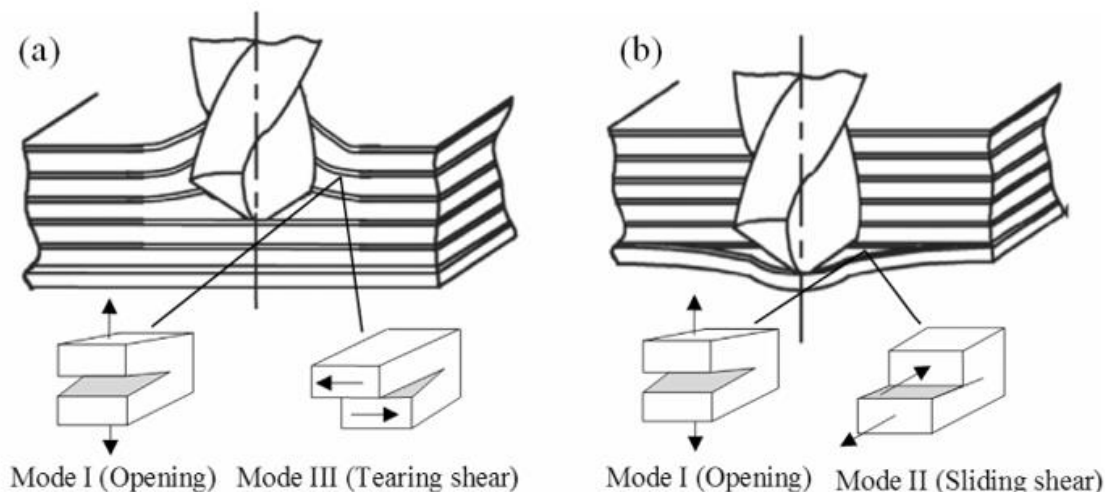


Σχήμα 2.27. Αποκόλληση εισόδου τύπου peel-up



Σχήμα 2.28. Αποκόλληση εξόδου τύπου push-out

Στο σχήμα 2.27 απεικονίζεται ο μηχανισμός αποκόλλησης peel-up που προκύπτει εξαιτίας του σχήματος του αυλού του κοπτικού εργαλείου, την ελικοειδή γωνία του και τη ροπή που δέχεται η επιφάνεια του τεμαχίου κατά τη διάτρηση. Όταν οι κοπτικές ακμές του κοπτικού έρχονται σε επαφή με τις στρώσεις του σύνθετου υλικού, δημιουργείται μια δύναμη αποκόλλησης λόγω της κλίσης του αυλού του τρυπανιού. Η δύναμη αυτή ξεφλουδίζει τα πάνω 1-2 στρώματα από τα επόμενα και προκαλεί την αποκόλλησή τους απομακρύνοντας τα μεταξύ τους με μία σειρά σκισιμάτων όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.29\(a\)](#) ως τον τύπο III. Επιπλέον, οι ίνες των κορυφαίων στρωμάτων δεν κόβονται επαρκώς λόγω των δύσκολων συνθηκών κοπής (π.χ. δόνηση του κοπτικού εργαλείου) δημιουργώντας απόληξη διάτρησης. Παράλληλα, οι άκοπτες ίνες λόγω της περιστροφής του κοπτικού τραβιούνται προς τα πάνω, γεγονός που οδηγεί σε αποκόλληση peel-up τύπου I όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα 2.29(a). [18]



Σχήμα 2.29. Τύποι αποκόλλησης εισόδου (a) και εξόδου (b)

Στο σχήμα 2.29 παρουσιάζεται ο μηχανισμός αποκόλλησης push-out που συσχετίζεται και προκύπτει λόγω της δύναμης ώθησης του κοπτικού εργαλείου, την αντοχή του δεσμού των στρώσεων μεταξύ τους και τις συνθήκες της κατεργασίας όπως πρόωση και ταχύτητα κοπής. Όταν το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει την έξοδο της οπής, οι τελευταίες άκοπτες στρώσεις που βρίσκονται κάτω από το τρυπάνι γίνονται πιο επιρρεπείς στην παραμόρφωση και ειδικότερα στην κάμψη λόγω του λιγοστού πάχους που απομένει. Έτσι η αποκόλληση τύπου push out προκύπτει όταν η δύναμη ώθησης που ασκεί το κοπτικό στην επιφάνεια του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη δεσμού που συγκρατεί τις στρώσεις του σύνθετου υλικού ενωμένες. [18]

Η θραύση των στρώσεων στο κάτω μέρος της οπής περιγράφεται με τα μοντέλα τύπου I και II που φαίνονται στο σχήμα 2.29(b) και συμβαίνουν επειδή το υλικό κατά τη διάτρηση δέχεται τη δύναμη ώθησης και έτσι υπόκειται σε κάμψη. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αποκόλλησης που προκαλείται από τη διάτρηση. Η αποκόλληση λόγω διάτρησης έχει αναφερθεί σε διάφορες έρευνες ότι σχετίζεται άμεσα με τη δύναμη ώθησης και ότι κάτω από ένα κατώφλι δύναμης δεν υπάρχει καθόλου αποκόλληση των στρώσεων. Σύμφωνα με τον H. Ho-Cheng [19] αν θεωρηθεί η δύναμη ώθησης ως ένα μόνο συγκεντρωμένο φορτίο που δρα μέσω του κέντρου του τρυπανιού τότε η εξίσωση που το περιγράφει είναι η ακόλουθη:

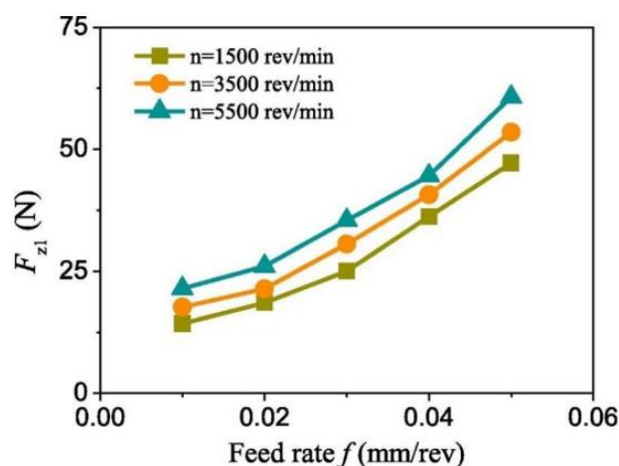
$$Fa = \pi \left[ \frac{8GicEh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

όπου το E είναι το μέτρο ελαστικότητας, το ν αναφέρεται στο λόγο Poisson, το Gic είναι η αντοχή των δεσμών των στρωμάτων ανθρακονήματος στο μοντέλο 1 (σχήμα 2.29) και h είναι η απόσταση μεταξύ της άκρης του τρυπανιού και της κάτω επιφάνειας του τεμαχίου εργασίας.

Η παραπάνω εξίσωση επιβεβαιώνει ότι η δύναμη ώθησης είναι μία από τις βασικές πτυχές στον έλεγχο της αποκόλλησης κατά την κατεργασία της διάτρησης.

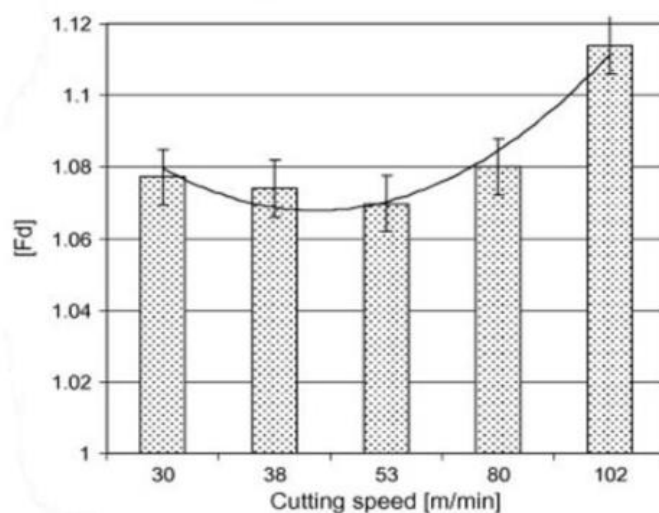


Καθώς η δύναμη ώθησης οφείλεται εν μέρη στην πρόωση του κοπτικού, μπορεί να επιτευχθεί χαμηλότερη δύναμη εάν έχουμε χαμηλότερη πρόωση (σχήμα 2.30). [18]



Σχήμα 2.30. Επίδραση της πρόωσης στη δύναμη ώθησης σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής κατά τη διάτρηση CFRP

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η ταχύτητα κοπής επηρεάζει την ποιότητα της οπής ως προς την αποκόλληση των στρώσεων. Αν η ταχύτητα κοπής είναι πολύ χαμηλή, τότε το κοπτικό εργαλείο δεν προλαβαίνει να κόψει το τεμάχιο και αντ' αυτού του ασκεί δύναμη ώθησης με αποτέλεσμα οι τελευταίες στρώσεις να παραμορφώνονται και εν τέλει να κάμπτονται με push-out delamination όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Αντίθετα εάν η ταχύτητα κοπής είναι πολύ υψηλή το σύστημα ινών και ρητίνης δεν καταφέρνει να αποβάλλει έγκαιρα τη θερμοκρασία με αποτέλεσμα η ρητίνη να χάνει τις ιδιότητές της (μαλακώνει σημαντικά) και δημιουργούνται προβλήματα που αναλύονται στο κεφάλαιο 2.5. Πειραματικά ο Marques [18] μελετώντας τις βέλτιστες συνθήκες κοπής βρήκε ότι χρησιμοποιώντας μια κρίσιμη μέση ταχύτητα κοπής ο συντελεστής αποκόλλησης είναι ο ελάχιστος δυνατός. Η κρίσιμη ταχύτητα κοπής (σχήμα 2.31) χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω στο μέλλον για να υπάρξουν πιο άρτια συμπεράσματα.

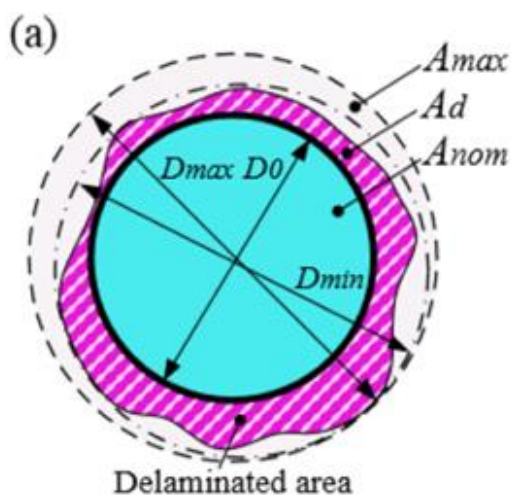


Σχήμα 2.31. Κρίσιμη ταχύτητα κοπής για ελαχιστοποίηση της αποκόλλησης στα 53 m/min

### 2.5.2 Μέθοδοι μέτρησης της αποκόλλησης

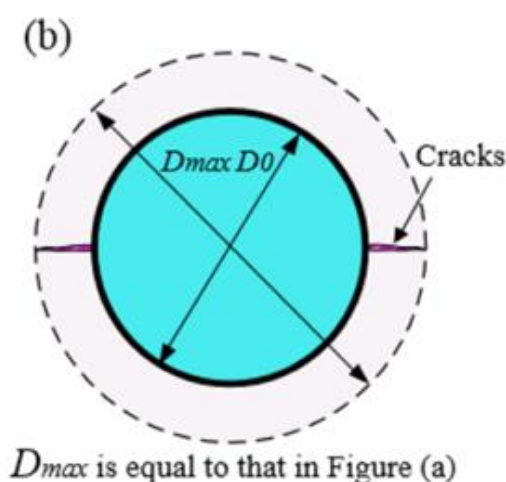
Για την ποσοτικοποίηση της αποκόλλησης έχουν δημιουργηθεί αρκετές μεθοδολογίες και αυτό που τις ξεχωρίζει είναι το τι ακριβώς συμπεριλαμβάνεται στο μέγεθος της αποκόλλησης. Για παράδειγμα η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τον CHEN [20] είναι μία από τις πιο διαδεδομένες εξισώσεις και αυτό διότι η απλότητά της την καθιστά εύκολη στη σωστή εφαρμογή της (σχήμα 2.32). Έτσι ορίζεται ως παράγοντας αποκόλλησης  $F_d$  η διαίρεση της μέγιστης διαμέτρου της αποκολλημένης επιφάνειας  $D_{max}$  με την ονομαστική διάμετρο  $D_{nom}$  γνωρίζοντας ότι οι δύο κύκλοι είναι ομόκεντροι. [17]

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.32. Διάγραμμα αποκόλλησης μετά από διάτρηση

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχοντας μία μόνο τιμή για  $D_{max}$  λαμβάνει υπόψη μόνο τη μέγιστη διάμετρο όπου εντοπίζεται αποκόλληση. Έτσι ενδέχεται ο συντελεστής αποκόλλησης να είναι αυξημένος λόγω ενός σημείου της περιμέτρου που έχει προκύψει από μία μικρορωγμή (σχήμα 2.33). [17]



Σχήμα 2.33. Η μέγιστη διάμετρος  $D_{max}$  είναι ίδια με το σχήμα 2.32 λόγω μικρών ρωγμών περιμετρικά της οπής

Με βάση τη βιβλιογραφία ο Faraz [21] πρότεινε για συντελεστή αποκόλλησης τον όρο  $Fa$  που προκύπτει από το πηλίκο της επιφάνειας με αποκόλληση ( $A_d$ ) και της ονομαστικής επιφάνειας της οπής ( $A_{nom}$ ) (σχήμα 2.23) . Η εξίσωση που το περιγράφει είναι η εξής:

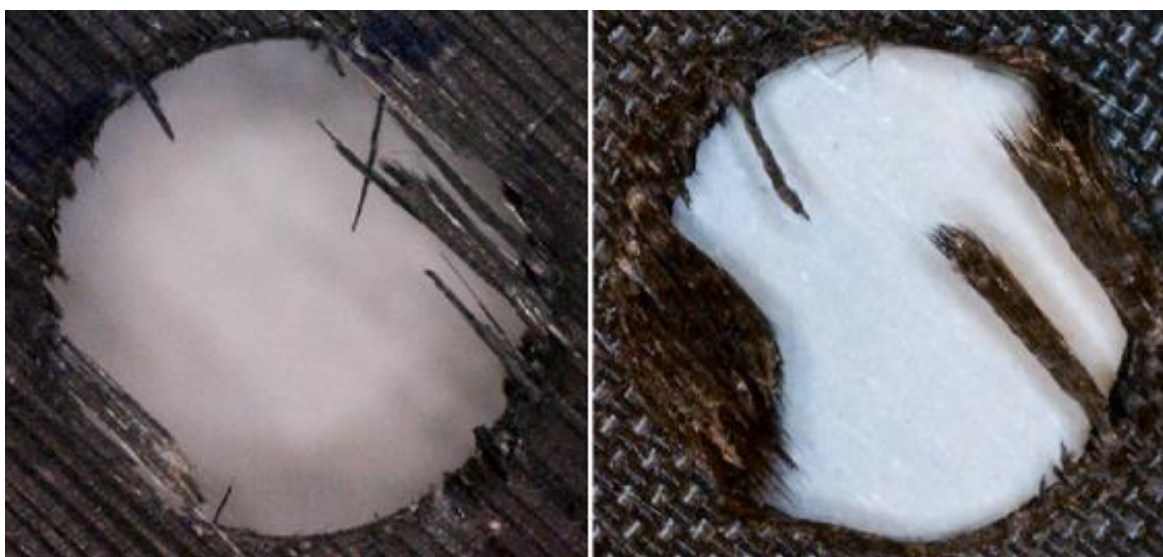
$$Fa = \frac{A_d}{A_{nom}} \quad (2.4)$$

Με αυτόν τον τρόπο ο συντελεστής αποκόλλησης μετράει με μεγαλύτερη διαστασιολογική ακρίβεια το ελάττωμα της διάτρησης.

## 2.6 Δημιουργία απόληξης (burr) κατά τη διάνοιξη οπής

### 2.6.1 Ορισμός και κατηγοριοποίηση απολήξεων

Ο σχηματισμός της απόληξης κατά τη διάτρηση είναι κάτι που συμβαίνει τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της οπής και αποτελεί πρόβλημα καθώς δημιουργούνται αποκλίσεις από την αναμενόμενη γεωμετρία της οπής. Αν και στα σύνθετα υλικά οι απολήξεις τείνουν να έχουν πολύ μικρές διαστάσεις σε αρκετές περιπτώσεις χρειάζεται επεξεργασία στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ώστε να προκύψουν οι απαιτούμενες ανοχές για τη συναρμογή, εξαιτίας και της χρήσης των συγκεκριμένων υλικών σε εφαρμογές υψηλών προδιαγραφών. Συνήθως η απόληξη δεν εξασθενεί τη δύναμη του υλικού αλλά δημιουργεί μικρορωγμές με κίνδυνο επέκτασής τους ή/και τη δημιουργία αποκόλλησης. Έτσι για να αποφευχθεί η περαιτέρω επεξεργασία του τεμαχίου αλλά και μελλοντικά προβλήματα είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο τρόπος που δημιουργούνται οι απολήξεις και ένα αποφευχθούν (σχήμα 2.34). [22]



Σχήμα 2.34. Απόληξη διάτρησης σε CFRP

Ως απόληξη ορίζεται μια μετρήσιμη ποσότητα επιπλέον υλικού, συγκριτικά με την ονομαστική διάμετρο της οπής, που εμφανίζεται στις άκρες της. Δημιουργείται κυρίως λόγω μη ιδανικών συνθηκών κοπής αλλά και με τον μηχανισμό αποκόλλησης που εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.1. Οι απολήξεις κατηγοριοποιούνται με βάση τη θέση τους, είσοδο ή έξοδο της οπής, με βάση τον τρόπο δημιουργίας τους και ανάλογα με τη γεωμετρία τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο του μηχανισμού κοπής όταν η κατεργασία συμβαίνει σε σύνθετο υλικό μονής κατεύθυνσης η απόληξη έχει συμμετρικά χαρακτηριστικά γύρω από την οπή και συνήθως βρίσκεται σε γωνία  $\theta=135^{\circ}\pm\delta$  σύμφωνα με τον Xu et al. [33]. Ο λόγος για αυτήν τη συμμετρική κατανομή είναι λόγω της συμμετρίας της γωνίας κοπής των ινών με έναν κύκλο 360 μοιρών. Τελευταίος τρόπος κατηγοριοποίησης είναι ανάλογα με το περιεχόμενο της απόληξης καθώς μπορεί να αποτελείται:

- μόνο από άκοπες ίνες καθώς συχνά το κοπτικό αφαιρεί τη ρητίνη από τις ίνες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται κατά την κοπή,
- μόνο από άκοπη ρητίνη, καθώς υπάρχουν συνθετικά τεμάχια τα οποία έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε ίνες,
- από έναν συνδυασμό των παραπάνω.

Τέλος αν και τις περισσότερες φορές η απόληξη δημιουργείται στη άκρη της οπής υπάρχουν και περιπτώσεις όπου λόγω ελλιπούς στήριξης του στρώσεων μεταξύ τους, λόγω κενών ανάμεσα στις στρώσεις (λόγω παγιδευμένων αερίων ή λόγω ελλιπούς πίεσης των στρώσεων μεταξύ τους ή λόγω περίπλοκης γεωμετρίας), μπορεί να δημιουργηθεί απόληξη ανάμεσα στις στρώσεις. [22]

### **2.6.2 Μηχανισμός δημιουργίας απολήξεων σύνθετων υλικών**

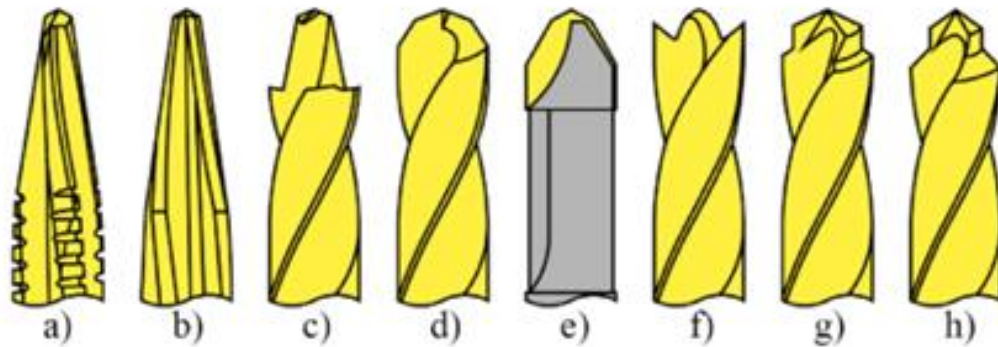
Η απόληξη στα ινοπλισμένα με άνθρακα συνθετικά υλικά δημιουργείται εάν το κοπτικό εργαλείο δεν μπορεί να αφαιρέσει το υλικό ως το θεωρητικό βάθος. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι η εξής:

- (I) Κατά τη διάτρηση οι στρώσεις του υλικού είναι ευάλωτες στον λυγισμό όταν δεν υπάρχει στήριξη από άλλες στρώσεις ή εξωτερικές συσκευές στήριξης. Αυτό συμβαίνει συχνότερα κατά την έξοδο του κοπτικού και έχει ως αποτέλεσμα η δύναμη κοπής να προκαλεί αποκόλληση τύπου I. Έτσι αυτή η αποκόλληση προκαλεί κάμψη στις τελευταίες στρώσεις του υλικού και με αυτόν τον τρόπο το κοπτικό κάμπτει αυτές τις στρώσεις και δημιουργείται απόληξη εξόδου.
- (II) Όταν η ακτίνα της κοπτικής ακμής του εργαλείου είναι μικρότερη από το θεωρητικό βάθος κοπής ο μηχανισμός αφαίρεσης αποβλίπτου γίνεται κυρίως μέσω σύνθλιψης και το μέγεθος της απόληξης είναι ελεγχόμενο. Εάν όμως είναι μεγαλύτερη (λόγω φθοράς) τότε το κοπτικό λυγίζει και συμπιέζει τις ίνες αντί να τις κόβει με αποτέλεσμα δημιουργείται επιπλέον απόληξη λόγω της αδυναμίας αφαίρεσης αποβλίπτου.
- (III) Όταν η γωνία κοπής όπως αναφέρθηκε κεφάλαιο μηχανισμό κοπής βρίσκεται σε μία ανεπιθύμητη γωνία, δηλαδή  $\theta=135^{\circ}\pm\delta$ , τότε το κοπτικό σπρώχνει και λυγίζει τις ίνες ελαστικά και έπειτα γυρίζουν στη θέση τους. Έτσι οι άκοπτες ίνες παραμένουν στο τεμάχιο και δημιουργούν παράλληλα τραχύτητα επιφάνειας.
- (IV) Παράγοντες όπως η γωνία κορυφής και η επιφάνεια επαφής ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο αυξάνουν τη θερμοκρασία και λόγω της συμπεριφοράς της ρητίνης πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία αυτή μαλακώνει με αποτέλεσμα το συνθετικό υλικό να λυγίζει, να ανοίγει και να γλιστράει από το κοπτικό ευκολότερα από ότι στη σκληρή του μορφή. Αυτό αποτρέπεται με ψύξη, αέρα ή μία ελάχιστη ποσότητα λιπαντικού (συμβατικού, ελάχιστη ποσότητας λίπανση, κρυογονική, νανορευστό). [22]

### **2.6.3 Παράγοντες ελαχιστοποίησης του σχηματισμού απόληξης**

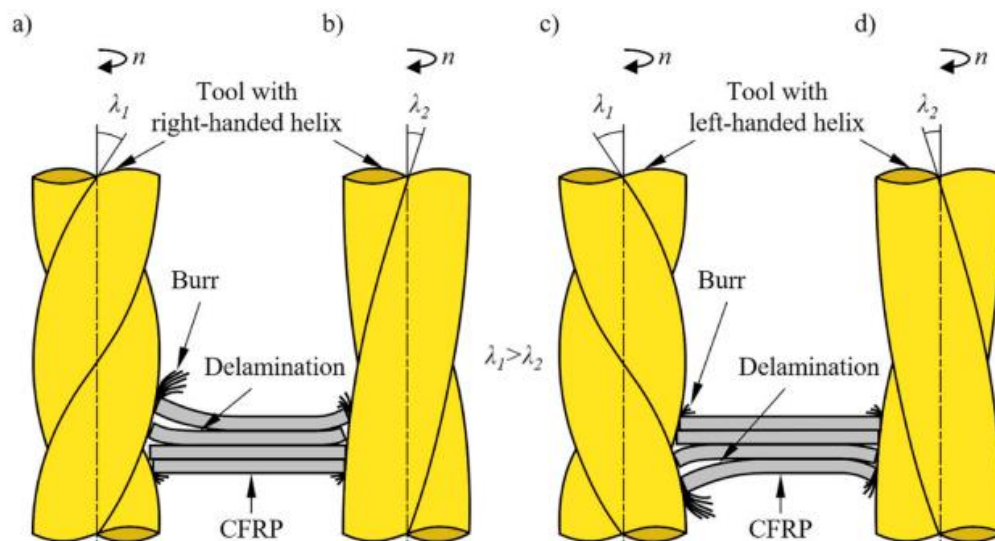
Κατά τον Xu [23] με βάση πειράματα που πραγματοποίησε ισχύει ότι η αύξηση της πρόωσης αυξάνει τον σχηματισμό απόληξης (όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η μεγαλύτερη πρόωση δημιουργεί μεγαλύτερη δύναμη ώθησης και αυξάνεται το πάχος του αποβλίπτου).

Όσον αφορά το υφάσματα μονής κατεύθυνσης σημαντικό ρόλο έχει η γωνία κοπής της ίνας όπως επίσης και η ακτίνα της κοπτικής ακμής. Επίσης συντελεστές όπως η στρατηγική κοπής όταν χρησιμοποιείται ελικοειδές φραιζάρισμα (up or down milling) και η ελικοειδής γωνία του κοπτικού και η γωνία αποβλίπτου επηρεάζουν σημαντικά τη δημιουργία απόληξης. Κατά τον Fei Su [24] και τον Robert Voss [25] η στρατηγική του up milling παράγει λιγότερες άκοπτες ίνες σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ελικοειδές φραιζάρισμα για τη διάτρηση οπής. Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει για την ελαχιστοποίηση της δημιουργίας απόληξης διάφορα κοπτικά εργαλεία που έχουν δημιουργηθεί για αυτήν την ανάγκη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.35. Διαφορετικά κοπτικά εργαλεία που ελαχιστοποιούν τη δημιουργία απόληξης και αποκόλλησης κατά τη διάτρηση

Κατά τον Geier [26] τα κοπτικά με μικρότερη γωνία έλικας  $\lambda$ , έχουν σημαντική επιρροή τόσο στον σχηματισμό απόληξης όσο και στην αποκόλληση. Όσο μικρότερη είναι η γωνία έλικας τόσο μικρότερη είναι η αξονική δύναμη που ασκείται κατά την κοπή. Στην ίδια μελέτη προέκυψε το συμπέρασμα ότι ένα κοπτικό εργαλείο που έχει δεξιά κατεύθυνση έλικας ξεφλουδίζει τις στρώσεις του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργείται κυρίως απόληξη εισόδου και λιγότερο εξόδου. Αντίθετα ένα κοπτικό εργαλείο με αριστερή κατεύθυνση έλικας σπρώχνει τις στρώσεις του υλικού προς τα κάτω με αποτέλεσμα να μειώνεται ο σχηματισμός απόληξης εισόδου και να αυξάνεται η απόληξη εξόδου (σχήμα 2.36).



Σχήμα 2.36. Επιρροή της γωνίας έλικας του κοπτικού στη δημιουργία απόληξης

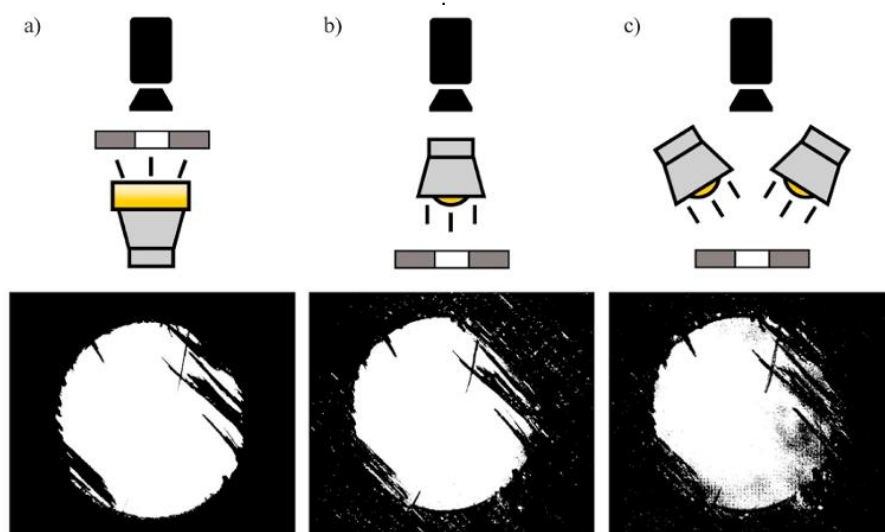
#### 2.6.4 Μέθοδοι μέτρησης της απόληξης διάτρησης

Αντίθετα με τα ομογενή υλικά που η μέτρηση της απόληξης μπορεί να γίνει με μεταλλογραφική διατομή της οπής, στα σύνθετα υλικά αυτό είναι αδύνατο λόγω των μικρών διαστάσεων της απόληξης. Έτσι οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν μόνο με μεθόδους που δεν θα καταστρέφουν την οπή. Ο πιο σύνθετος τρόπος είναι με οπτικά μέσα όπως μικροσκόπια και ψηφιακές κάμερες. Με χρήση διαφόρων αλγορίθμων ψηφιακής ανάλυσης της εικόνας, όπως προσαρμογή της εικόνας (π.χ. αλλαγή μεγέθους, κοπή, περιστροφή, διόρθωση αντίθεσης, τμηματοποίηση εικονοστοιχείων) ή με αλγορίθμους που μετράνε και συγκρίνουν τον αριθμό των pixels στην εικόνα βάση μίας ονομαστικής τιμής που αναμένεται να είναι το ονομαστικό μέγεθος της οπής, μπορεί να μετρηθεί το μέγεθος της απόληξης.



Παράλληλα τέτοιοι αλγόριθμοι μπορούν να συνδεθούν με αλγόριθμους που εντοπίζουν το περίγραμμα της διάτρησης διαχωρίζοντας τα pixels του υλικού από το φόντο. Έτσι εύκολα ο αλγόριθμος ορίζει την ακριβή επιφάνεια της απόληξης. Τέτοιοι αλγόριθμοι επηρεάζονται δραματικά από την ποιότητα της εικόνας (ευκρίνεια της κάμερας) αλλά και από τις συνθήκες φωτισμού που υπάρχουν. Η λύση σε αυτό δίνεται χρησιμοποιώντας επιπλέον φωτισμό για να είναι πιο εμφανής η απόληξη.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.37 η καλύτερη ποιότητα εικόνας λαμβάνεται έχοντας φωτισμό στην αντίθετη κατεύθυνση από το τεμάχιο και την κάμερα.



Σχήμα 2.37. Παραδείγματα φωτισμού για την ακριβέστερη μέτρηση της απόληξης

Για τη μέτρηση του ύψους της απόληξης ο Sugita [27] χρησιμοποίησε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Στη συγκεκριμένη έρευνα μετρήθηκαν 4600 σπές με τη χρήση ενός συμβατικού CMM και βρέθηκε μέγιστο ύψος διάτρησης 80μm. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για να μετρηθούν σωστά οι διάφορες άκοπες ίνες, είναι σημαντικό η δύναμη ενεργοποίησης του CMM να είναι πολύ χαμηλή, σε εύρος 0.5mN-5mN, ειδικά ελλοχεύει ο κίνδυνος να κάμψει η βελόνα του μετρητικού τις ίνες και να μην είναι ακριβείς οι μετρήσεις. CMM μηχανές με αυτά τα χαρακτηριστικά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμα σε έρευνες σύνθετων υλικών. Συνδέοντας μεταξύ τους τις μετρήσεις δημιουργείται η τρισδιάστατη απεικόνιση της απόληξης. Η ακρίβεια στη συγκεκριμένη τεχνική επηρεάζεται από τη δύναμη ενεργοποίησης του CMM αλλά και από το μέγεθος της ακμής του μετρητικού εργαλείου (probe head).

Για τη δημιουργία τοπογραφικού χάρτη της απόληξης του CFRP χρησιμοποιείται η τεχνική της συνεστιακής μικροσκοπίας με χρήση της τεχνολογίας laser scanning. Όμως απαιτείται πολύς χρόνος για τη μέτρηση της επιφάνειας. [28]

Ερευνητές επίσης έχουν χρησιμοποιήσει μηχανήματα με ακτίνες X (αξονική τομογραφία) για τη χαρτογράφηση της απόληξης. Με αυτήν τη μέθοδο μπορούν να βρεθούν ελαττώματα και μέσα στην απόληξη. Όμως ο εξοπλισμός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι πολύ ακριβός και εάν το πάχος του δείγματος είναι μεγάλο ενδέχεται να μην μπορεί να μετρηθεί. [29]



### 2.6.5 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης της απόληξης διάτρησης

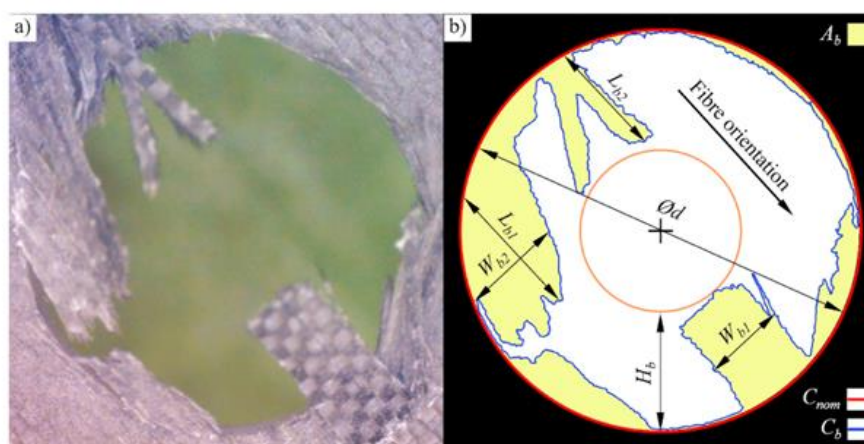
Στα ομογενή υλικά τα χαρακτηριστικά που αξιολογούνται για να κριθεί αν μία απόληξη διάτρησης είναι στα αποδεκτά επίπεδα είναι τυποποιημένα, λόγω της πολυετούς εμπειρίας που υπάρχει από τους ερευνητές για αυτά τα υλικά. Αντίθετα για τα σύνθετα υλικά δεν υπάρχουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά, λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων της απόληξης διάτρησης και έτσι οι ερευνητές χρησιμοποιούν διάφορα χαρακτηριστικά για να αξιολογήσουν το μέγεθος της απόληξης.

#### Απλή οπτική ανάλυση

Σε μερικές περιπτώσεις δεν χρειάζονται περίπλοκοι υπολογισμοί και αλγόριθμοι για την αξιολόγηση μίας απόληξης λόγω της εφαρμογής της (δεν απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια). Σε αυτές τις περιπτώσεις η αξιολόγηση γίνεται με τα εξής χαρακτηριστικά: οπτική εκτίμηση της διάτρησης και αρίθμηση της απόληξης (των κομματιών που παρέμειναν άκοττα). Οι παραπάνω μέθοδοι χρειάζονται μικροσκόπιο ή ακτίνες X για την εφαρμογή τους και τις χαρακτηρίζει η ταχύτητα με την οποία γίνεται η μέτρηση. Έχουν περιορισμένη και υποκειμενική ακρίβεια. [30]

#### Μετρήσεις βάση μήκους

Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και βιομηχανικό περιβάλλον. Με χρήση οπτικού μικροσκοπίου ή ψηφιακής κάμερας, το σχήμα που προκύπτει αναλύεται από κάποιον αλγόριθμο επεξεργασίας εικόνας και γίνονται μετρήσεις των χαρακτηριστικών της απόληξης. Χρησιμοποιείται για να εκτιμηθούν οι απολήξεις όταν το τεμάχιο αποτελεί μέρος κυρίως μίας συναρμογής και έτσι μπορεί να βοηθήσει στις αποφάσεις που σχετίζονται με την ποιότητα ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος είναι το μήκος της απόληξης  $L_b$ , το ύψος της απόληξης στο επίπεδο XY, το ύψος της απόληξης στον άξονα Z, το πλάτος της απόληξης  $W_b$  και ο συντελεστής περιγράμματος της απόληξης  $F_{bc}$ . [22]



Σχήμα 2.38. Στα αριστερά φαίνεται η απόληξη διάτρησης και δεξιά τα στοιχεία που θα μετρηθούν για να εκτιμηθεί το μέγεθος της

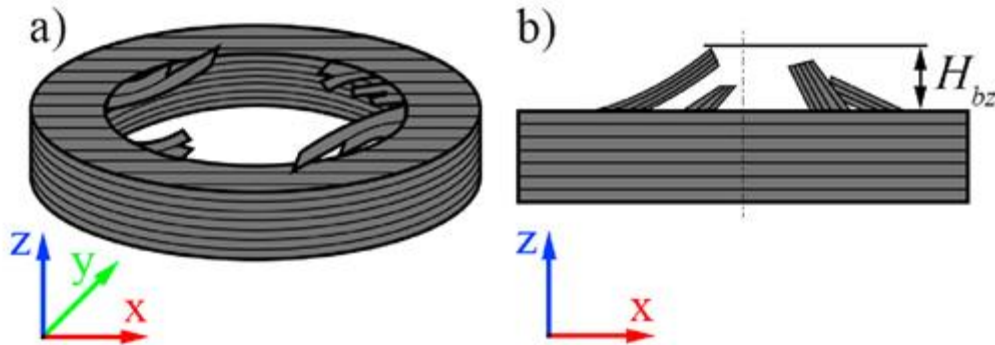
Το μήκος απόληξης  $L_b$  ορίζεται ως η μέγιστη γραμμική απόσταση προσανατολισμένη στη ίνα μεταξύ της αρχής της απόληξης και το τέλος της όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.38](#), και ως μέσο μήκος απόληξης ορίζεται με την εξίσωση :

$$L_b = (L_{bi}), i = 1 \dots n \quad (2.5)$$

$$Lb = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Lbi \quad (2.6)$$

Το ύψος της απόληξης στο επίπεδο XY Hb ορίζεται ως η μέγιστη ακτινική απόσταση μεταξύ του άκρου της απόληξης και του θεωρητικού άκρου της οπής.

Το ύψος της απόληξης στον άξονα Z Hbz ορίζεται ως το ύψος από την κορυφή του τεμαχίου ως το τέλος της απόληξης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.39. [22]



Σχήμα 2.39. Αναπαράσταση μέτρησης απόληξης στον άξονα Z

Ως πλάτος Wb της απόληξης ορίζεται η απόσταση μεταξύ των πλευρικών άκρων του άκοππου υλικού όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.28. Όμως λόγω της ασυνέπειας στο πλάτος της απόληξης, το κάθε πλάτος άκοππου υλικού πρέπει να μετριέται αυτοτελώς για να καθορισθεί το μέγεθός τους, όπως στο σχήμα 2.28 που υπάρχουν δύο διαφορετικά Wbi, i=1,2.

Τέλος ο συντελεστής περιγράμματος της απόληξης Fbc συγκρίνει το μήκος του περιγράμματος της κατεργασμένης γεωμετρίας (Cb) και την περίμετρο της ονομαστικής γεωμετρίας (Cnom). Ο συντελεστής Fbc περιγράφεται από την εξίσωση:

$$Fbc = \frac{Cb - Cnom}{Cnom} \times 100 \quad (2.7)$$

### Μετρήσεις με βάση το εμβαδό

Οι μετρήσεις απόληξης με βάση το εμβαδό δίνουν δισδιάστατες πληροφορίες και συγκριτικά με τις μετρήσεις βάσει μήκους περιγράφουν πληρέστερα τη γεωμετρία της απόληξης αναφορικά με το μέγεθός της. Όμως δεν δίνουν πληροφορίες για τη θέση και την κατεύθυνση που έχει δημιουργηθεί η απόληξη. Τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος είναι το εμβαδό της απόληξης Ab, ο συντελεστής της επιφάνειας με απόληξη Fb και ο συντελεστής επιφάνειας χωρίς απόληξη Fbf (ή χωρίς υλικό).

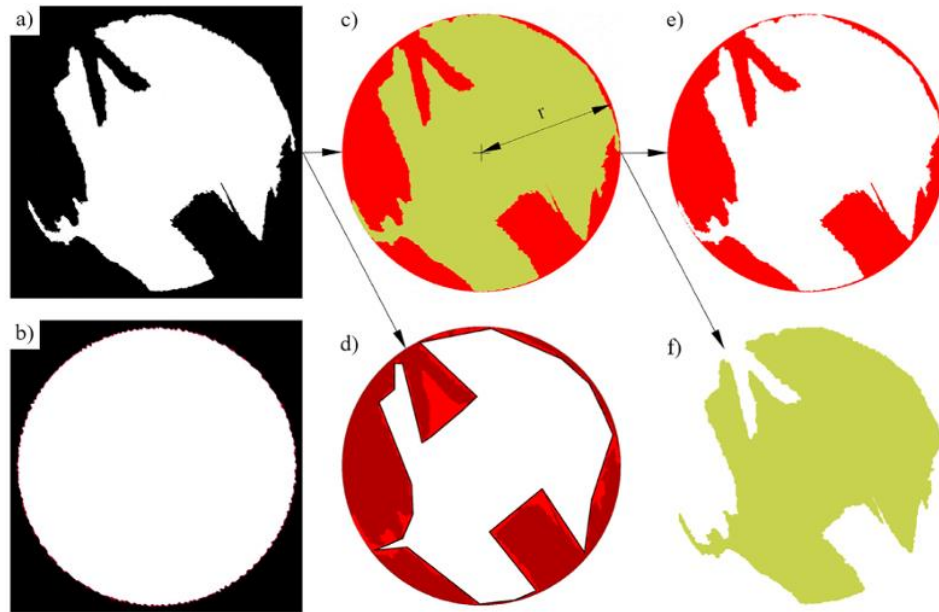
Αρχικά το εμβαδό της απόληξης Ab μετριέται με τη χρήση αλγορίθμου μέτρησης pixel που μετράει την επιφάνεια της απόληξης (σχήμα 2.40(e)). Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι μεγαλύτερη τιμή Ab δεν συνεπάγεται πάντα και χειρότερη ποιότητα κατεργασμένης οπής καθώς μία οπή μεγαλύτερης διαμέτρου αναμένεται να έχει και μεγαλύτερη απόληξη. Ως σύμπλεγμα (group) εμβαδού απόληξης Abg ορίζεται η απόληξη με ομαδοποιημένες και τις ακμές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και σε αυτό διαφέρει και με την τιμή Ab (σχήμα 2.40(d)). Η μέτρηση γίνεται με τον ίδιο τρόπο. [22]

Ο συντελεστής της επιφάνειας με απόληξη  $F_b$  είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος μέτρησης απόληξης καθώς συγκρίνει την έκταση της απόληξης της οπής με την ιδανική έκταση της κατεργασμένης οπής (σχήμα 2.40(c)). Η εξίσωση που την περιγράφει είναι η ακόλουθη:

$$F_b = \frac{A_{nom} - A_{free}}{A_{nom}} \times 100 = \frac{A_b}{A_{nom}} \times 100 \quad (2.8)$$

όπου  $A_{free}$  είναι η επιφάνεια που δεν έχει καθόλου υλικό και  $A_{nom}$  είναι η ονομαστική διάμετρος της οπής.

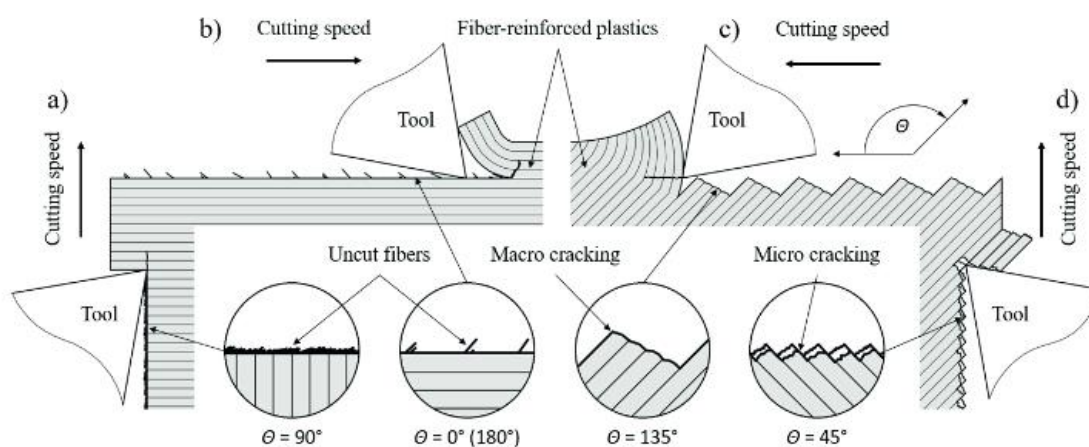
Τέλος συντελεστής επιφάνειας χωρίς απόληξη  $F_b$  είναι η τιμή που προκύπτει συγκρίνοντας τα pixels της επιφάνειάς της που δεν έχει άκοπο υλικό με την ονομαστική τιμή της διαμέτρου της οπής (σχήμα 2.40(f)). Η βασική διαφορά και πλεονέκτημα με τον συντελεστή επιφάνειας  $F_b$  είναι ότι με αυτήν τη μέθοδο μετριοούνται τα λευκά pixels αντί για τα μαύρα, γεγονός που κάνει ευκολότερο τον αλγόριθμο καθώς για τη μέτρηση των μαύρων pixels πρέπει πρώτα αυτά να απομονωθούν από το υπόλοιπο τεμάχιο του CFRP. [22]



Σχήμα 2.40. Αναπαράσταση της εξέλιξης μέτρησης της απόληξης με βάση το εμβαδό

## 2.7 Τραχύτητα εσωτερικής επιφάνειας και εσωτερικές κενώσεις (cavities) της οπής

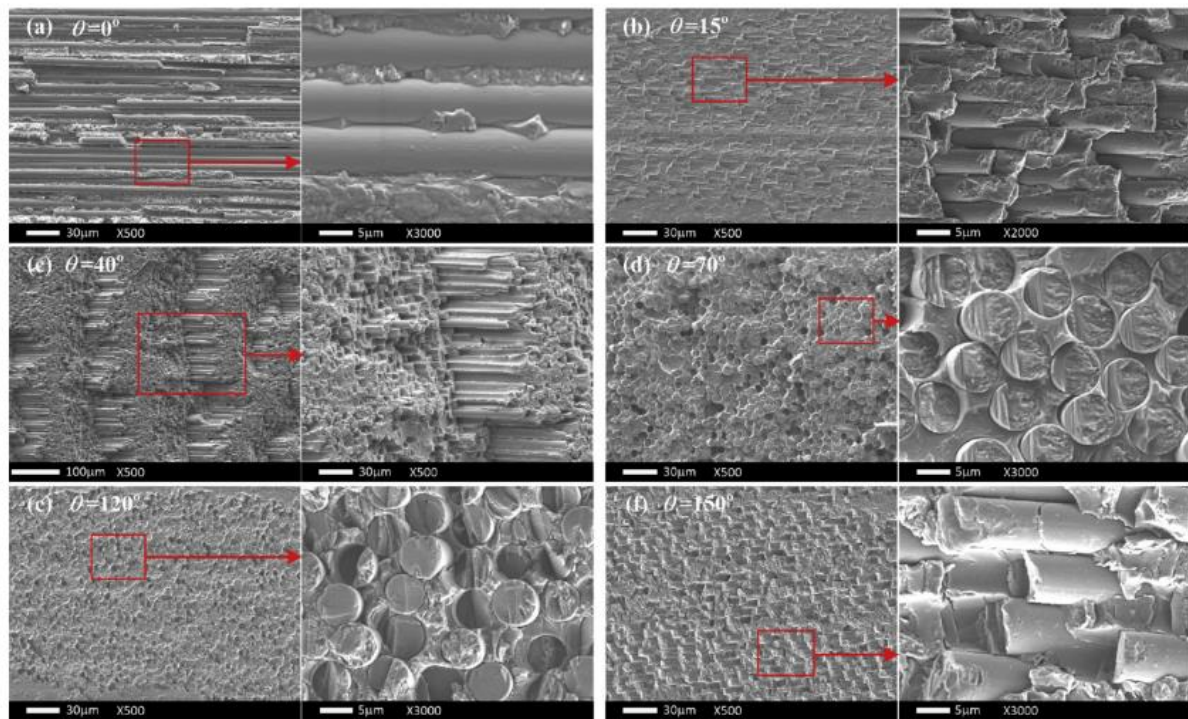
Όπως και στη δημιουργία απόληξης διάτρησης έτσι και στην τραχύτητα της επιφάνειας της οπής σημαντικό ρόλο έχει η γωνία κατεύθυνσης της ίνας καθώς ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει το κοπτικό με το υλικό αλλάζει και ο μηχανισμός κοπής και αφαίρεσης αποβλήτου, όπως εξηγήθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Κατά τον Geier [31] όταν η γωνία κοπή της ίνας είναι  $\theta=90^\circ \pm \delta$  η επιφάνεια που δημιουργείται συνήθως είναι λεία και χωρίς άκοπες ίνες. Στη γωνία  $\theta=0^\circ \pm \delta$  η αναμενόμενη επιφάνεια είναι πάλι λεία και με πολύ λίγες άκοπες ίνες (σχήμα 2.41). Στη γωνία  $\theta=135^\circ \pm \delta$  η επιφάνεια που δημιουργείται είναι τραχιά λόγω του μηχανισμού κοπής που υπάρχει σε εκείνες τις μοίρες, καθώς κάποιες φορές οι ίνες κόβονται πιο βαθιά από το ονομαστικό τους βάθος. Τέλος στην περίπτωση της  $\theta=45^\circ \pm \delta$  δημιουργούνται μικρορωγμές κάτω από το ονομαστικό βάθος κοπής και αυτές οι ρωγμές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την τραχύτητα της επιφάνειας.



Σχήμα 2.41. Τραχύτητα επιφάνειας της οπής ανάλογα με τη γωνία κοπής των ινών

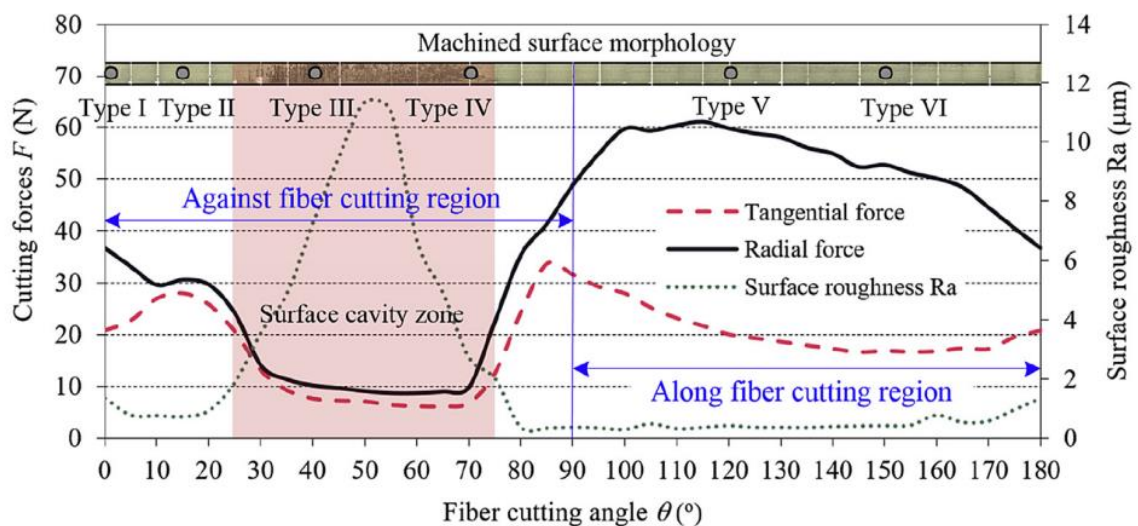
Κατά τον Wang [32] έχουν παρατηρηθεί έξι τυπικές μορφολογίες επιφάνειας κατεργασμένου CFRP μονής κατεύθυνσης. Οι διαφορετικές μορφολογίες προκύπτουν όπως και στην τραχύτητα της επιφάνειας λόγω του εκάστοτε μηχανισμού κοπής (σχήμα 2.42).





Σχήμα 2.42. Τυπικές μορφολογίες της επιφάνειας μετά από κατεργασία

Στη συγκεκριμένη μελέτη τονίζεται ότι συναντώνται κενώσεις στην επιφάνεια κυρίως στη μορφολογία τύπου 3, γεγονός που αποδίδεται στο ότι οι ίνες έχουν κατεύθυνση αντίθετη με τη φορά κίνησης του κοπτικού εργαλείου (σχήμα 2.42). Αυτές οι κενώσεις προφανώς και αυξάνουν την τραχύτητα της επιφάνειας.

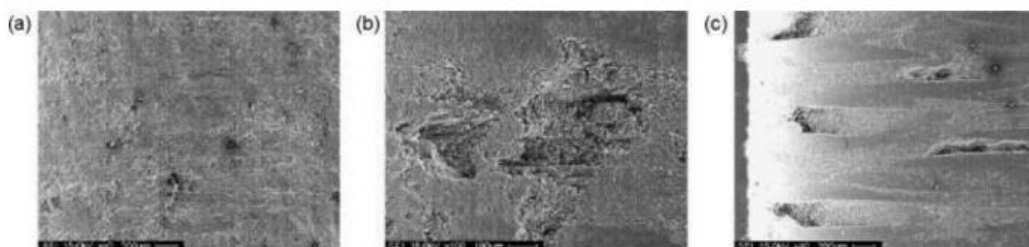


Σχήμα 2.43. Διάγραμμα που παρουσιάζει την περιοχή που βρίσκονται κενώσεις, γενική τραχύτητα και δυνάμεις ανάλογα με τη γωνία κοπής των ινών

## 2.8 Προβλήματα λόγω θερμότητας

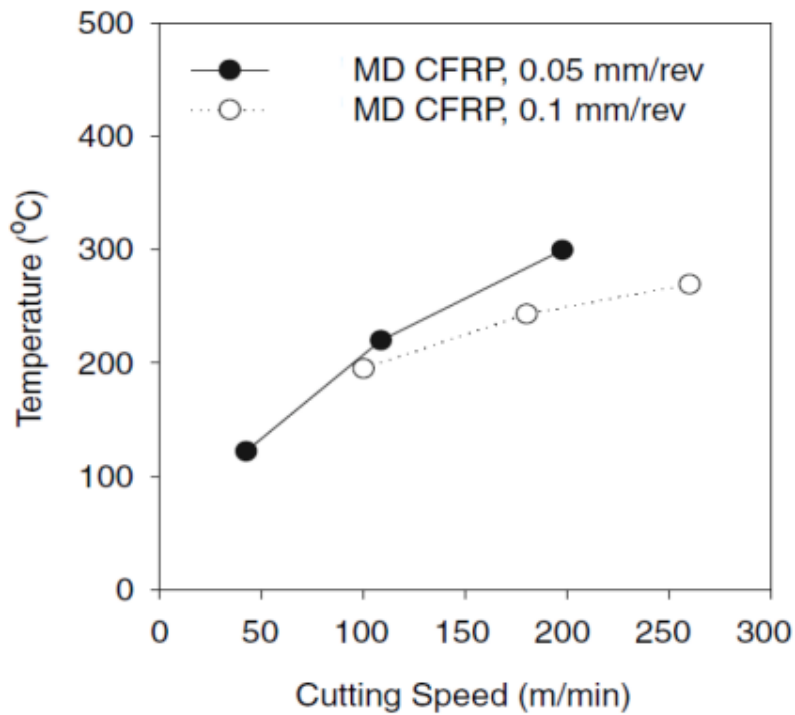
Η θερμική συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς ανθρακονήματος είναι άλλη μία σημαντική διάσταση στη διαδικασία κοπής τους. Το πλαστικό μέρος του σύνθετου υλικού είναι συνήθως κάποια εποξική ρητίνη ή κάποιο πολυμερές υλικό που η θερμική του αντοχή δεν είναι πολύ μεγάλη. Έτσι όταν η θερμοκρασία κατά την κοπή αυξάνεται πάνω από τη θερμοκρασία που αντέχει το πολυμερές, υφίσταται χημική αποικοδόμηση και από κατάσταση σκληρού γυαλιού περνάει σε μία κατάσταση όπου γίνεται ελαστικό και μαλακό, χάνονται οι ιδιότητές του ταχύτητα. Αυτή η θερμοκρασία είναι ακριβώς πριν τη θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού (glass transition temperature)  $T_g$ . Το πλαστικό μαλακώνει περισσότερο όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία πέρα από την  $T_g$  μέχρι που μπορεί να αποσυντεθεί καταστρέφοντας το τεμάχιο.

Οι υψηλές θερμοκρασίες κοπής κατά τη διάτρηση CFRP προκύπτουν λόγω των συνθηκών κοπής που επιλέγονται. Θέλοντας να ελαχιστοποιηθεί η αποκόλληση και ο σχηματισμός απόληξης διάτρησης χρησιμοποιούνται ταχύτητες κοπής και μικρές προώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μέσω της συνεχούς τριβής μεταξύ κοπτικού και τεμαχίου, τη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών ανάμεσα στο τοίχωμα της οπής και την ακμή του κοπτικού εργαλείου. Αντίθετα με την κατεργασία μεταλλικών τεμαχίων, όπου η μείωση θερμοκρασίας κατά την κοπή γίνεται μέσω της αποβολής αποβλίπτου, στα σύνθετα υλικά η θερμοκρασία αφαιρείται κυρίως μέσω του κοπτικού εργαλείου και του αντικειμένου. Να σημειωθεί ότι τα CFRP έχουν πολύ κακή θερμική αγωγιμότητα. Έτσι η επιφανειακή υποβάθμιση τείνει να συμβαίνει σε υψηλή θερμοκρασία λόγω του ανόμοιου συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ της μήτρας (πλαστικού μέρους) και των ινών. Παρακάτω στο [σχήμα 2.44](#) σε εικόνες με χρήση SEM (Scanning Electron Microscopy) φαίνεται ότι η καύση της μήτρας και η εξαγωγή ινών (fiber pull-out) σε θερμοκρασία κοπής μεγαλύτερη από 300° C.



Σχήμα 2.44. Φωτογραφίες μέσω SEM που παρουσιάζουν τα πιο συχνά προβλήματα λόγω θερμοκρασίας όπως καμένη μήτρα αποκομμένες ίνες

Οι Chen [33] και Weinert [34] διερεύνησαν την επίδραση των παραμέτρων διάτρησης (ταχύτητα κοπής και πρόωση) στη θερμοκρασία που παράγεται στην επιφάνεια της κύριας κόπης του κοπτικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο [σχήμα 2.45](#) φαίνεται ξεκάθαρα ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής και η μείωση της πρόωσης ανεβάζουν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του κοπτικού όπως είναι αναμενόμενο.



Σχήμα 2.45. Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας με ταχύτητα κοπής σε διάφορες συνθήκες κοπής

Θέλοντας να επιτευχθούν οι βέλτιστες θερμοκρασιακές συνθήκες κατά την κοπή, το τρυπάνι με επικάλυψη διαμαντιού ή άνθρακα-διαμαντιού (DLC) θα είναι μια καλή επιλογή λόγω της εξαιρετικής διαχείρισης του θερμικού φορτίου και της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Χρησιμοποιώντας τρυπάνι με επίστρωση διαμαντιού ή PCD σε υψηλή ταχύτητα κοπής, το στρώμα διαμαντιού λειτουργεί ως φράγμα ενάντια στη θερμοκρασία και απομακρύνει τη θερμότητα αποτελεσματικά από την περιοχή διάτρησης. Επιπλέον, οι παράμετροι κοπής πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για να επιτευχθεί καλή ισορροπία μεταξύ ελάχιστης αποκόλλησης και θερμικής βλάβης.



### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Τα πειράματα καθώς και οι ιδιοσκευές που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες του πειράματος δημιουργήθηκαν εντός του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, χρησιμοποιώντας τις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές που διαθέτει το συγκεκριμένο εργαστήριο. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

##### **Κέντρο κατεργασίας CNC Dmg Mori DMU 50 eco**

Η εργαλειομηχανή DMU 50 eco (σχήμα 3.1) είναι 3+2 αξόνων έχοντας τη δυνατότητα μεταφορικής κίνησης της ατράκτου στους τρεις άξονες X, Y, Z και περιστροφικής κίνησης του τραπεζιού στους άξονες Y και Z. Η άτράκτος μπορεί να τοποθετηθεί σε σημεία με ακρίβεια 2μm, έχει μέγιστη περιστροφική ταχύτητα έως 8000rpm και μέγιστη ταχύτητα μετακίνησης 12m/min. Έχοντας διαθέσιμους τους δύο άξονες περιστροφής του τραπεζιού είναι εφικτή η κατεργασία τεμαχίων με περίπλοκη γεωμετρία. Έπειτα έχοντας 16 θέσεις για εργαλεία καθίσταται δυνατή η αυτόματη και ταχεία αλλαγή εργαλείων. Η απαραίτητη λίπανση και ψύξη κατά την κοπή παρέχεται από το σύστημα παροχής και ανακύκλωσης ψυκτικού υγρού της εργαλειομηχανής. Τέλος ο έλεγχος της φραϊζας γίνεται μέσω του λογισμικού Siemens Sinumerik 810D το οποίο έχοντας εγκατεστημένο το λογισμικό ShopMill επιτρέπει τον προγραμματισμό και την προσομοίωση της κατεργασίας.



Σχήμα 3.1. Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco

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

Το CNC Laser engraving Lasertec 40 (σχήμα 3.2) είναι ένα ψηφιακά καθοδηγούμενο κέντρο χάραξης 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων. Η χάραξη γίνεται εφικτή μέσω ενός παλμικού laser με ισχύ 20Watt. Η καμπίνα του χώρου εργασίας είναι προστατευμένη και διαθέτει σύστημα απορρόφησης των αερίων που παράγονται, ενώ έχει και παράθυρο ασφαλείας για να μειώνεται η έκθεση του χειριστή στο laser. Το σύστημα ελέγχου CNC με λογισμικό προγραμματισμού και δυνατότητα εισαγωγής αρχείων .stl και .dxf, προσφέρει ευελιξία σε πολύπλοκες γεωμετρίες και έχει την ικανότητα επίτευξης χαράξεων πολύ υψηλής ακρίβειας. Στο Lasertec 40 είναι δυνατή η κατεργασία διαφόρων υλικών όπως αλουμίνιο, σκληροί χάλυβες, κ.λπ.



Σχήμα 3.2. Laser χάραξης Lasertec 40

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

Η MotionBLITZ EOS Mini 2 (σχήμα 3.3) είναι μία κάμερα υψηλής ταχύτητας η οποία έχει 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 Megapixels με καταγραφή έως και 523 καρέ ανά δευτερόλεπτο στη μέγιστη ανάλυση, 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.

### **Συσκευή προ-ρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco**

Η συσκευή προ-ρύθμισης εργαλείων DMG Microset (σχήμα 3.3) έχει τη δυνατότητα να προσεγγίσει το μήκος και την ακτίνα του κοπτικού εργαλείου με υψηλή ακρίβεια, ενώ παράλληλα καθιστά εύκολο τον εντοπισμό της φθοράς στις κοπτικές ακμές. Στη συσκευή είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Microvision II IT ενώ διαθέτει επίσης: 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.



Σχημα 3.3. Συσκευή προ-ρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 (αριστερά) και κάμερα υψηλής ταχύτητας MotionBLITZ EOS mini 2 (δεξιά)

#### **Κοπτικό εργαλείο Kennametal CBDB0600AXAS**

Πρόκειται για ένα κονδύλι ειδικά σχεδιασμένο για κατεργασίες σε ενισχυμένα με ανθρακόνημα πολυμερή (σχήμα 3.4). Συγκεκριμένα ενδείκνυται για κατεργασίες τύπου slotting, ramping και side milling. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε για ελικοειδές φραιζάρισμα για τη διάνοιξη οπών 10mm. Η διάμετρος του κοπτικού είναι 6mm, έχει 12 ελικοειδή αυλακώσεις και γωνία έλικας 15 μοίρες. Είναι κατασκευασμένο από καρβίδιο με επικάλυψη διαμαντιού, γεγονός που προσφέρει υψηλή σκληρότητα και ελάχιστη φθορά στις κοπτικές ακμές του.

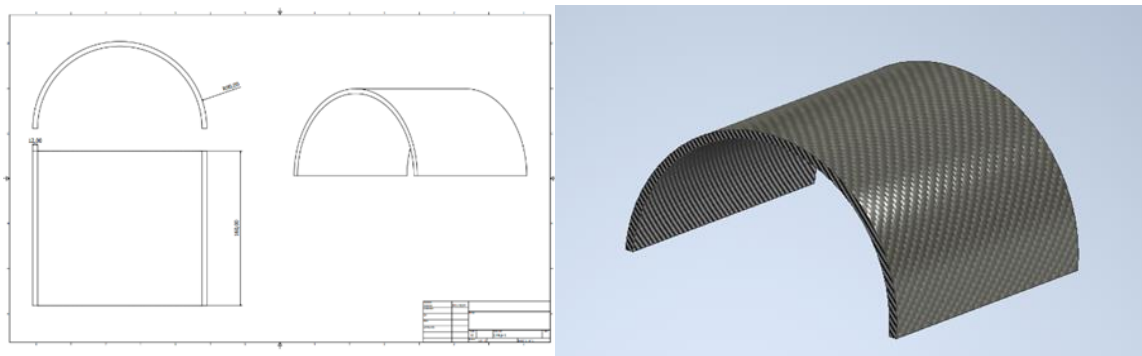


Σχήμα 3.4. Κονδύλι Kennametal CBDB0600AXAS

## 3.2 Σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας

### 3.2.1 Δοκίμια διάτρησης

Τα δοκίμια διάτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση των πειραμάτων προήλθαν από την εταιρεία B&T composites και προέρχονταν από σωλήνες CFRP κομμένους στη μέση. Τα δοκίμια αποτελούνταν από ημικύκλια διαμέτρου 170mm έως 200mm και πάχους από 10mm έως 14mm. Το τελικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα της εργασίας είναι 180mm διάμετρος και 8mm πάχους.



Σχήμα 3.5. Μηχανολογικό σχέδιο του δοκιμίου και 3D αναπαράσταση σε CAD

### 3.2.2 Σχεδίαση βάσης συγκράτησης δοκιμίων

Για τις ανάγκες του πειράματος σχεδιάστηκε μία βάση συγκράτησης των δοκιμίων όπου ο τρόπος λειτουργίας της περιγράφεται στη συναρμολογημένη και αποσυναρμολογημένη διάταξη στο [σχήμα 3.5](#). Η βάση κατασκευάστηκε με βάση την απαίτηση για παρακολούθηση της κατεργασίας του τεμαχίου από την κάμερα υψηλής ταχύτητας, ο φακός της οποίας βρίσκεται κάθετα τοποθετημένος στην επιφάνεια εξόδου του δοκιμίου. Με βάση αυτόν τον περιορισμό και τη σταθερή θέση του κοπτικού εργαλείου στον κάθετο άξονα Z η βάση διαμορφώθηκε έτσι ώστε:

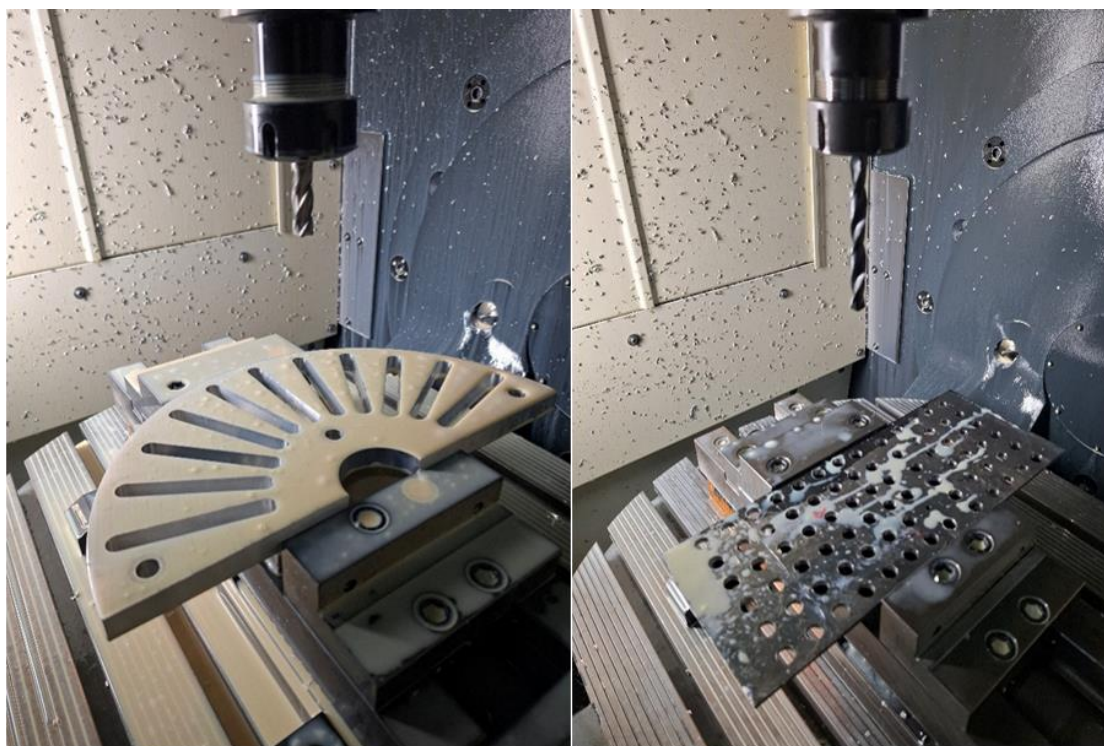
- το κοπτικό εργαλείο να διεισδύει πάντα κάθετα στο δοκίμιο δεδομένων των περιορισμών που προκύπτουν,
- να υπάρχει ο απαραίτητος φωτισμός για την καταγραφή της κατεργασίας με την κάμερα,
- να είναι δυνατή η περιστροφή του δοκιμίου στον κάθετο προς το τραπέζι άξονα με δεδομένες μοίρες περιστροφής,
- να είναι σταθερό το δοκίμιο κατά την κατεργασία και χωρίς να συμπιέζεται ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του πειράματος ([σχήμα 3.6](#) και [σχήμα 3.7](#)).



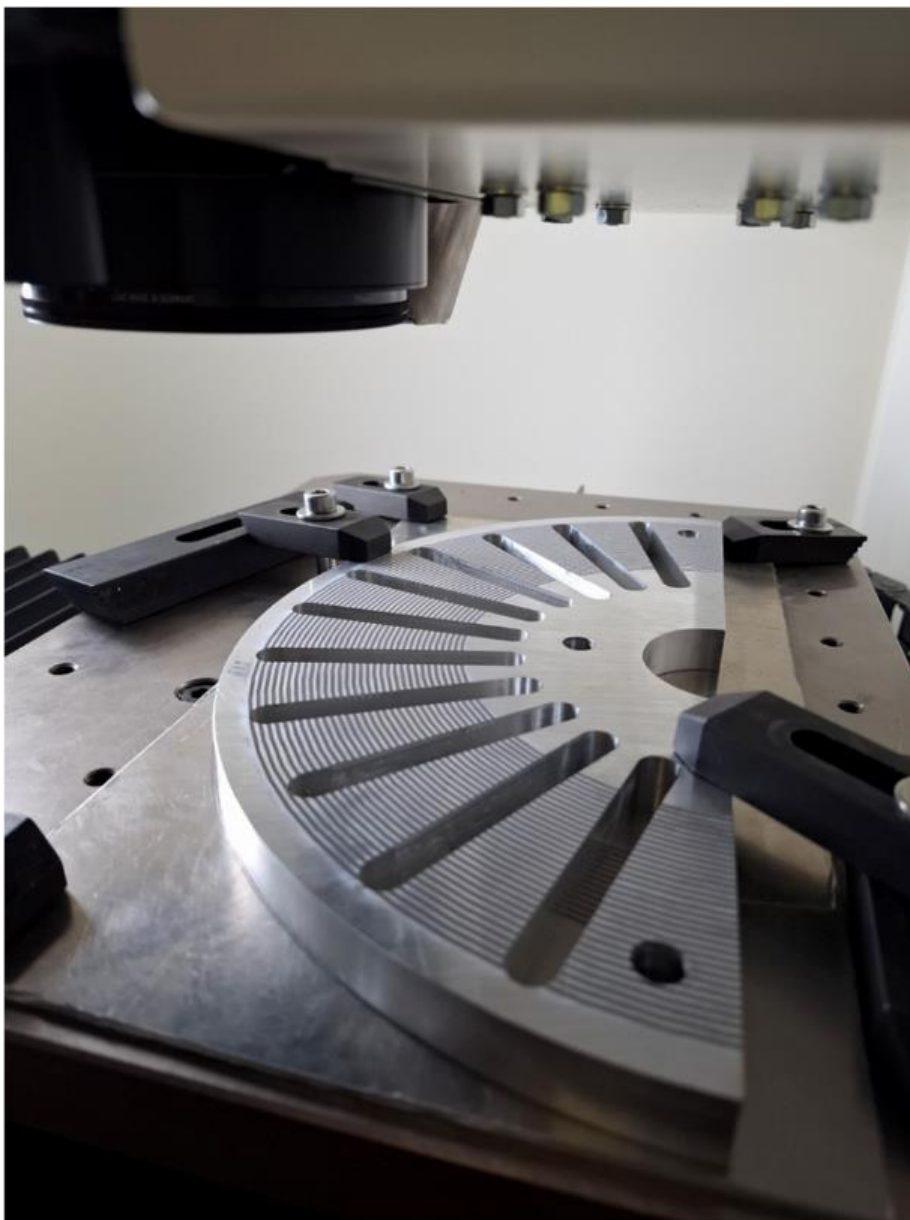


### 3.2.3 Κατασκευή της βάσης συγκράτησης δοκιμών

Η κατασκευή της βάσης πραγματοποιήθηκε στο κέντρο κατεργασίας του εργαστηρίου και ο προγραμματισμός του κώδικα πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Inventor CAM, όπου πραγματοποιήθηκε φραιζάρισμα των διαμπερών αυλακιών και η διάνοιξη των οπών για τη σύνδεση της βάσης με το τραπέζι της εργαλειομηχανής. Η χάραξη των ημικυκλίων πραγματοποιήθηκε στο laser engraving όπου έχουν συνολικό βάθος 2μm. Η πλάκα πίεσης που κρατάει το κομμάτι ακίνητο στη βάση κατεργάστηκε στη ίδια εργαλειομηχανή, με τον μεγάλο αριθμό οπών να επιτρέπουν την ευελιξία στα σημεία σύσφιξης του δοκιμίου (σχήμα 3.8 και σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8. Κατεργασία φραιζαρίσματος στη βάση συγκράτησης (αριστερά) και διάτρηση βάσης πίεσης (δεξιά)



Σχήμα 3.9. Βάση συγκράτησης μετά το πέρας όλων των κατεργασιών



### 3.2.4 Βάση συγκράτησης κάμερας υψηλής ταχύτητας

Για τις ανάγκες του πειράματος χρειάστηκε να κατασκευαστεί ακόμα μία βάση σκοπός της οποίας είναι να κρατάει την κάμερα υψηλής ταχύτητας κάθετα στην περιοχή της διάτρησης ώστε να καταγράφεται η κατεργασία.



Σχήμα 3.10. Ηλεκτρονικός Υψομετρικός χαράκτης

Η βάση στηρίζεται πάνω σε έναν υψομετρικό χαράκτη. Ο χαράκτης χρησιμοποιήθηκε για να είναι εφικτός ο εντοπισμός της επόμενης περιοχής διάτρησης με το κέντρο του φακού της κάμερας. Έτσι γνωρίζοντας τη θέση της προηγούμενης οπής, μετακινείται το κοπτικό εργαλείο μόνο στον Χ άξονα για μία δεδομένη απόσταση, αντιγράφοντας την κίνηση αυτή με τον υψομετρικό χαράκτη, ενώ η κάμερα παραμένει κεντραρισμένη στην περιοχή της επόμενης διάτρησης. Ο χαράκτης στηρίζεται πάνω στο τραπέζι με μία πλάκα πίεσης για να μην μπορεί να μετακινηθεί όταν το τραπέζι βρίσκεται στις 90 μοίρες. Η συναρμογή αποτελείται από 4 συνολικά πλακάκια συγκράτησης, ένα για τον χαράκτη στο τραπέζι, 2 για τη συγκράτηση της βάσης στον χαράκτη και 1 για να πιέζει την κάμερα στη βάση και να μην είναι εφικτό να πέσει από τη βάση όταν η συναρμολόγηση βρίσκεται σε κάθετη

γωνία. Η ιδιοκατασκευή συγκρατείται με τη χρήση κοχλιοσύνδεσης που αποτελείται από ντίζες 10mm και αντίστοιχα M10 παξιμάδια (σχήμα 3.10). Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα τεμάχια που επιτρέπουν την κίνηση της κάμερας κατά τον Χ άξονα μέσω του χαράκτη, το τεμάχιο που πιέζει την κάμερα για να είναι σταθερή, καθώς και τη συναρμολόγησή τους.



Σχήμα 3.11. Αριστερά τα πλακάκια που χρησιμοποιήθηκαν για τη βάση συγκράτησης και δεξιά η συναρμολόγησή της

Στην αριστερή εικόνα του παραπάνω σχήματος η αυλάκωση στο πάνω πλακάκι, έχοντας ακριβώς το ίδιο πλάτος με την κάμερα υψηλής ταχύτητας, εξασφαλίζει ότι η κάμερα θα βρίσκεται πάντα σε κάθετη θέση ως προς τον χαρακτή και συνεπώς θα καταγράφει την κατεργασία έχοντας μηδενική κλίση. Η αυλάκωση στα επόμενα δύο πλακάκια διασφαλίζει την ακρίβεια της θέσης που βρίσκεται η κάμερα στον Χ άξονα καθώς έχουν το ίδιο πλάτος με τον χαρακτή και έτσι η κίνησή τους πάνω στο χαρακτή αντικατοπτρίζεται χωρίς απώλειες στην ψηφιακή ένδειξη του χαρακτή. Η συνολική συναρμογή δένεται πάνω στο τραπέζι του κέντρου κατεργασίας και το τραπέζι περιστρέφεται 90 μοίρες ως προς τον άξονα Β. Έτσι η κάμερα υψηλής ταχύτητας είναι έτοιμη να καταγράψει τη διάτρηση.

### 3.3 Προσδιορισμός συνθηκών πειραματικής διαδικασίας

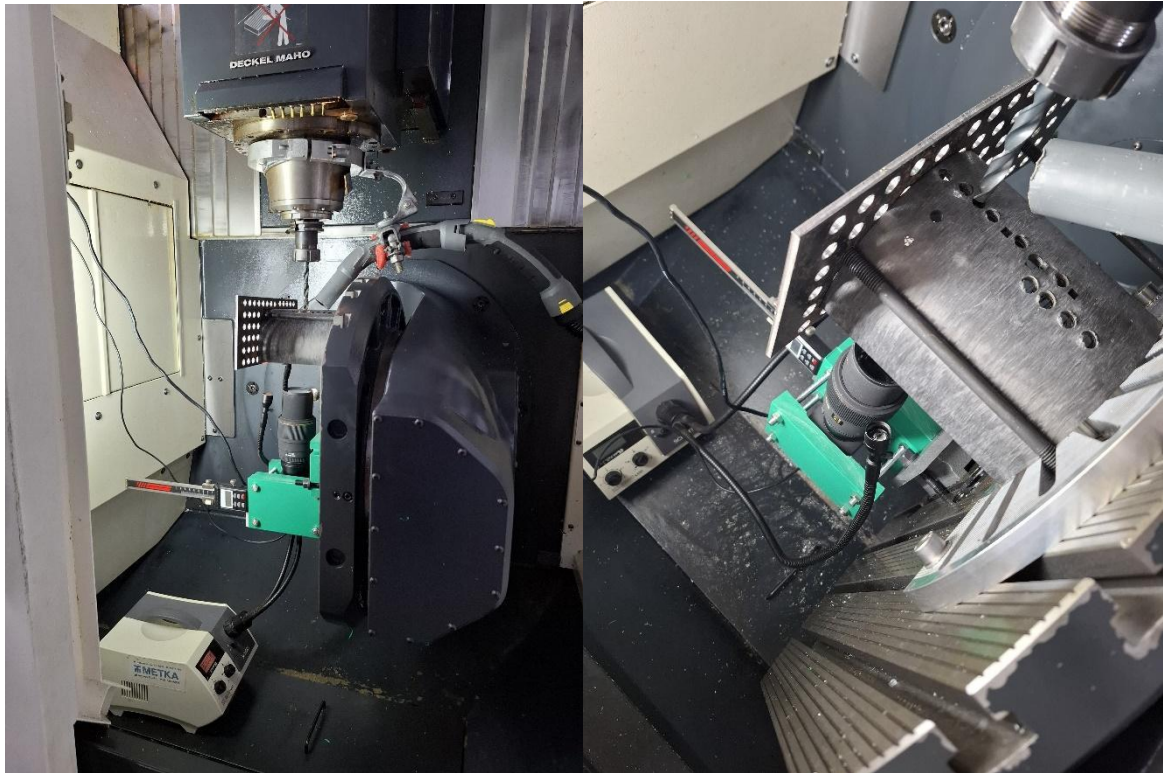
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, οι συνθήκες κοπής έχουν σημαντική επίδραση στην τελική ποιότητα της οπής, συγκεκριμένα η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Για τις ανάγκες του πειράματος εξετάστηκαν 5 διαφορετικές προώσεις και 6 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής δημιουργώντας συνολικά 30 συνδυασμούς ταχύτητας κοπής και πρόωσης ανά περιστροφή. Οι συνδυασμοί φαίνονται στο πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 3.1. Παράμετροι πειραματικής διαδικασίας

α/α πειράματος	Ταχύτητα πρόωσης F (mm/min)	Ταχύτητα περιστροφής S (rpm)	Ταχύτητα Κοπής vc (m/min)	Πρόωση fn (mm/rev)
1.1	50	1000	19	0.05
1.2	50	1500	28	0.033
1.3	50	2000	37.5	0.025
1.4	50	2500	47	0.02
1.5	50	3000	56.5	0.016
1.6	50	3500	66	0.014
2.1	100	1000	19	0.1
2.2	100	1500	28	0.066
2.3	100	2000	37.5	0.05
2.4	100	2500	47	0.04
2.5	100	3000	56.5	0.033
2.6	100	3500	66	0.029
3.1	150	1000	19	0.15
3.2	150	1500	28	0.1
3.3	150	2000	37.5	0.075
3.4	150	2500	47	0.06
3.5	150	3000	56.5	0.05
3.6	150	3500	66	0.43
4.1	200	1000	19	0.2
4.2	200	1500	28	0.133
4.3	200	2000	37.5	0.1
4.4	200	2500	47	0.08
4.5	200	3000	56.5	0.06
4.6	200	3500	66	0.06
5.1	250	1000	19	0.25
5.2	250	1500	28	0.166
5.3	250	2000	37.5	0.125
5.4	250	2500	47	0.1
5.5	250	3000	56.5	0.083
5.6	250	3500	66	0.071

### 3.4 Πειραματική διαδικασία

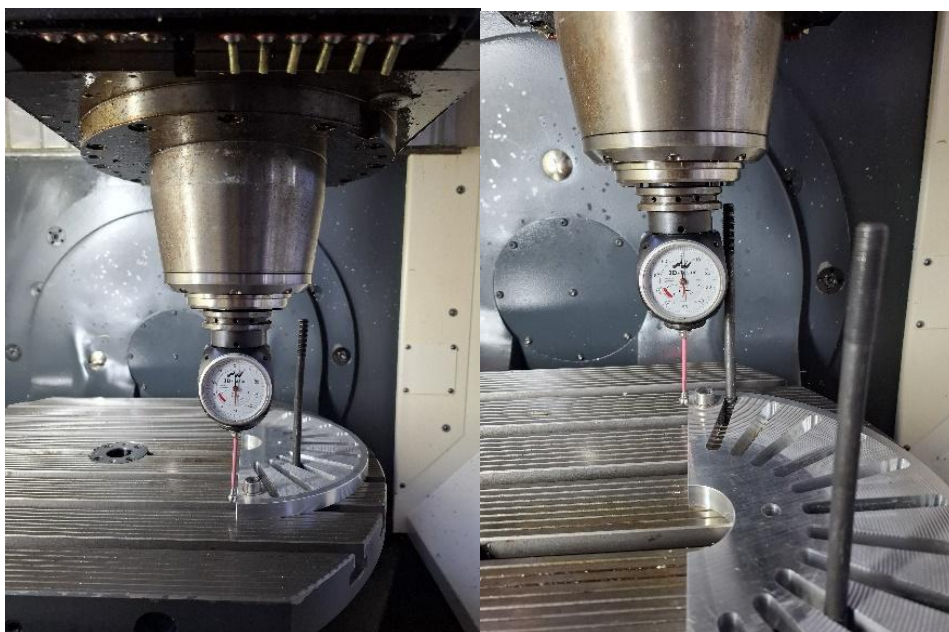
Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.12) φαίνεται η πειραματική διάταξη και το σύνολο του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραματικών διατρήσεων.



Σχήμα 3.12. Διάταξη πειραμάτων διάτρησης στο κέντρο κατεργασίας

**Περιοχή διάτρησης:** Αρχικά διαμορφώνεται κατάλληλα η περιοχή της διάτρησης. Για αυτόν το σκοπό αρχικά τοποθετούνται πάνω στο τραπέζι του κέντρου κατεργασίας η βάση συγκράτησης, το τεμάχιο του σύνθετου υλικού και η βάση συγκράτησης της κάμερας υψηλής ταχύτητας, όπως και η κάμερα. Η βάση συγκράτησης του τεμαχίου μηδενίζεται με χρήση του 3D-Tester ως προς τον Y άξονα (σχήμα 3.13) για να διασφαλίζονται ότι η κάμερα θα καταγράφει κάθετα την κατεργασία και το κοπτικό θα εισέλθει σε όλες της οπές κάθετα.



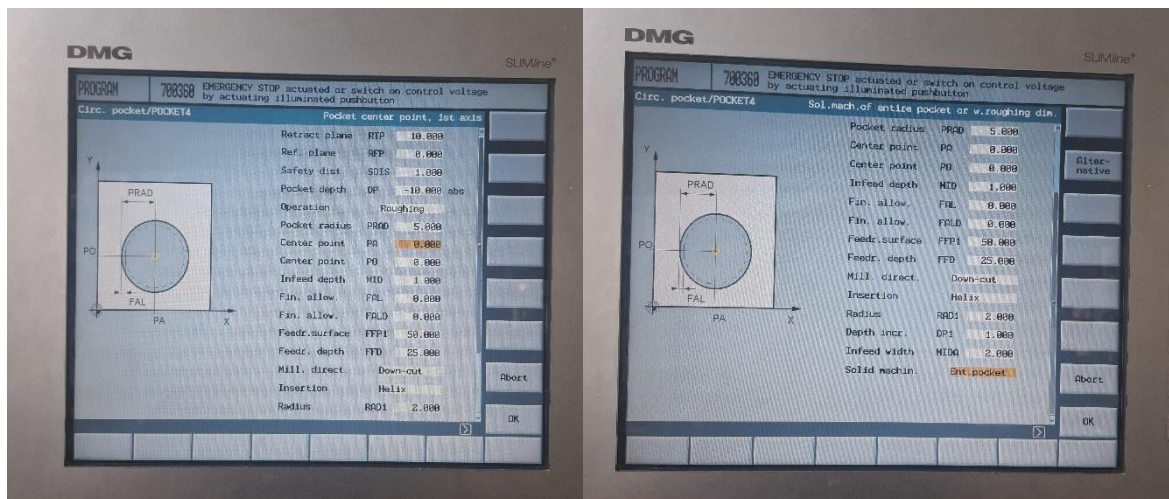


Σχήμα 3.13. Μηδενισμός βάσης συγκράτησης με χρήση του 3D Tester

Έπειτα το τεμάχιο τοποθετείται στα κατάλληλα σημάδια της χάραξης βάση του μεγέθους του. Στη συνέχεια το τραπέζι περιστρέφεται κατά  $90^\circ$  ώστε το κοπτικό εργαλείο να είναι κάθετο στο δοκίμιο κατά τη διάτρηση. Παράλληλα η κάμερα, με τη βοήθεια του υψομετρικού χαρακτή, επιτρέπει στην κάμερα να κινηθεί στον X άξονα της περιστρεφόμενης διάταξης ώστε να κεντράρει στην εκάστοτε οπή. Για την απομάκρυνση των ρινισμάτων που προκύπτουν κατά τη διάτρηση εγκαθίσταται μία ιδιοσκευή πάνω στην άτρακτο η οποία επιτρέπει την εγκατάσταση ηλεκτρικής σκούπας ακριβώς δίπλα στην περιοχή της διάτρησης. Τέλος, τοποθετείται ειδική πηγή φωτισμού με δύο εύκαμπτους σωλήνες που καταλήγουν σε δύο λαμπτήρες για τον επαρκή φωτισμό της περιοχής διάτρησης που είναι απαραίτητος για την καταγραφή του συμβάντος σε τόσο υψηλές ταχύτητες.

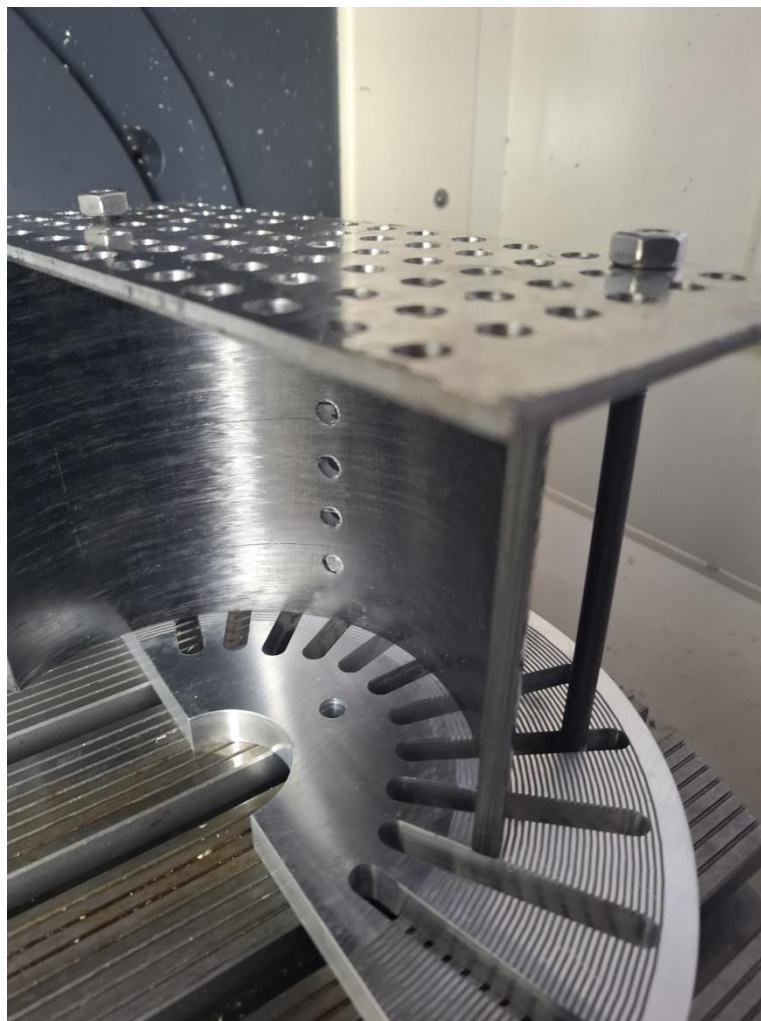
**Περιοχή καταγραφής:** Αφότου τοποθετείται η κάμερα υψηλής ταχύτητας στη βάση της και ευθυγραμμίζεται με το κοπτικό εργαλείο και την περιοχή της διάτρησης, συνδέεται στη συνέχεια με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή ώστε μέσα από το λογισμικό MotionBlitz να είναι δυνατή η καταγραφή, αναπαραγωγή και αποθήκευση της κατεργασίας σε μεμονωμένα καρέ ή βίντεο. Να σημειωθεί ότι ανά διάτρηση, με τη βοήθεια του υψομετρικού χαρακτή η συναρμογή κάμερας-βάσης συγκράτησης μετακινείται με τη χρήση του υψομετρικού χαρακτή 22mm ώστε να βρεθεί στην επόμενη διάτρηση.

**Περιοχή προγραμματισμού και ελέγχου του πειράματος:** Μέσω του λογισμικού του κέντρου κατεργασίας μετακινείται η άτρακτος της φραιζας μέχρι να βρεθεί στο σημείο που θα διεξαχθεί η διάτρηση. Χρησιμοποιώντας το μετρητικό όργανο 3D-tester μηδενίζεται το σημείο ως προς X-Y-Z. Στη συνέχεια με χρήση G κώδικα προγραμματίζεται η κατεργασία της διάτρησης ώστε να είναι ελεγχόμενοι οι παράμετροι της πρόωσης, της ταχύτητας περιστροφής αλλά και η θέση εκκίνησης της κατεργασίας. Η κατεργασία της διάτρησης διεξάγεται με ελικοειδή διάτρηση (helical drilling) και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 3.14



Σχήμα 3.14. G κώδικας που χρησιμοποιείται για την ελικοειδή διάτρηση

Κάνοντας 6 σπές ονομαστικής διαμέτρου 10mm και σε απόσταση 22mm μεταξύ τους, το τραπέζι γυρίζει στις 0 μοίρες, το τεμάχιο περιστρέφεται κατά 30 μοίρες πάνω στη βάση συγκράτησης και η διαδικασία αρχίζει από την αρχή για τις επόμενες διατρήσεις (σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15. Περιστροφή τεμαχίου έπειτα από την πρώτη σειρά διατρήσεων

## 4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων και λογισμικά

#### Στερεομικροσκόπιο Leica M125

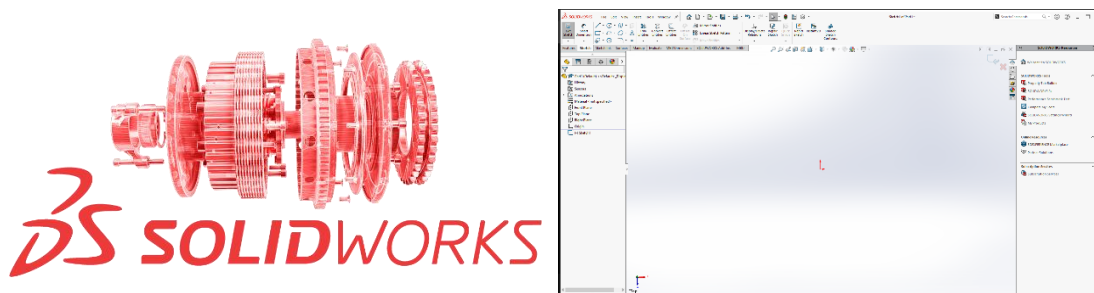
Το στερεοσκόπιο Leica M125 (σχήμα 4.1) είναι ένα όργανο μέτρησης και παρατήρησης της εξωτερικής μορφολογίας αντικειμένων. Διαθέτει αντικειμενικούς φακούς μεταβαλλόμενης εστιακής απόστασης από 8x έως 100x με ικανότητα μέγιστης μεγέθυνσης των αντικειμένων κατά 800x και μέγιστης ανάλυσης 864lp/mm. Μπορεί 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.



Σχήμα 4.1. Οπτικό Στερεομικροσκόπιο Leica M125

#### SOLIDWORKS

Το λογισμικό SOLIDWORKS είναι μία σχεδιαστική πλατφόρμα που περιέχει Dassault systèmes εφαρμογές για τρισδιάστατη σχεδίαση (CAD), μοντελοποίηση και υπολογισμό κατασκευών (CAE) και αυτόματη κατασκευή προϊόντων (CAM) (σχήμα 4.2). Η σχεδιαστική του εφαρμογή αποτελεί ένα από τα δημοφιλέστερα λογισμικά στον κόσμο λόγω της ευκολίας στον χειρισμό του και της αξιοπιστίας του. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση που πραγματοποιείται μέσω του SOLIDWORKS γίνεται μέσω της προσθήκης χαρακτηριστικών με διάφορες παραμέτρους όπου ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να τις τροποποιήσει όποτε επιθυμεί. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο λογισμικό για τον εντοπισμό της επιφάνειας που επηρεάζεται περιμετρικά της περιοχής διάτρησης.

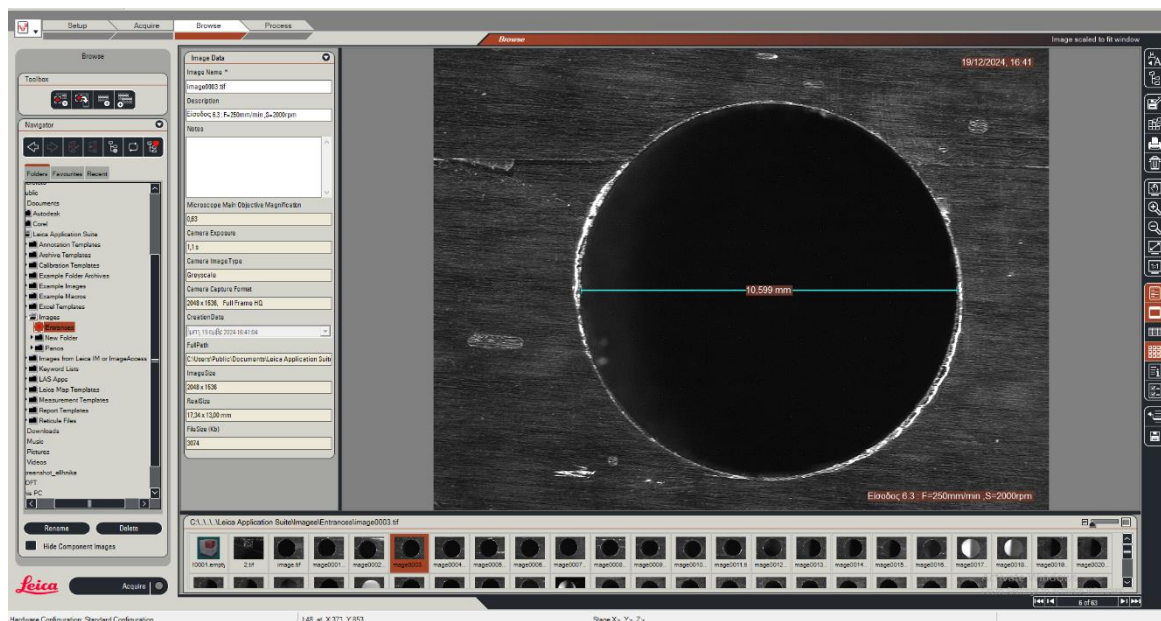


Σχήμα 4.2. Το λογότυπο του λογισμικού SOLIDWORKS και το περιβάλλον του



## 4.2 Μετρητική διαδικασία

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιούνται μετρήσεις προκειμένου να μετρηθεί η επιφάνεια περιμετρικά κάθε οπής η οποία επηρεάζεται με οποιονδήποτε τρόπο από τη διάτρηση. Αρχικά τοποθετείται το κατεργασμένο τεμάχιο στο στερεοσκόπιο με την κάμερα του οργάνου, να εντοπίζει κάθετα την οπή. Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Leica Application Suite παρατηρείται η οπή και προσαρμόζονται οι ρυθμίσεις που προσφέρει το λογισμικό για τη λήψη της βέλτιστης δυνατής εικόνας, με σκοπό την απεικόνιση των ατελειών όσο το δυνατόν εντονότερα (σχήμα 4.3). Έπειτα από τη λήψη της εικόνας, τοποθετούνται κάτω δεξιά οι συνθήκες κοπής για την κάθε οπή καθώς και αν πρόκειται για την είσοδο ή την έξοδο της. Έπειτα τοποθετείται ένας ψηφιακός χάρακας που έχει ως μοναδικό σκοπό την απεικόνιση της σωστής κλίμακας της εκάστοτε οπής για την περαιτέρω ορθή επεξεργασία της στο επόμενο λογισμικό, το SOLIDWORKS.



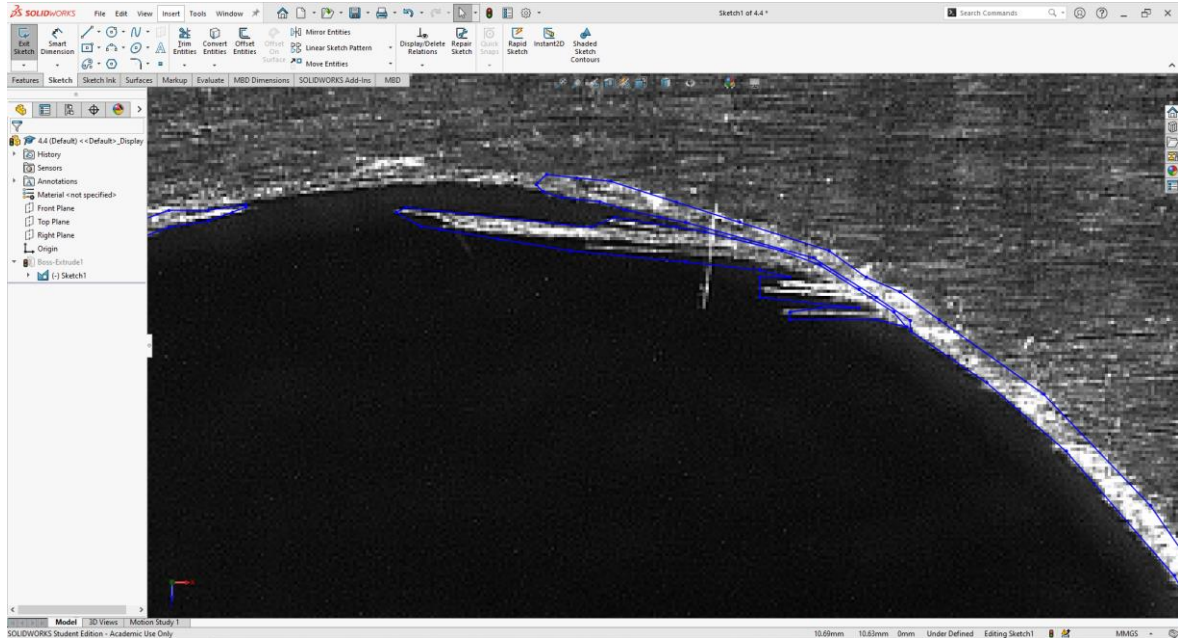
Σχήμα 4.3. Το λογισμικό LAS για την καταγραφή εικόνων μέσω του στερεοσκοπίου

Αφού τοποθετείται η εικόνα της οπής στο CAD, αρχικά με τη δημιουργία ενός sketch στο επίπεδό της, τραβιέται μία βοηθητική γραμμή μήκους όσο είχε αποτυπωθεί στην κάθε εικόνα ώστε να ρυθμιστεί σωστά η κλίμακα της εικόνας στο λογισμικό. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η επιφάνεια που μετριέται αντικατοπτρίζει με τη μέγιστη ακρίβεια την πραγματική επιφάνεια που επηρεάζεται λόγω των δυνάμεων που ασκούνται στο τεμάχιο κατά την κατεργασία. Στη συνέχεια στο ίδιο σχέδιο προσεγγίζεται, με τη βοήθεια γραμμών και splines, η επιφάνεια που βρέθηκε να έχει οποιοδήποτε ελάττωμα. Τα χαρακτηριστικά που είναι ευδιάκριτα μέσω του στερεοσκοπίου είναι η απόληξη διάτρησης, η τυχόν αποκόλληση των στρώσεων που απεικονίζεται ως επιφάνεια με εντονότερο-λευκότερο χρώμα και οι άκοπτες ίνες που έχουν προκύψει είτε λόγω των υψηλών θερμοκρασιών κατά την κοπή, είτε λόγω χαμηλών στροφών. Αφού υπάρχουν κλειστά κομμάτια σχεδίου μέσα στο ίδιο σχέδιο, με τη χρήση του εργαλείου «measure area» μπορεί να μετρηθεί το μέγεθος της εκάστοτε αστοχίας στις διάφορες συνθήκες κοπής.

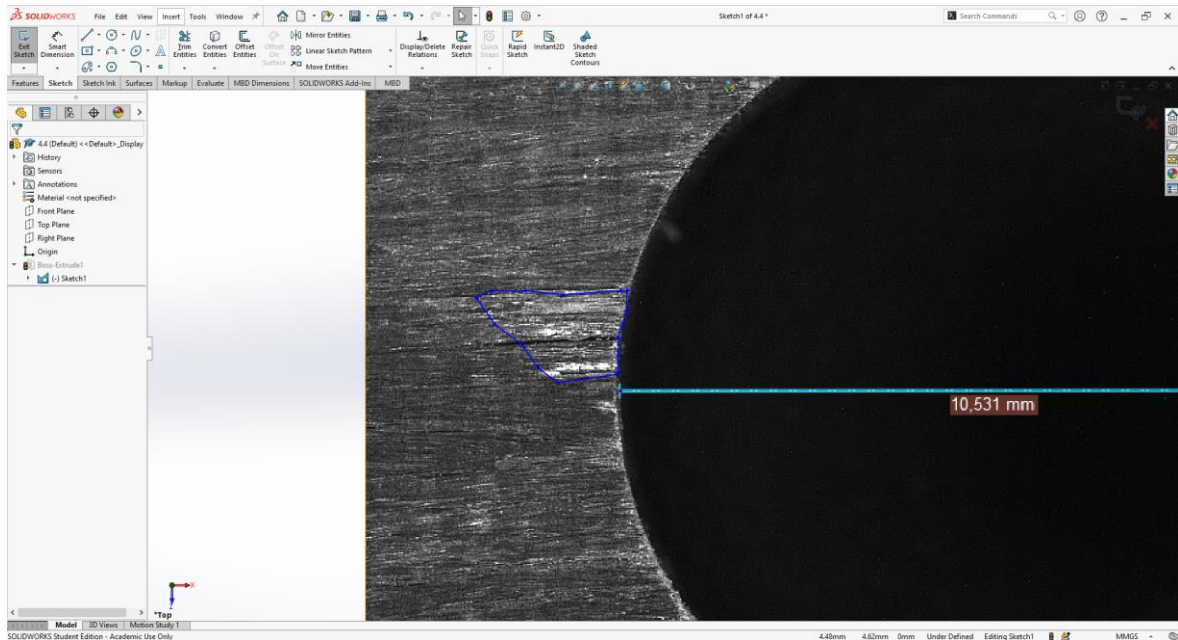
Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ο εντοπισμός και η ανίχνευση άκοπων ινών στην έξοδο οπής ενώ στο σχήμα 4.5 φαίνεται μία περιοχή με εντονότερο χρώμα που προσεγγίζεται ως αποκόλληση των στρώσεων. Το εντονότερο χρώμα οφείλεται στην ανάκλαση του φωτός λόγω της κλίσης στην περιοχή συγκριτικά με την γύρω περιοχή.

Στο σχήμα 4.6 είναι ευδιάκριτη η απόληξη διάτρησης στην είσοδο οπής που έχει προκύψει πιθανότατα λόγω υψηλής θερμοκρασία στην περιοχή της κατεργασίας. Τέλος, στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η μέθοδος για τη μέτρηση της επιφάνειας που είναι επηρεασμένη.

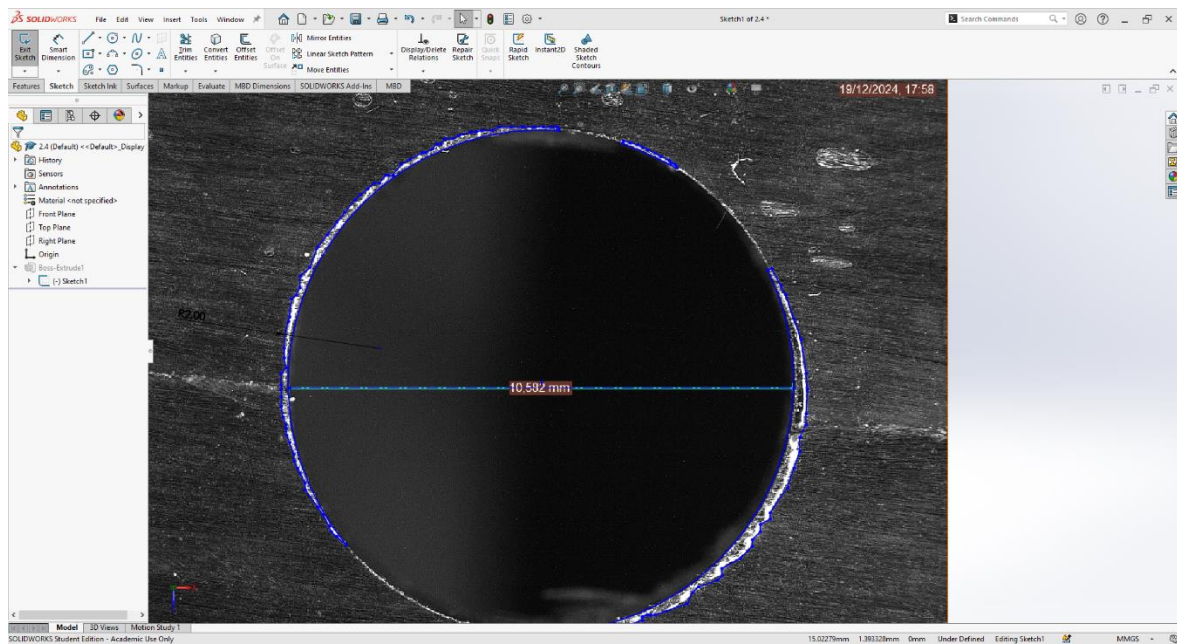
Οι αστοχίες μετριούνται μεμονωμένα και ταξινομούνται ανά κατηγορία στον εκάστοτε πίνακα που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο για την αξιολόγηση της κάθε κατεργασίας.



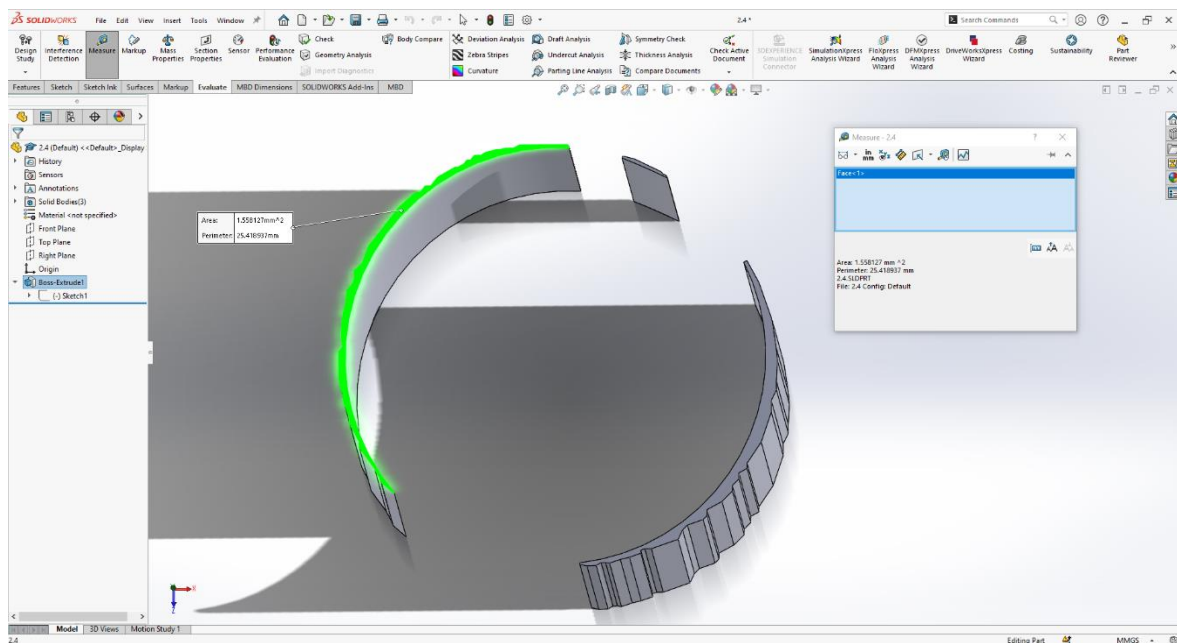
Σχήμα 4.4. Παράδειγμα άκοπων ινών σε έξοδο οπής



Σχήμα 4.5. Παράδειγμα αποκόλλησης στρώσεων σε έξοδο οπής



Σχήμα 4.6. Παράδειγμα απόληξης διάτρησης σε είσοδο οπής



Σχήμα 4.7. Παρουσίαση μεθόδου μέτρησης της επηρεασμένης επιφάνειας

### 4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η κάθε οπή στον κάθε πίνακα που ακολουθεί. Οι συνθήκες κοπής φαίνονται στην κάθε εικόνα από τις παρακάτω και στις πληροφορίες του αντίστοιχου πίνακα.

Στην πάνω πλευρά του κάθε πίνακα φαίνεται η είσοδος της οπής και οι αστοχίες που μετρήθηκαν. Στην κάτω πλευρά φαίνεται αντίστοιχα η έξοδος της οπής και οι αστοχίες της. Οπότε στα κελιά του κάθε πίνακα υπάρχουν οι κατηγορίες επιφάνεια με αποκόλληση, επιφάνεια απόληξης, επιφάνεια άκοπων ινών και τέλος η συνολική επηρεασμένη επιφάνεια, που είναι το άθροισμα των προηγούμενων.

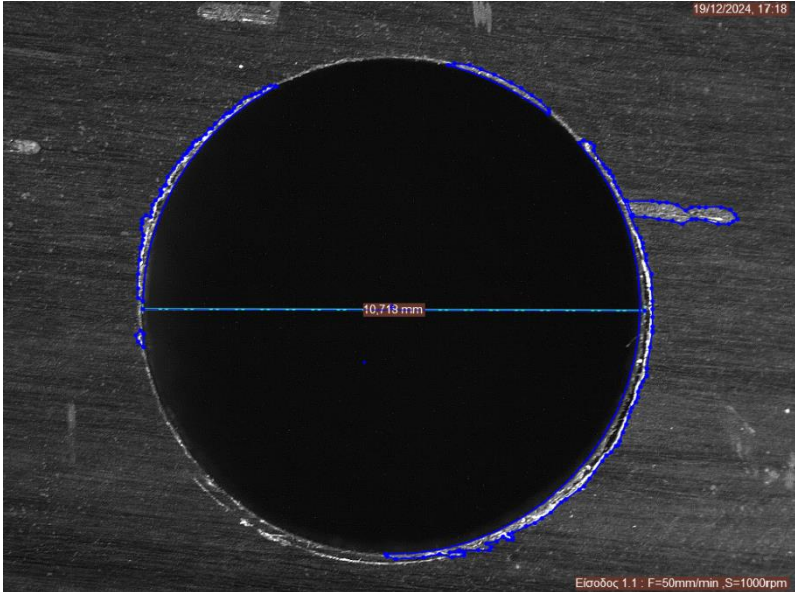
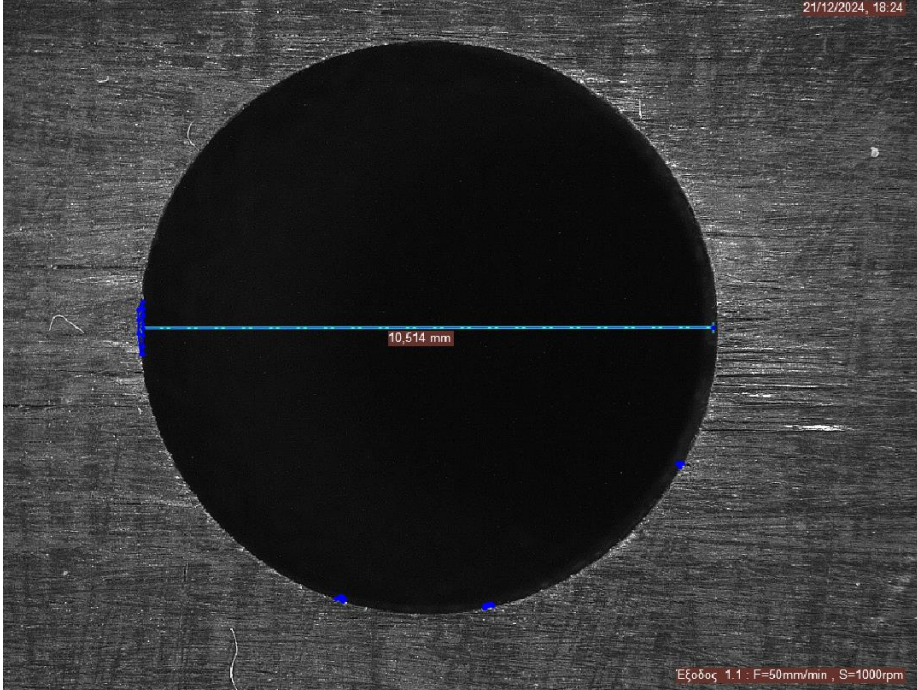
Υπενθυμίζεται ότι η ονομαστική διάμετρος της οπής είναι 10mm και άρα η ονομαστική επιφάνεια της οπής είναι:

$$A = \pi \times r^2 = 78.54 \text{mm}^2$$

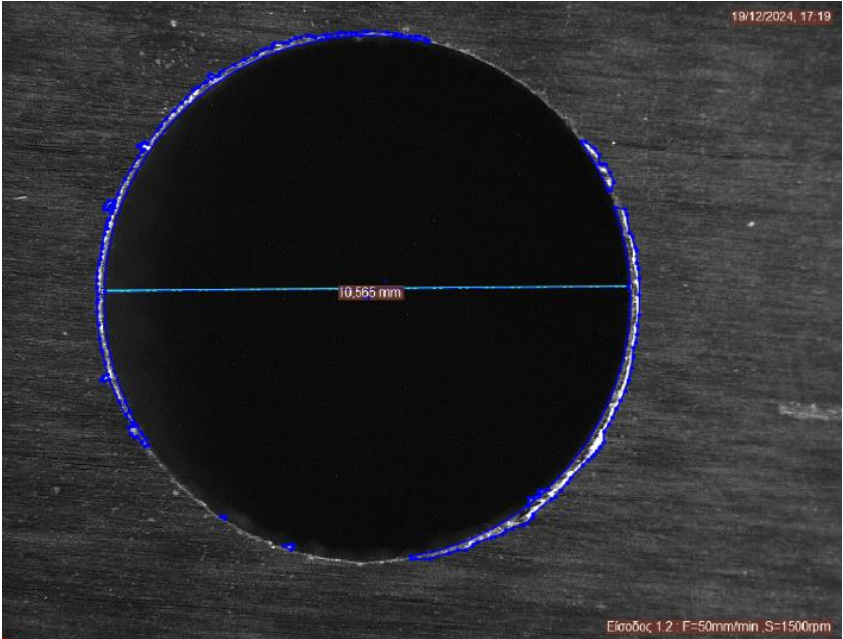
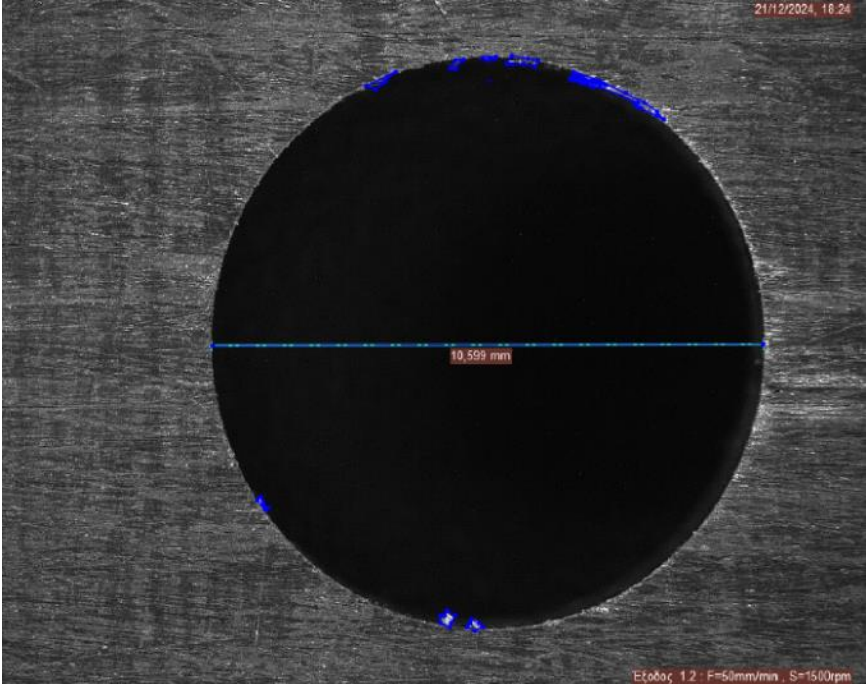
Οι τιμές που ακολουθούν στους παρακάτω πίνακες είναι σε τετραγωνικά χιλιοστά ( $\text{mm}^2$ ) και έχουν στρογγυλοποιηθεί στα 3 δεκαδικά ψηφία.



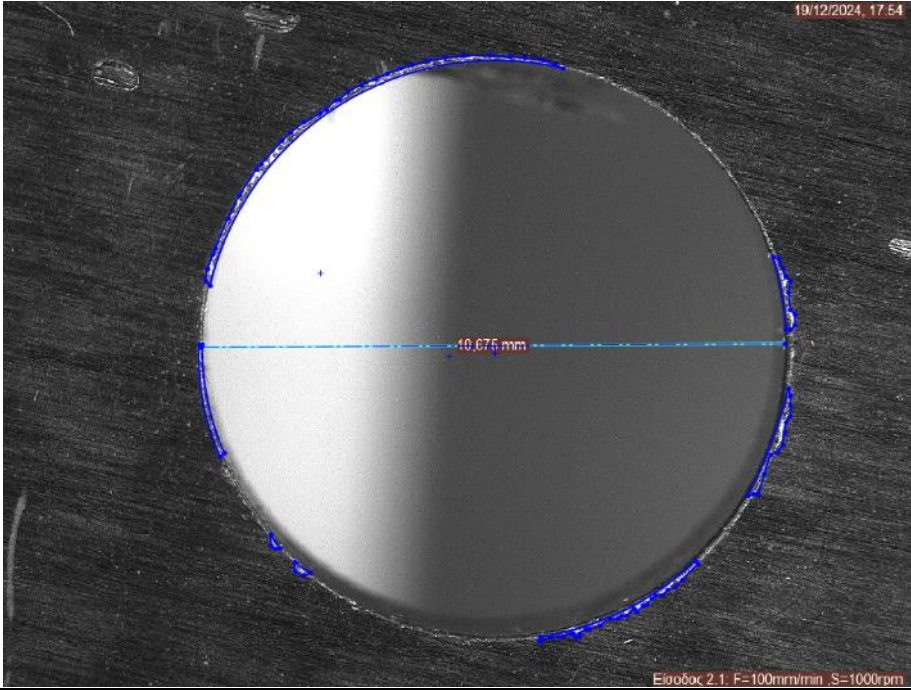
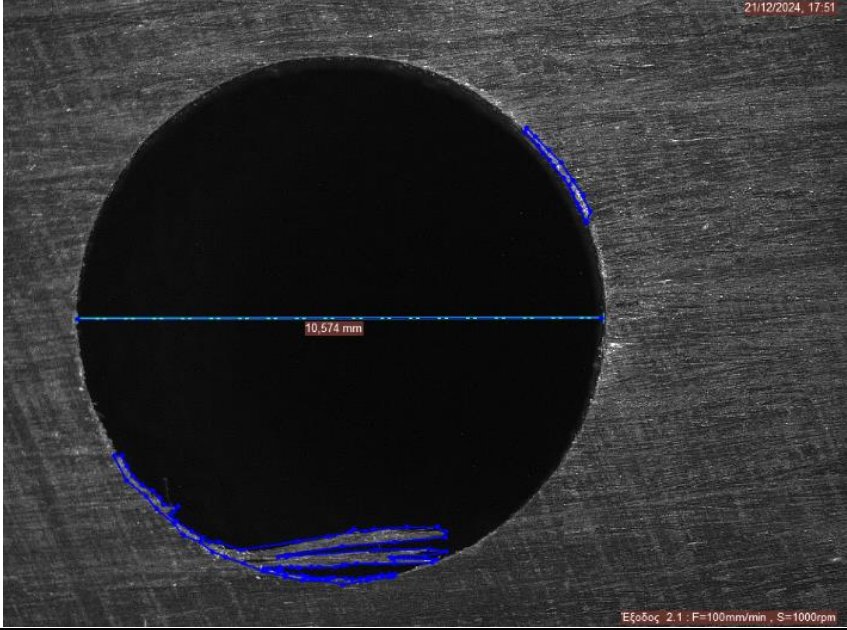
Πίνακας 4.1. Πείραμα 1.1 με συνθήκες κοπής  $F=50\text{mm/min}$  ,  $S=1000\text{rpm}$

Πείραμα 1.1	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0.729	4.012
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	4.741
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.065
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.016	0.082

Πίνακας 4.2. Πείραμα 1.2 με συνθήκες κοπής  $F=50\text{mm/min}$  ,  $S=1500\text{rpm}$

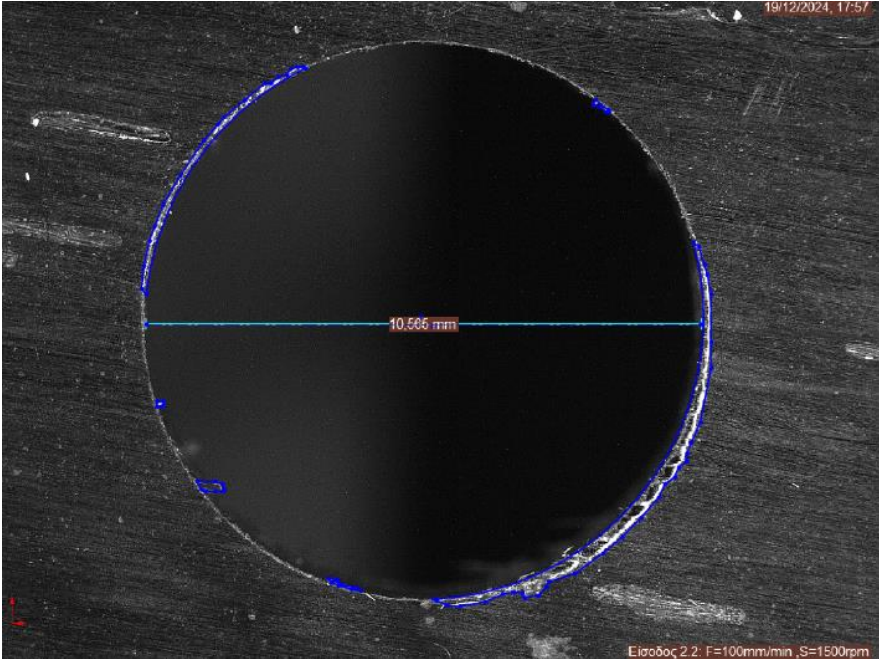
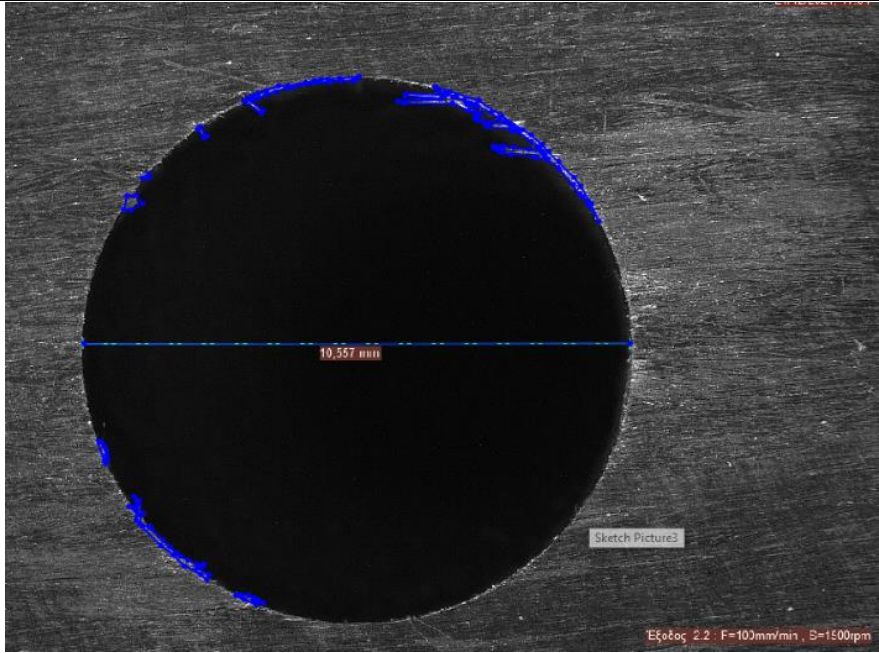
Πείραμα 1.2	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3.228
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.012	3.24
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.408	0.408

Πίνακας 4.3. Πείραμα 2.1 με συνθήκες κοπής  $F=100\text{mm/min}$  ,  $S=1000\text{rpm}$

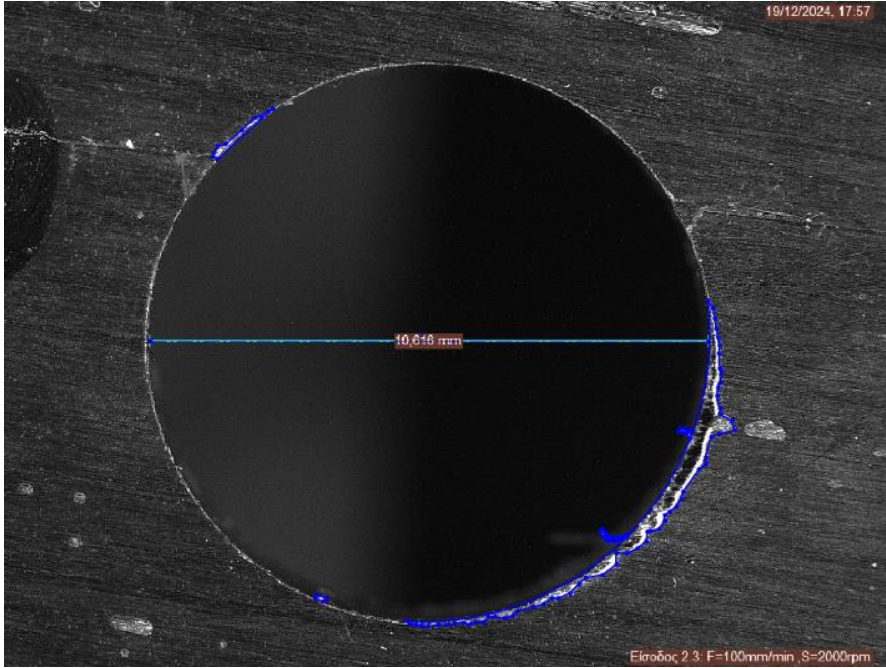
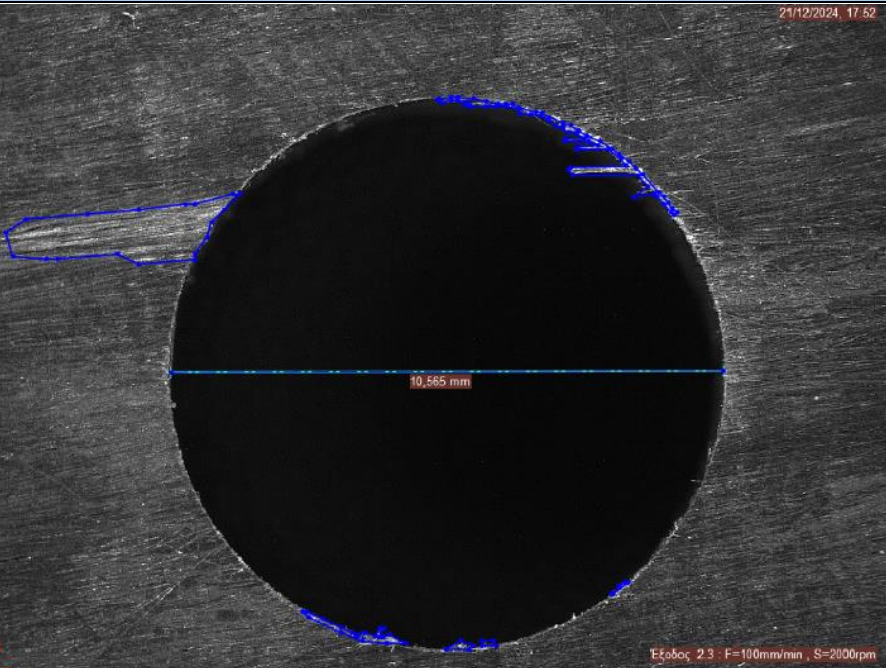
Πείραμα 2.1	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	1.850
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	1.850
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.294
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
2.676	2.97



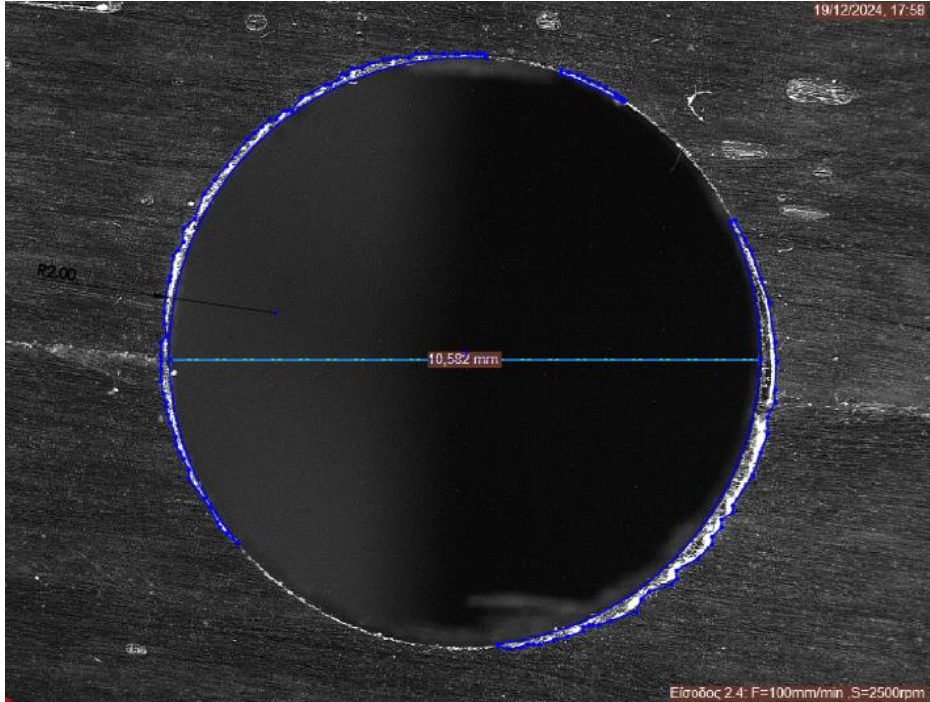
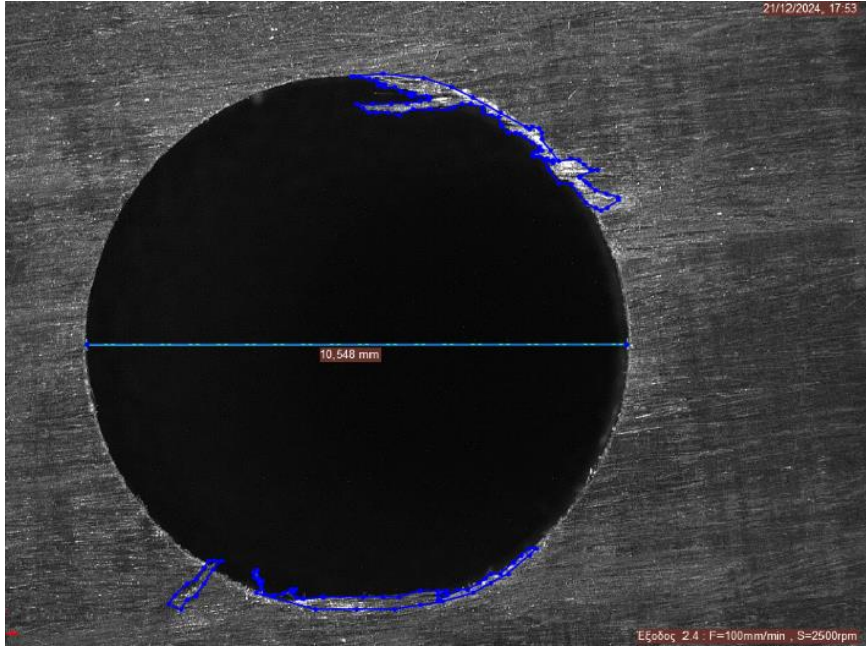
Πίνακας 4.4. Πείραμα 2.2 με συνθήκες κοπής  $F=100\text{mm/min}$  ,  $S=1500\text{rpm}$

Πείραμα 2.2	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.921
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.148	3.069
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.440
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.736	1.176

Πίνακας 4.5. Πείραμα 2.3 με συνθήκες κοπής  $F=50\text{mm/min}$  ,  $S=2000\text{rpm}$

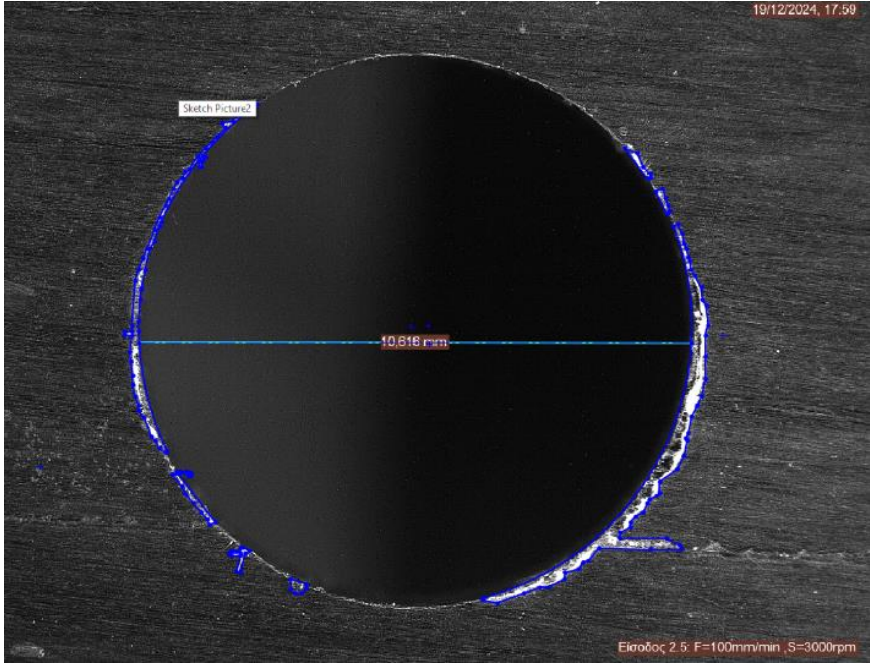
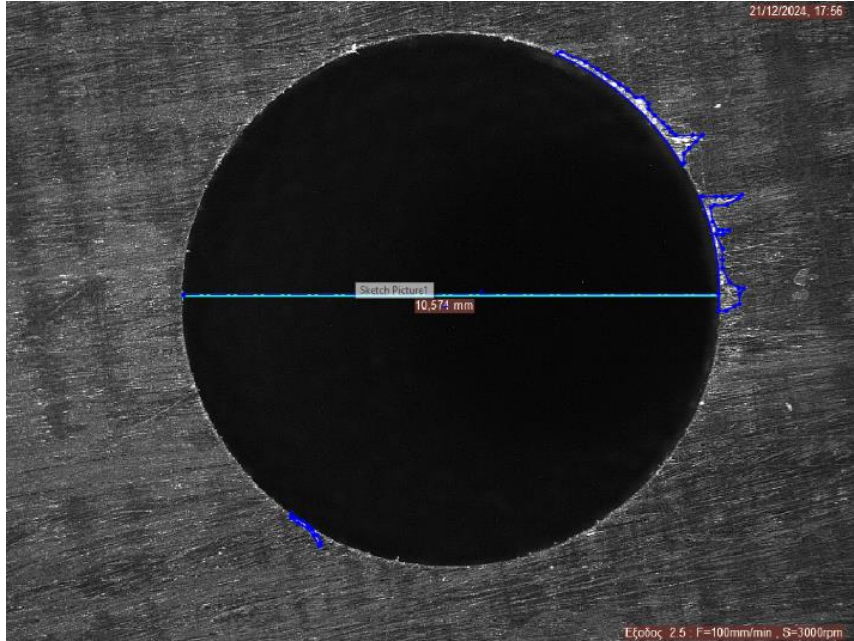
Πείραμα 2.3	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.337
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.065	2.402
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
3.48	0
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.034	4.514

Πίνακας 4.6. Πείραμα 2.4 με συνθήκες κοπής  $F=100\text{mm/min}$  ,  $S=2500\text{rpm}$

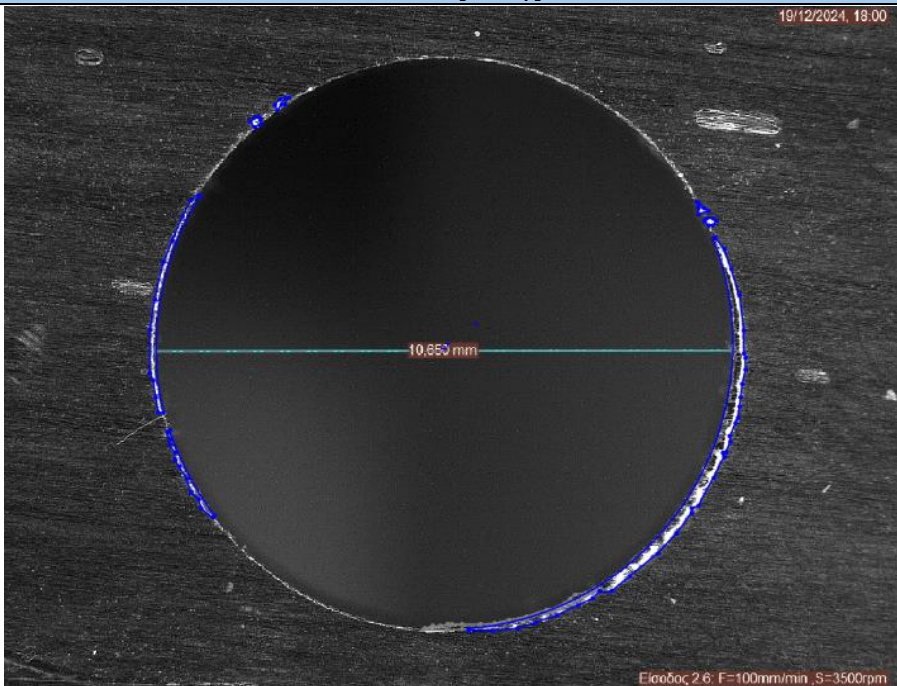

Πείραμα 2.4	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3.966
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	3.996
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.733
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
2.042	2.775



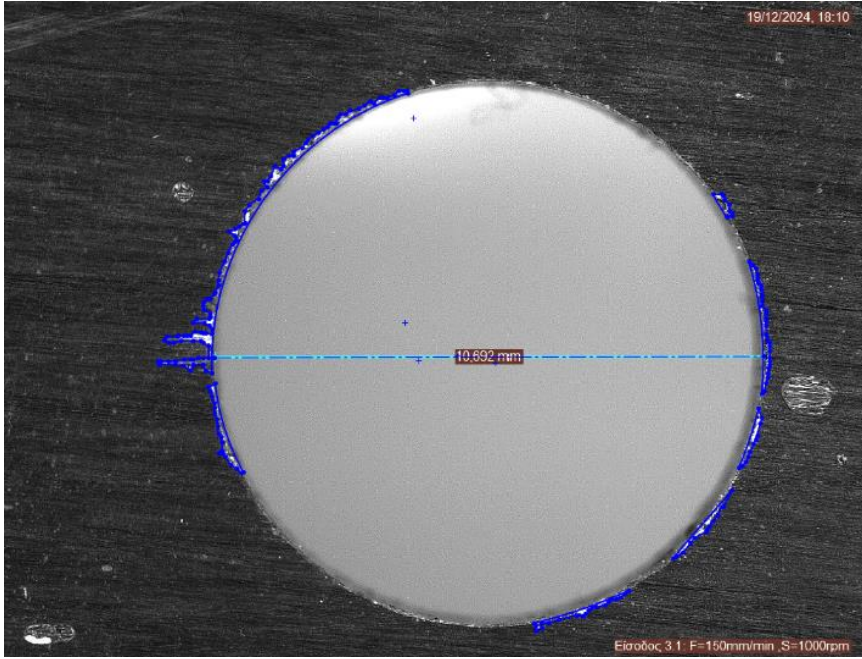
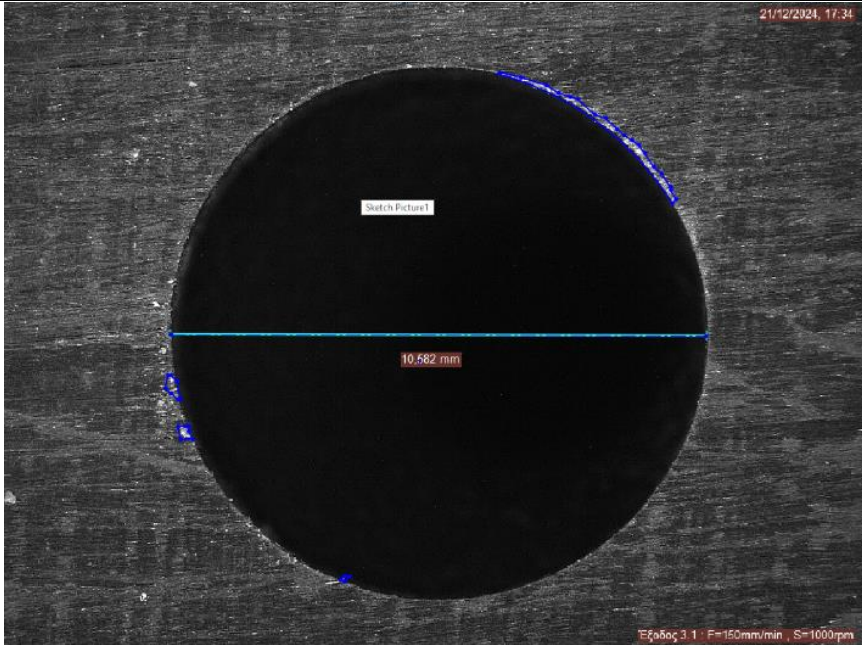
Πίνακας 4.7. Πείραμα 2.5 με συνθήκες κοπής  $F=100\text{mm/min}$  ,  $S=3000\text{rpm}$

Πείραμα 2.5	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3,736
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.079	3.815
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	1.092
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.052	1.144

Πίνακας 4.8. Πείραμα 2.6 με συνθήκες κοπής  $F=100\text{mm/min}$  ,  $S=3500\text{rpm}$

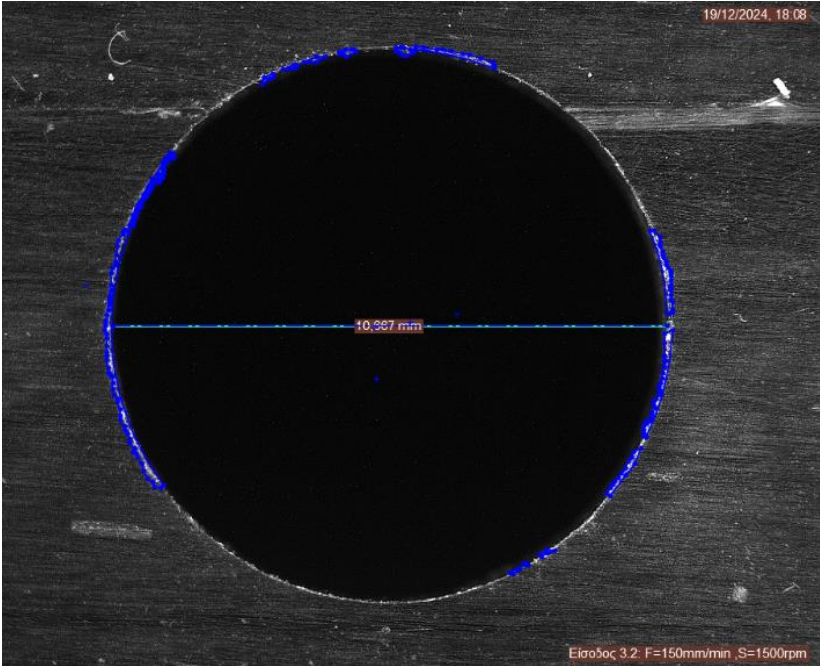
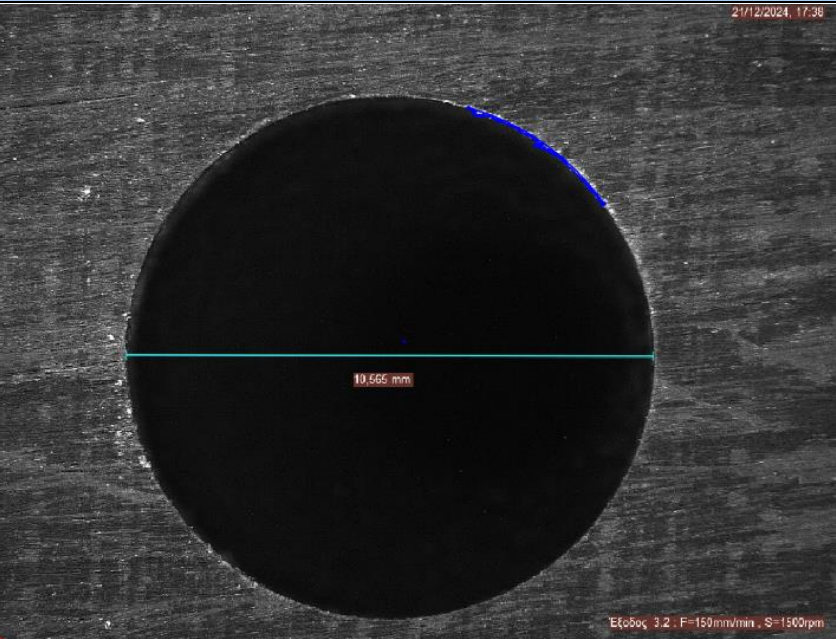
Πείραμα 2.6	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.637
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	2.637
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.445
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	0.445

Πίνακας 4.9. Πείραμα 3.1 με συνθήκες κοπής  $F=150\text{mm/min}$  ,  $S=1000\text{rpm}$

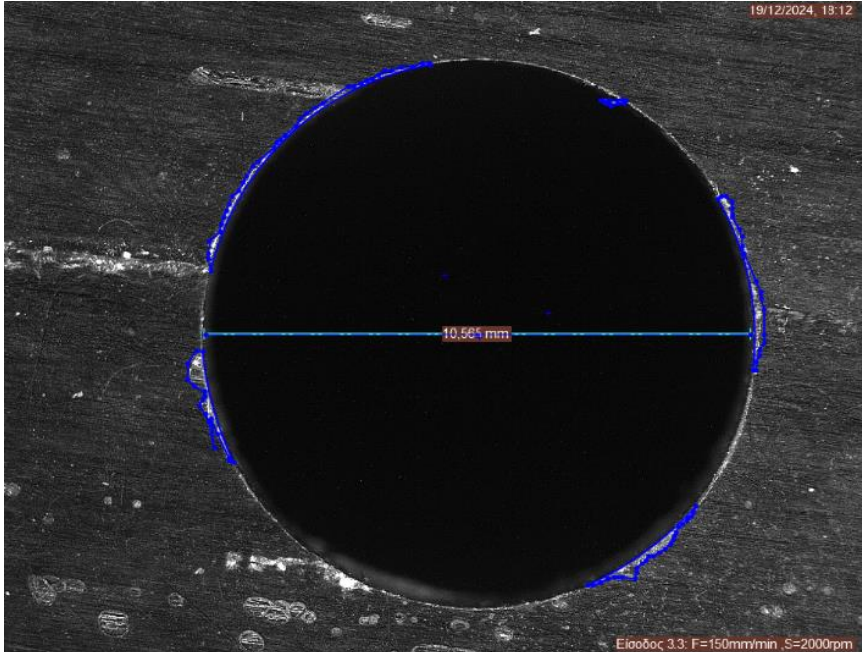
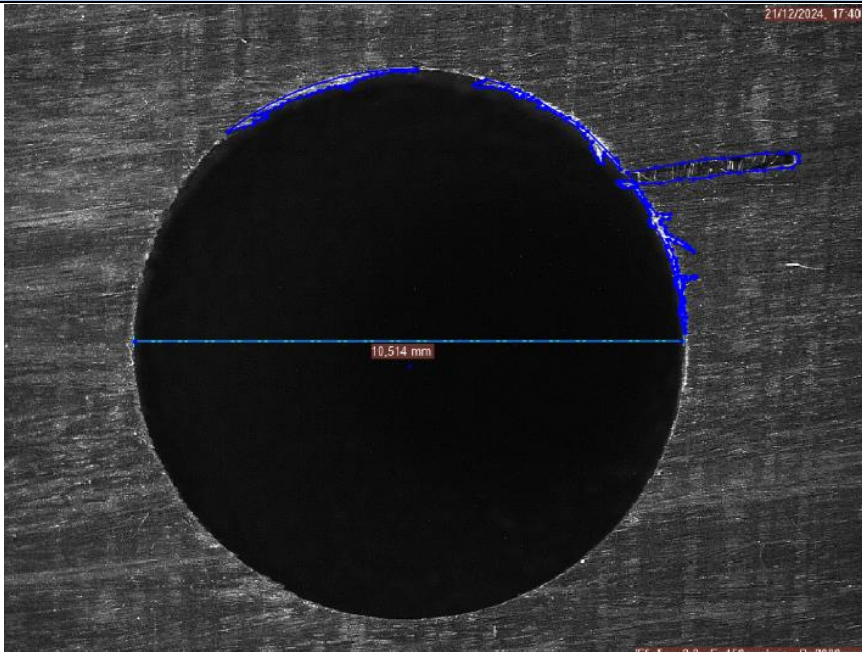
Πείραμα 3.1	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόλξης
0	2.048
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	2.048
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόλξης
0	0.656
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.009	0.665



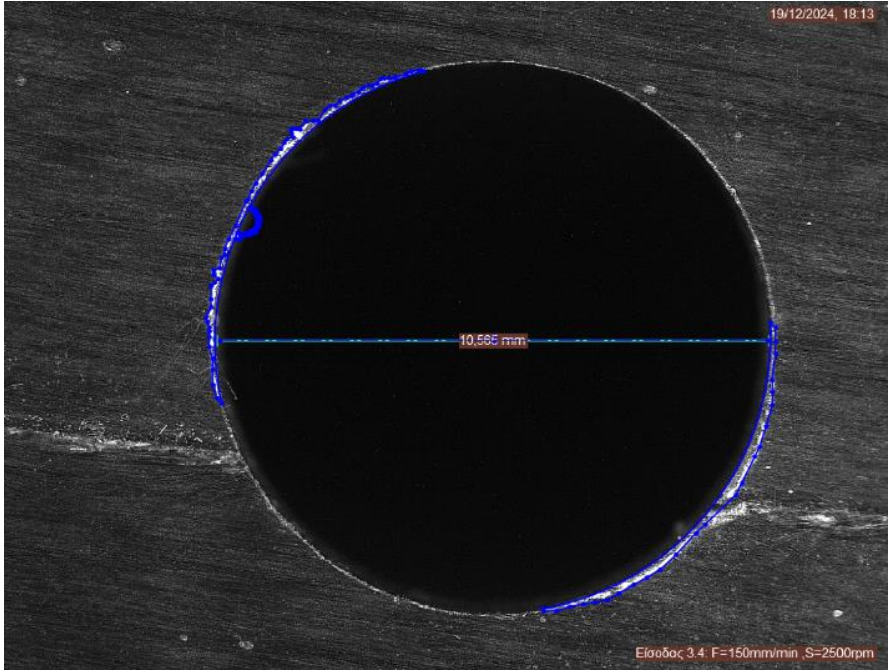
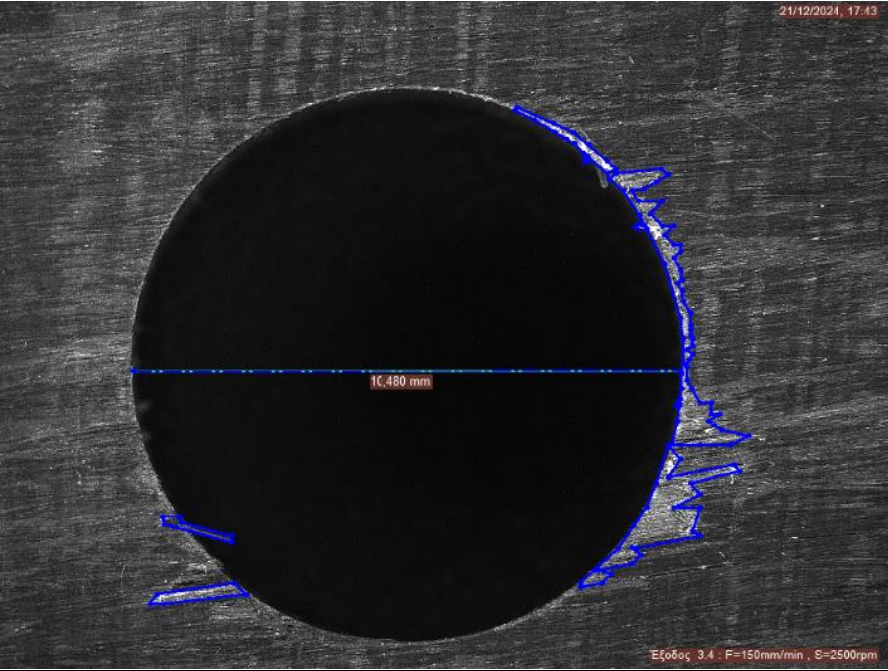
Πίνακας 4.10. Πείραμα 3.2 με συνθήκες κοπής  $F=150\text{mm/min}$  ,  $S=1500\text{rpm}$

Πείραμα 3.2	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	1.315
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	1.315
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.141
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	0.141

Πίνακας 4.11. Πείραμα 3.3 με συνθήκες κοπής  $F=150\text{mm/min}$  ,  $S=2000\text{rpm}$

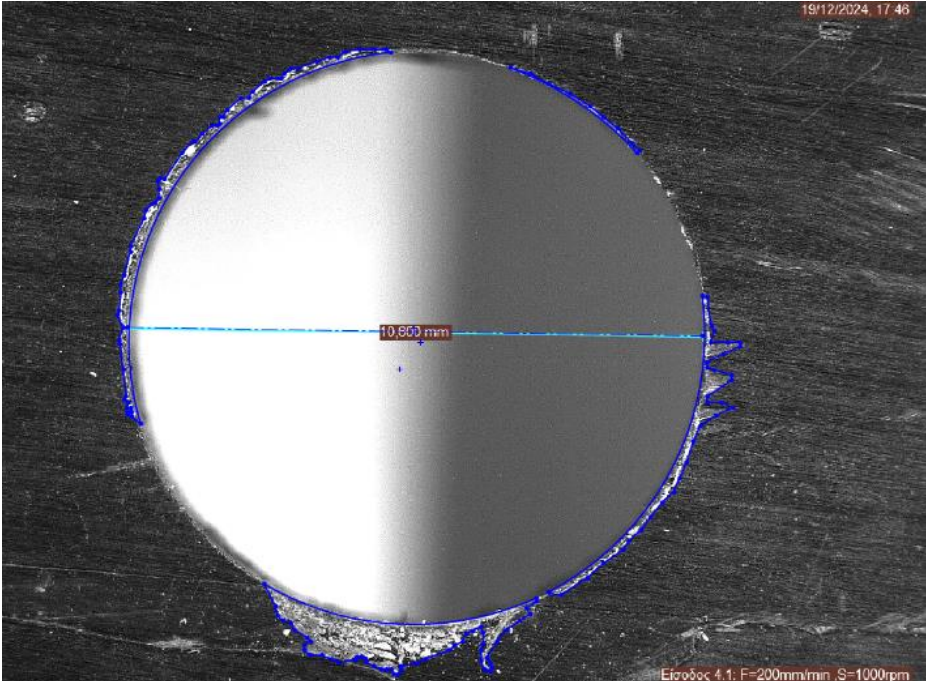
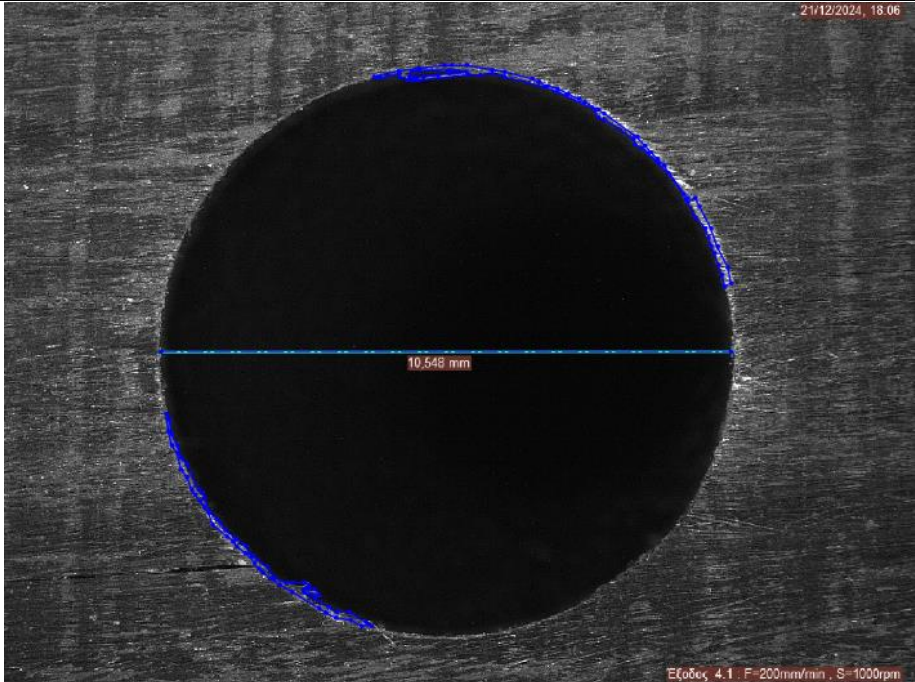
Πείραμα 3.3	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	1.694
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	1.694
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.957
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.076	2.033

Πίνακας 4.12. Πείραμα 3.4 με συνθήκες κοπής  $F=150\text{mm/min}$  ,  $S=2500\text{rpm}$

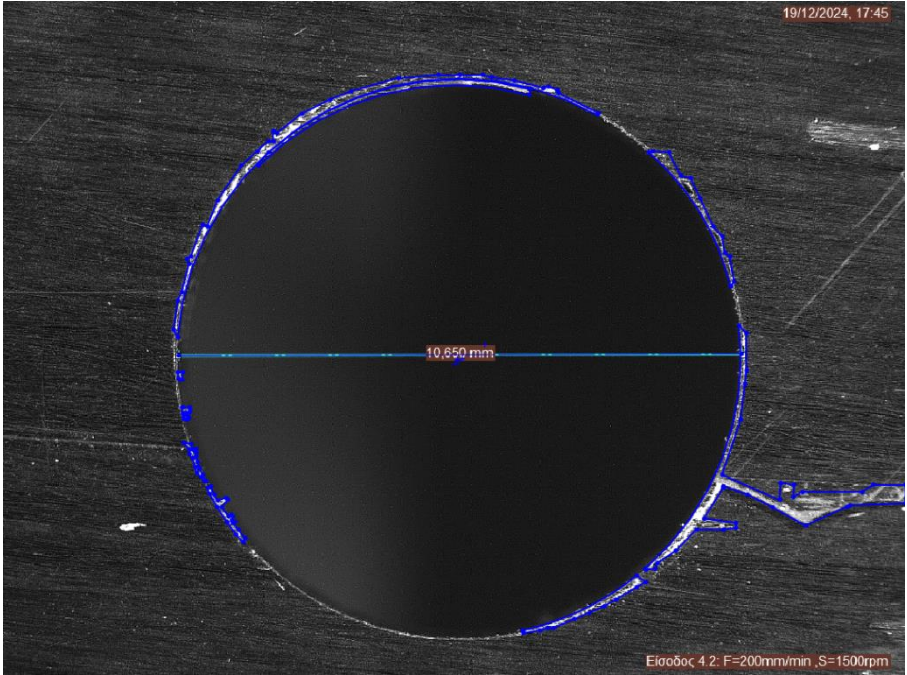
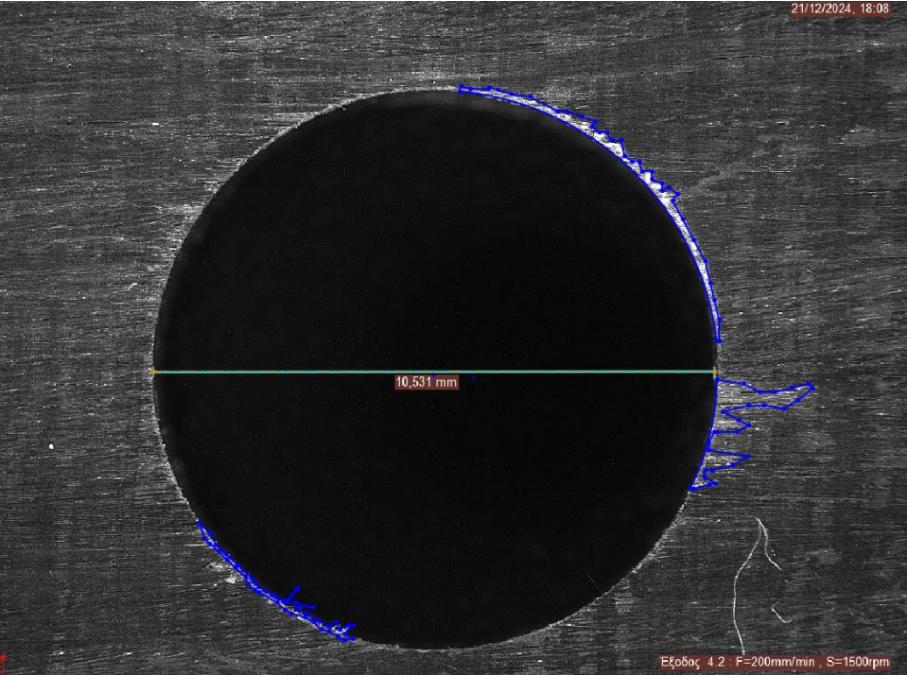
Πείραμα 3.4	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.156
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.004	2.160
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
4.179	0.319
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.180	4.678



Πίνακας 4.13. Πείραμα 4.1 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$  ,  $S=1000\text{rpm}$

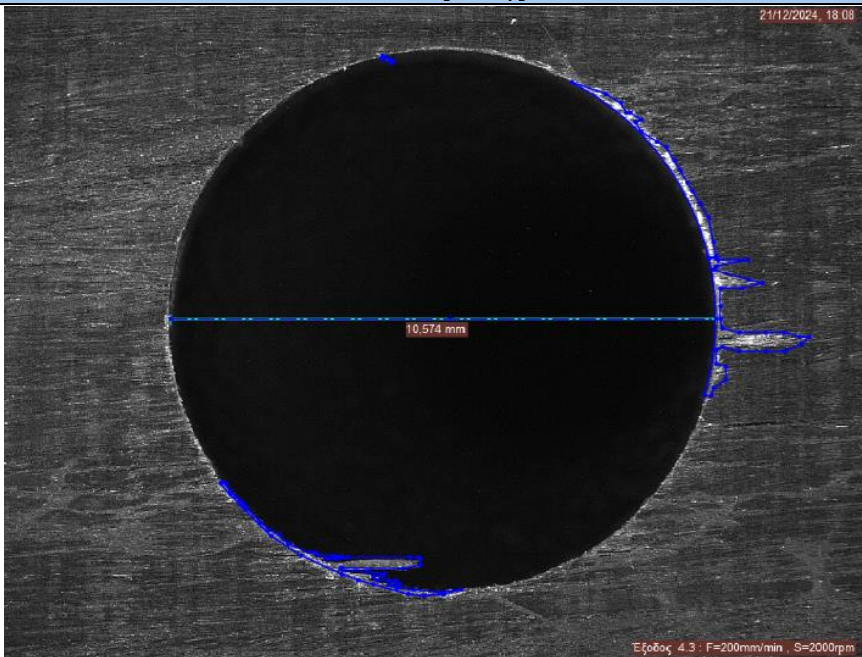
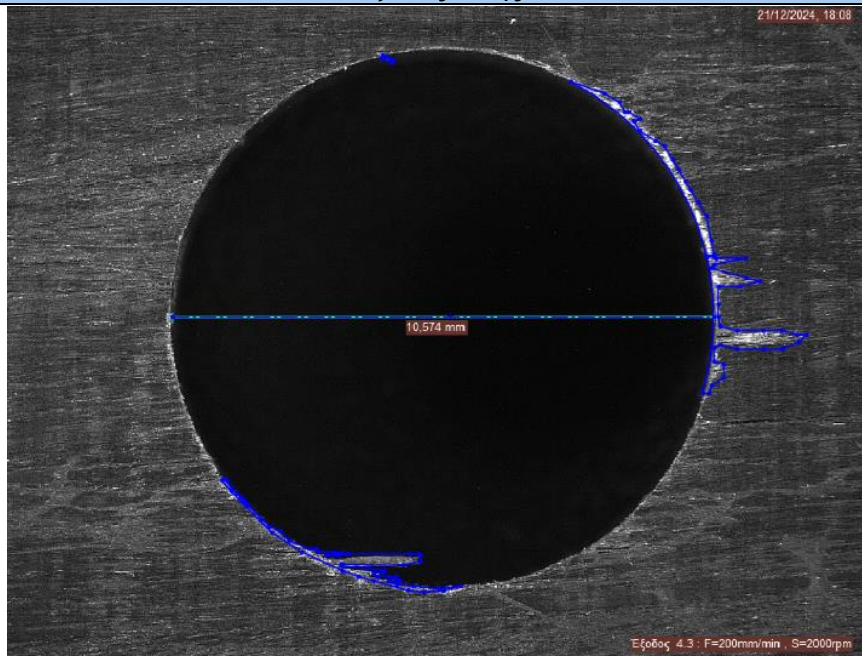
Πείραμα 4.1	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
2.973	3.058
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	6.031
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.217
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.091	1.308

Πίνακας 4.14. Πείραμα 4.2 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$  ,  $S=1500\text{rpm}$

Πείραμα 4.2	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
1.296	2.754
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.522	4.572
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
1.112	1.178
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.389	2.679

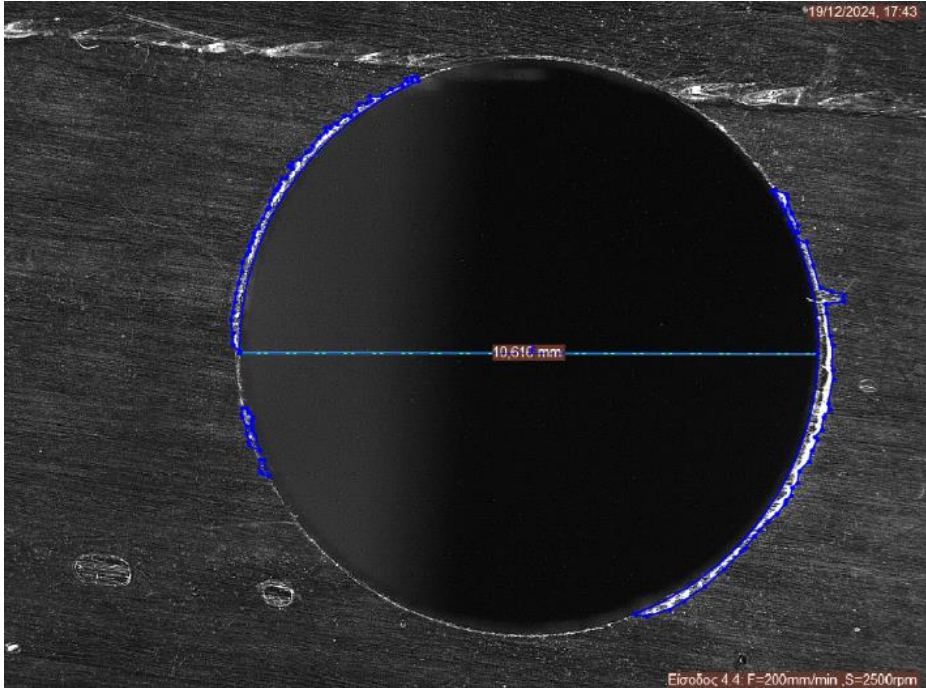
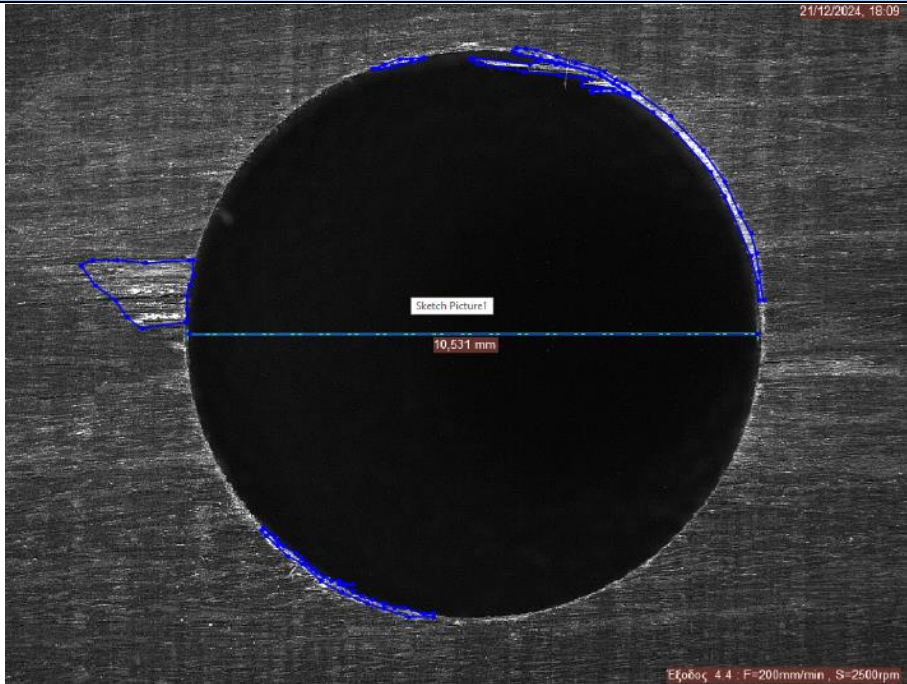


Πίνακας 4.15. Πείραμα 4.3 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$  ,  $S=2000\text{rpm}$

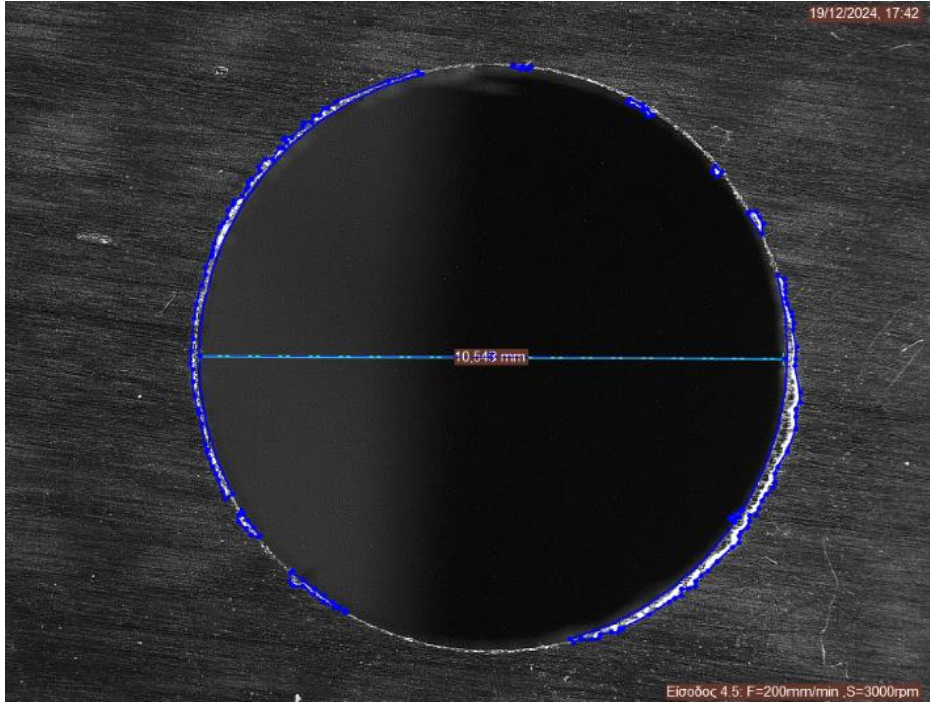
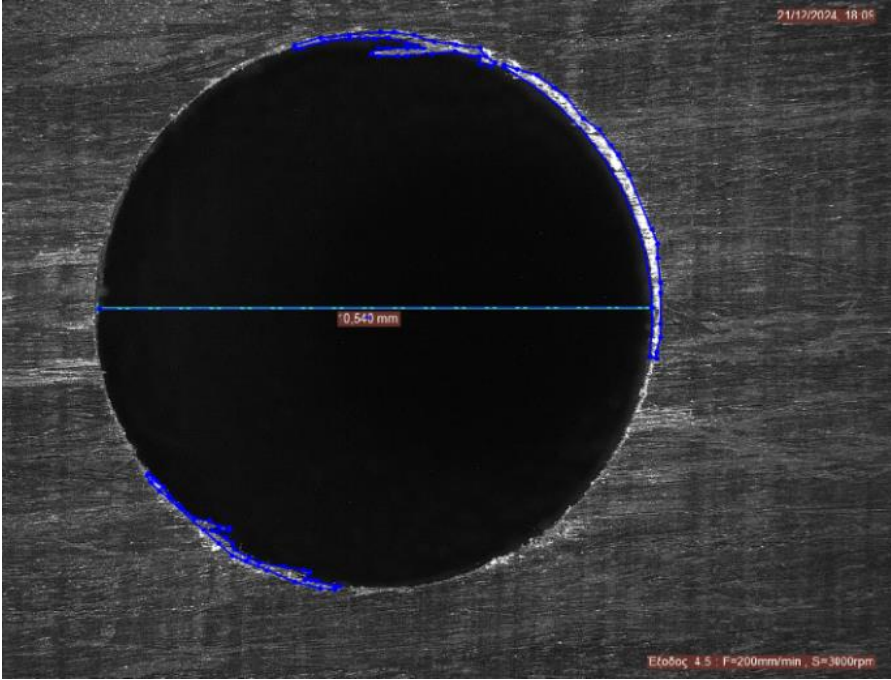
Πείραμα 4.3	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
1.047	1.611
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	2.658
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
1.105	0.635
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.862	2.602



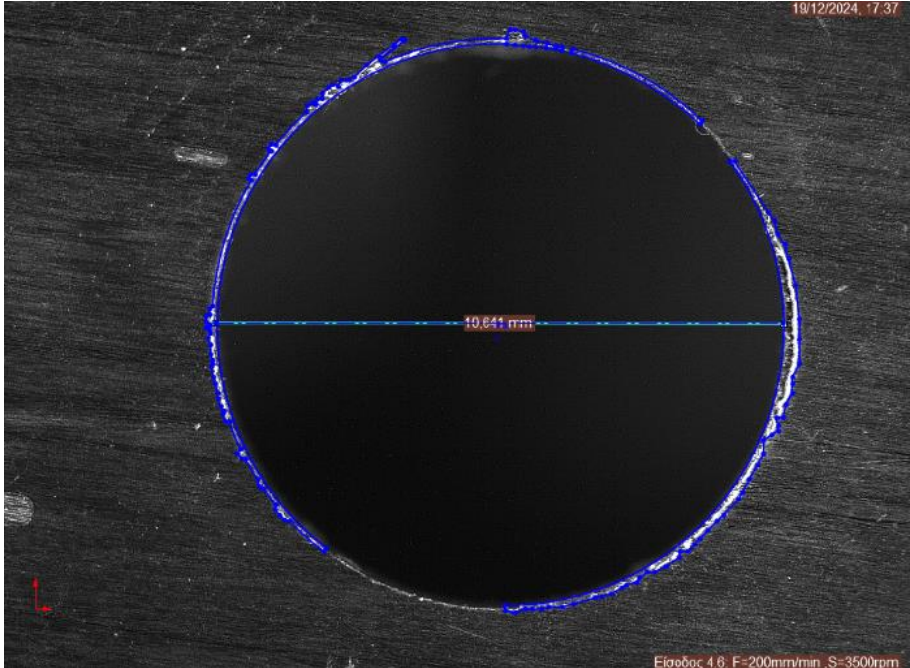
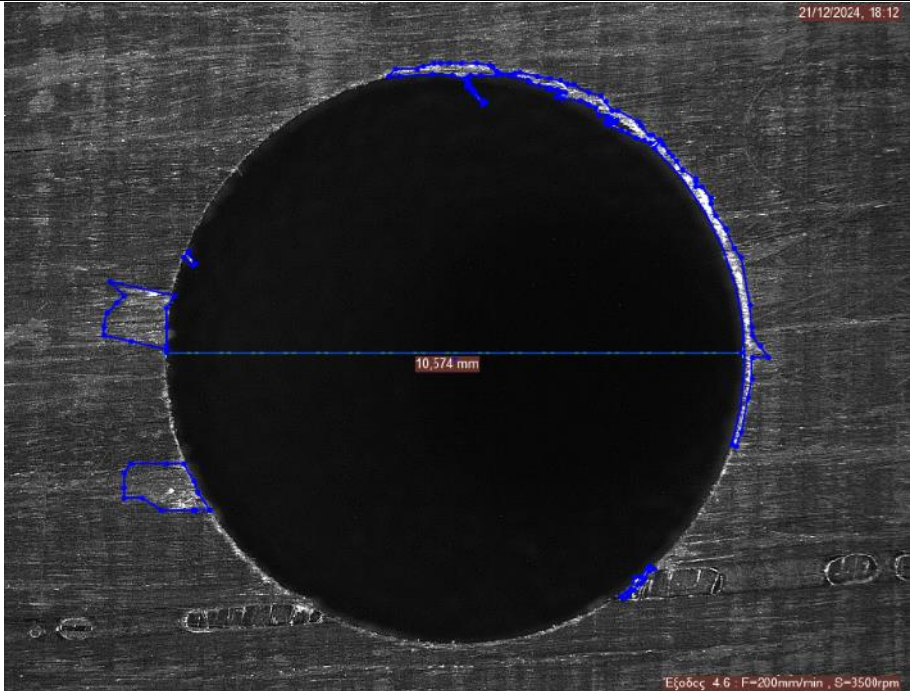
Πίνακας 4.16. Πείραμα 4.4 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$  ,  $S=2500\text{rpm}$

Πείραμα 4.4	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.584
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	2.584
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
1.821	0.830
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.870	3.521

Πίνακας 4.17. Πείραμα 4.5 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$  ,  $S=3000\text{rpm}$

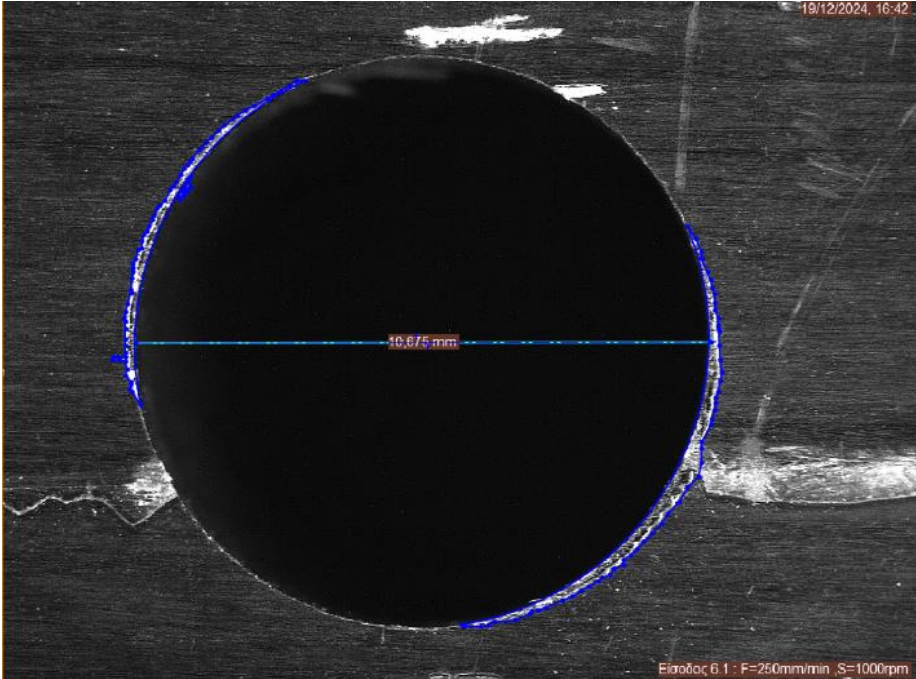
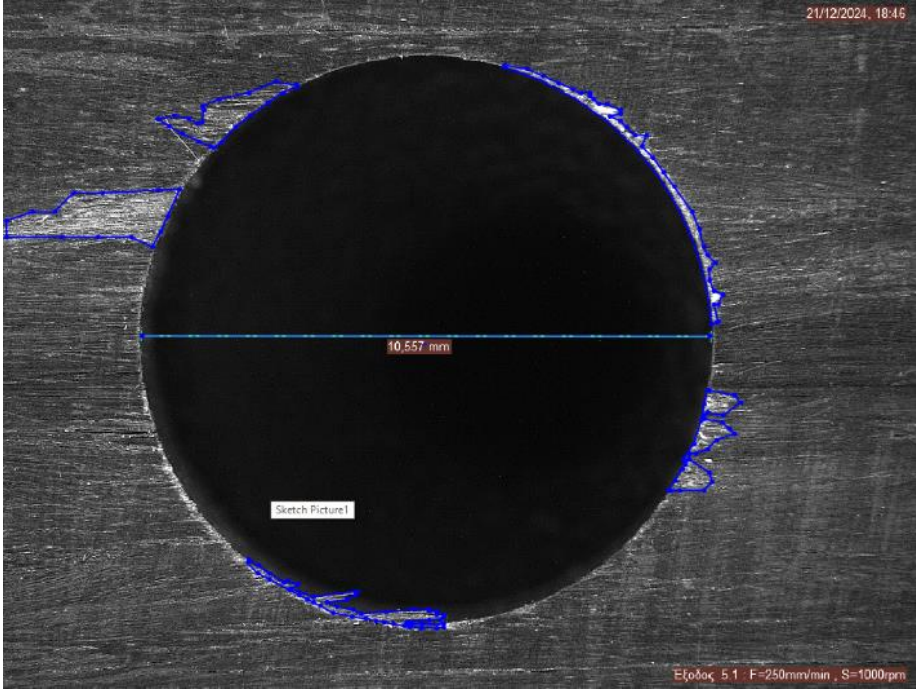
Πείραμα 4.5	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.890
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.068	2.958
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	1.317
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.163	2.48

Πίνακας 4.18. Πείραμα 4.6 με συνθήκες κοπής  $F=200\text{mm/min}$ ,  $S=3500\text{rpm}$

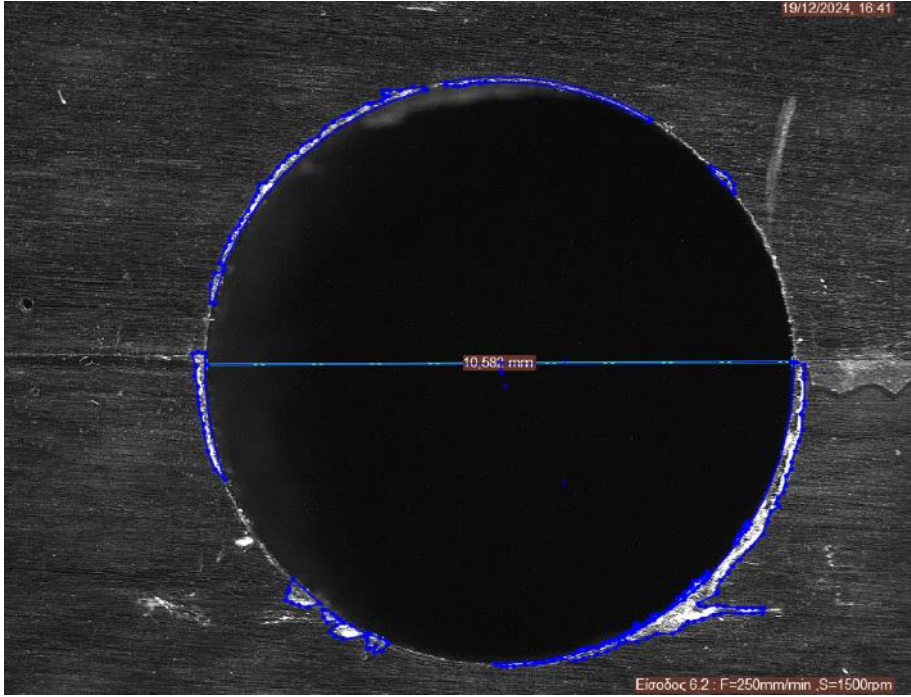
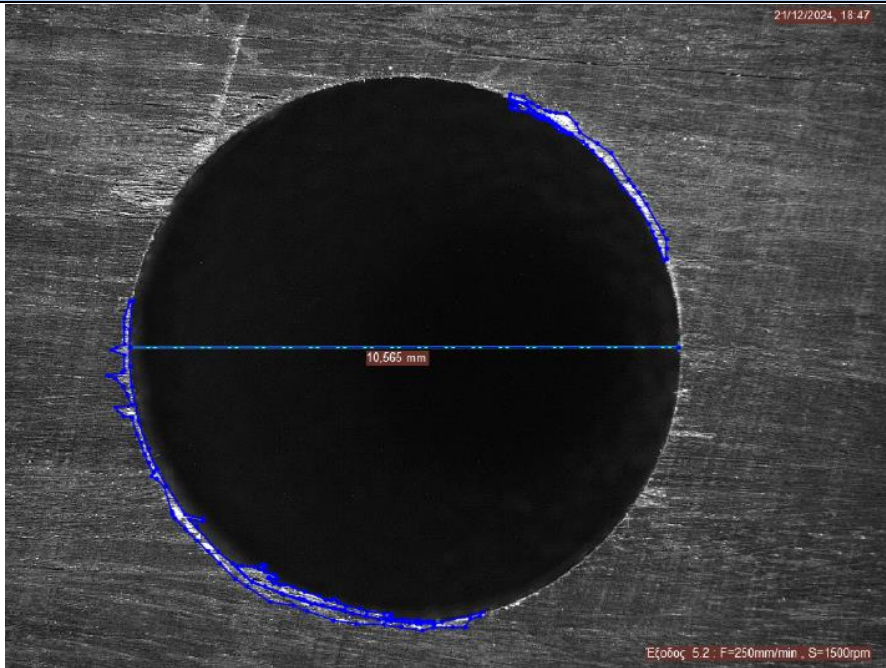
Πείραμα 4.6	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	4.110
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	4.110
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
2.061	1.045
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.008	4.114



Πίνακας 4.19. Πείραμα 5.1 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=1000\text{rpm}$

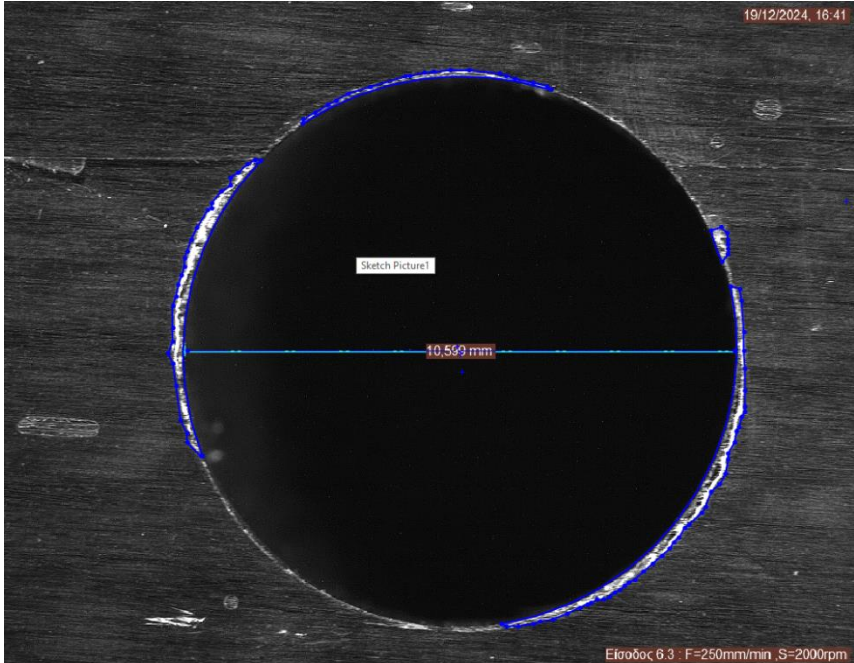
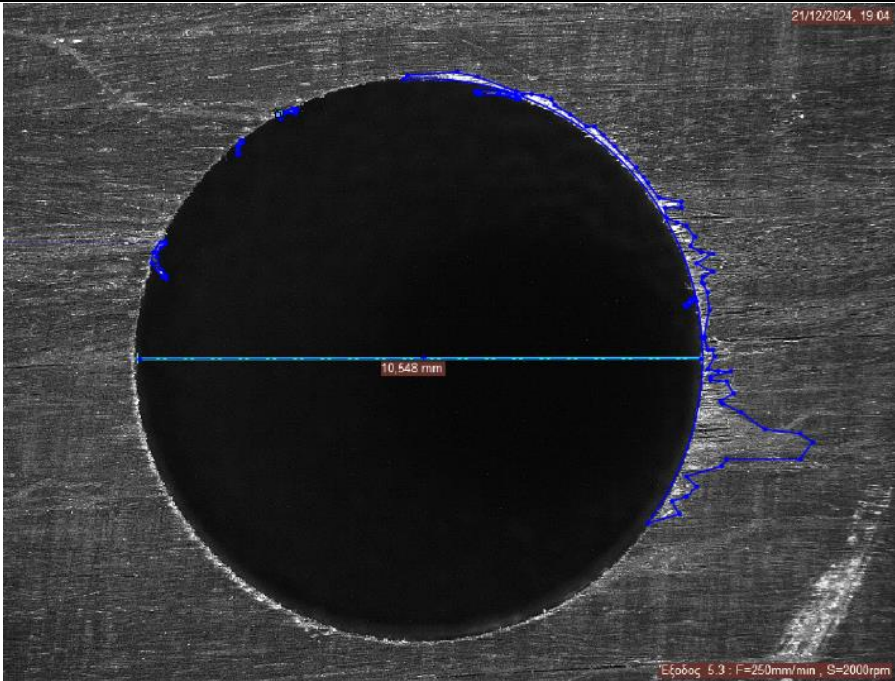
Πείραμα 5.1	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3.131
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.025	3.156
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
3.975	0.980
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.656	5.611

Πίνακας 4.20. Πείραμα 5.2 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=1500\text{rpm}$

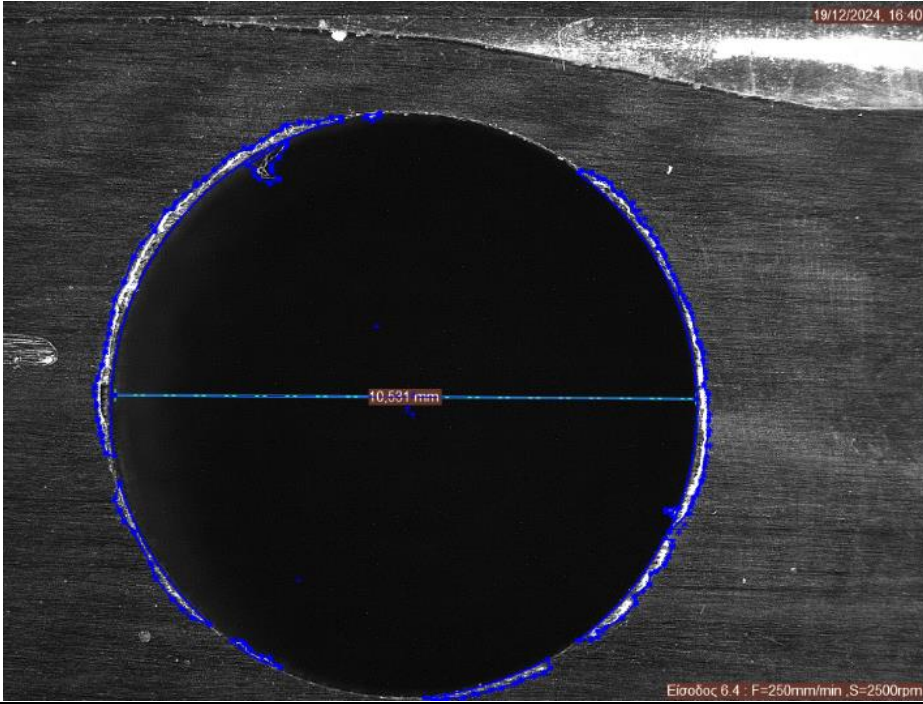
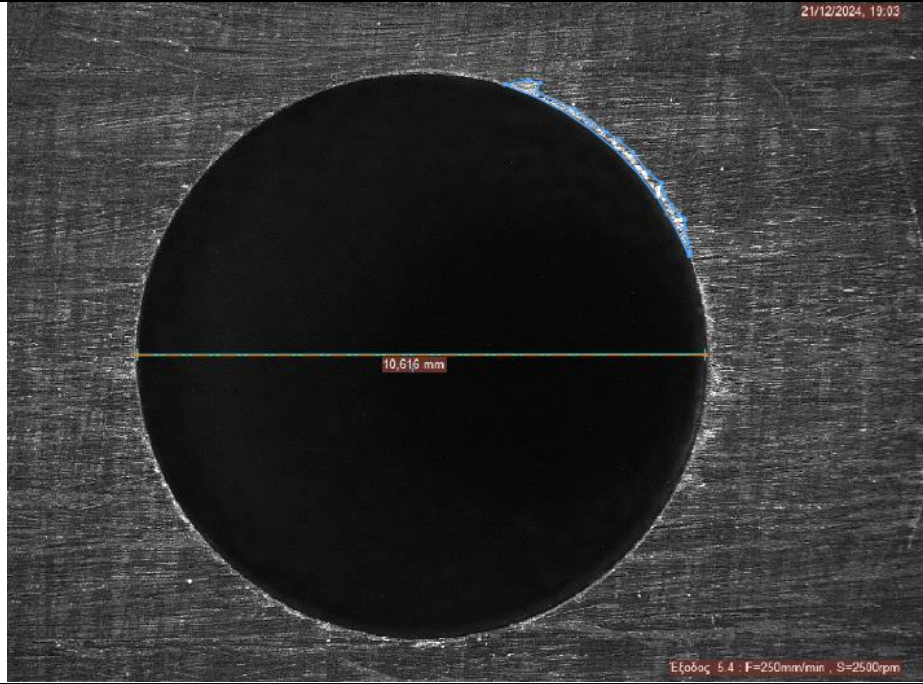
Πείραμα 5.2	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3.692
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	3.692
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	2.296
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.499	2.795



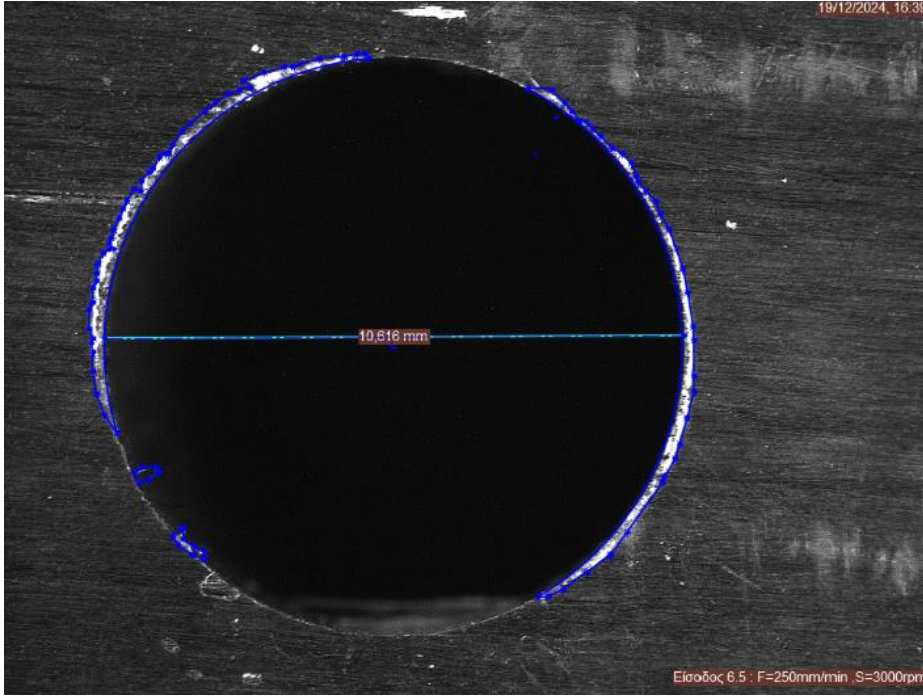
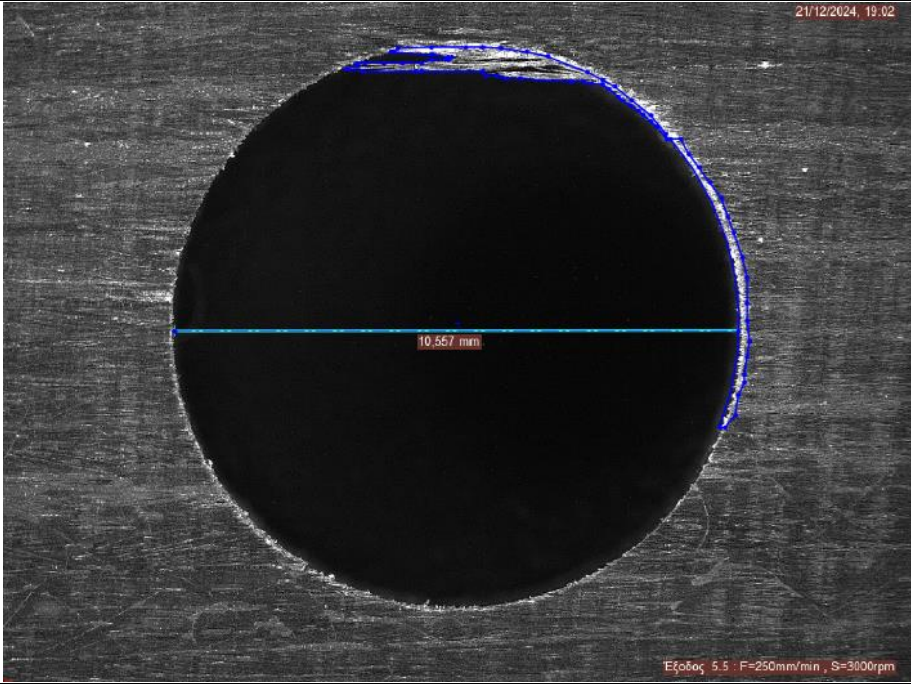
Πίνακας 4.21. Πείραμα 5.3 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=2000\text{rpm}$

Πείραμα 5.3	
Είσοδος σπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	3.695
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	3.695
Έξοδος σπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
2.490	1.170
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.140	3.800

Πίνακας 4.22. Πείραμα 5.4 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=2500\text{rpm}$

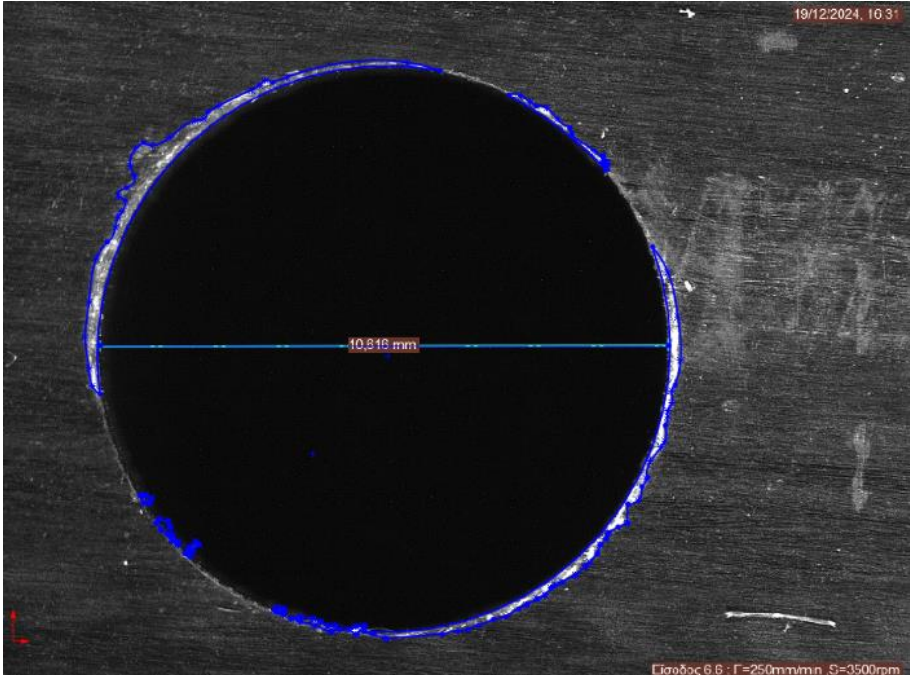
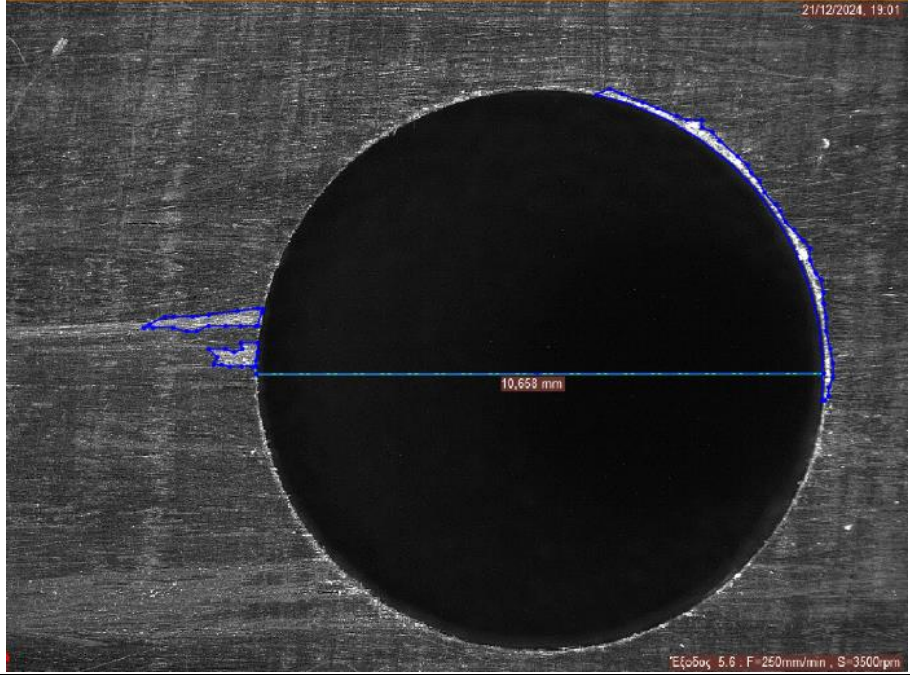
Πείραμα 5.4	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	4.270
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.237	4.507
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.710
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0	0.710

Πίνακας 4.23. Πείραμα 5.5 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=3000\text{rpm}$

Πείραμα 5.5	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	4.101
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.191	4.292
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	0.949
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
1.747	2.696



Πίνακας 4.24. Πείραμα 5.6 με συνθήκες κοπής  $F=250\text{mm/min}$  ,  $S=3500\text{rpm}$

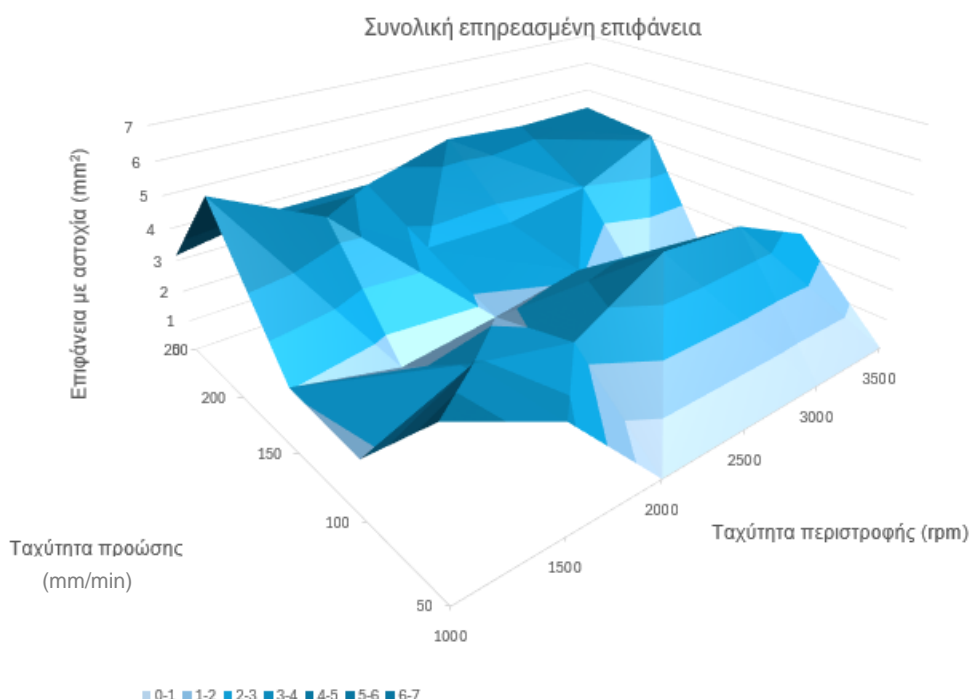
Πείραμα 5.6	
Είσοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0	4.106
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.226	4.332
Έξοδος οπής	
	
Επιφάνεια με αποκόλληση	Επιφάνεια απόληξης
0.78	1.270
Επιφάνεια άκοπτων ινών	Συνολικά επηρεασμένη επιφάνεια
0.016	2.066

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 5.1. Συμπεράσματα

**Πειραματικά αποτελέσματα:** Μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν είναι δυνατή η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για την επίδραση των παραμέτρων της ταχύτητας περιστροφής και της πρόωσης στις αστοχίες που προκύπτουν κατά τη διάτρηση πολυμερούς ινοπλισμένου με άνθρακόνημα. Παράλληλα είναι δυνατή η εξαγωγή της βέλτιστης ποιότητας οπής.

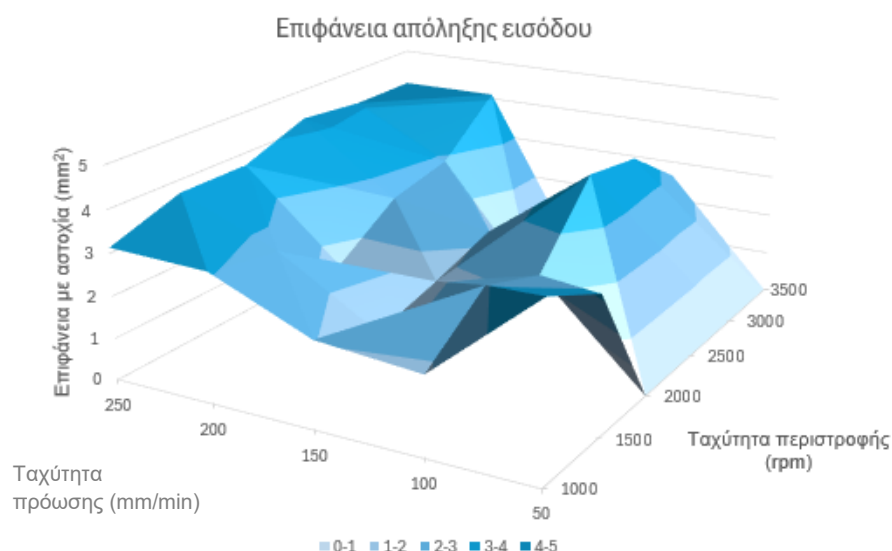
Συγκεκριμένα για την είσοδο της οπής, αθροίζοντας τις αστοχίες της εκάστοτε οπής και δημιουργώντας τρισδιάστατη γραφική παράσταση παρατηρείται ότι οι βέλτιστες συνθήκες κοπής προκύπτουν για  $F=150\text{mm/min}$  και  $S=1500\text{rpm}$  έχοντας επιφάνεια με αστοχία μόλις  $1.315\text{mm}^2$  ή  $1,67\%$  της ονομαστικής διαμέτρου της οπής (σχήμα 5.1) .



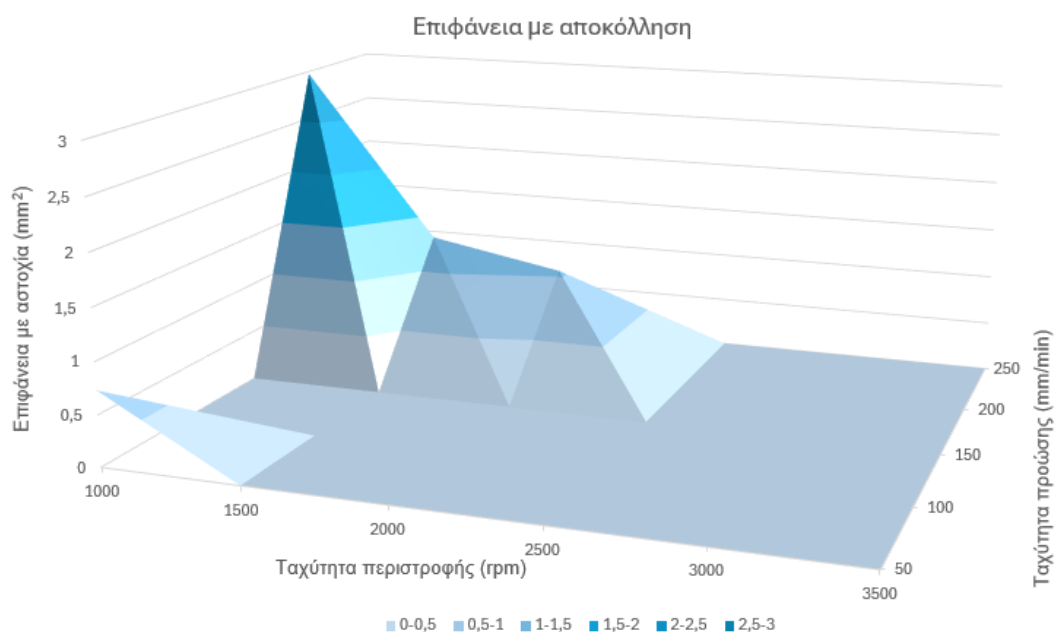
Σχήμα 5.1. Γράφημα για τη συνολική επηρεασμένη επιφάνεια στην είσοδο των οπών

Παράλληλα φαίνεται ότι για πρόωση  $F=150\text{mm/min}$  παράγεται η καλύτερη ποιότητα οπής συγκριτικά με χαμηλότερη ή υψηλότερη πρόωση. Έχοντας υψηλότερη πρόωση αυξάνεται η δημιουργία απόληξης διάτρησης λόγω της υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής που απαιτείται, καθώς αν δεν αυξηθεί η ταχύτητας περιστροφής αυξάνεται ο κίνδυνος αποκόλλησης των στρώσεων λόγω της υψηλής δύναμης ώθησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 και σχήμα 5.3. Να σημειωθεί ότι η περίπτωση που υπάρχει αποκόλληση πάνω στην περιοχή της απόληξης έχει ταξινομηθεί στα διαγράμματα ως αστοχία απόληξης. Με χαμηλότερη πρόωση δημιουργείται μία περιοχή με υψηλή θερμοκρασία στην περιοχή της διάτρησης που έχει ως αποτέλεσμα να καταστρέφεται η μήτρα (ρητίνη) του σύνθετου υλικού.



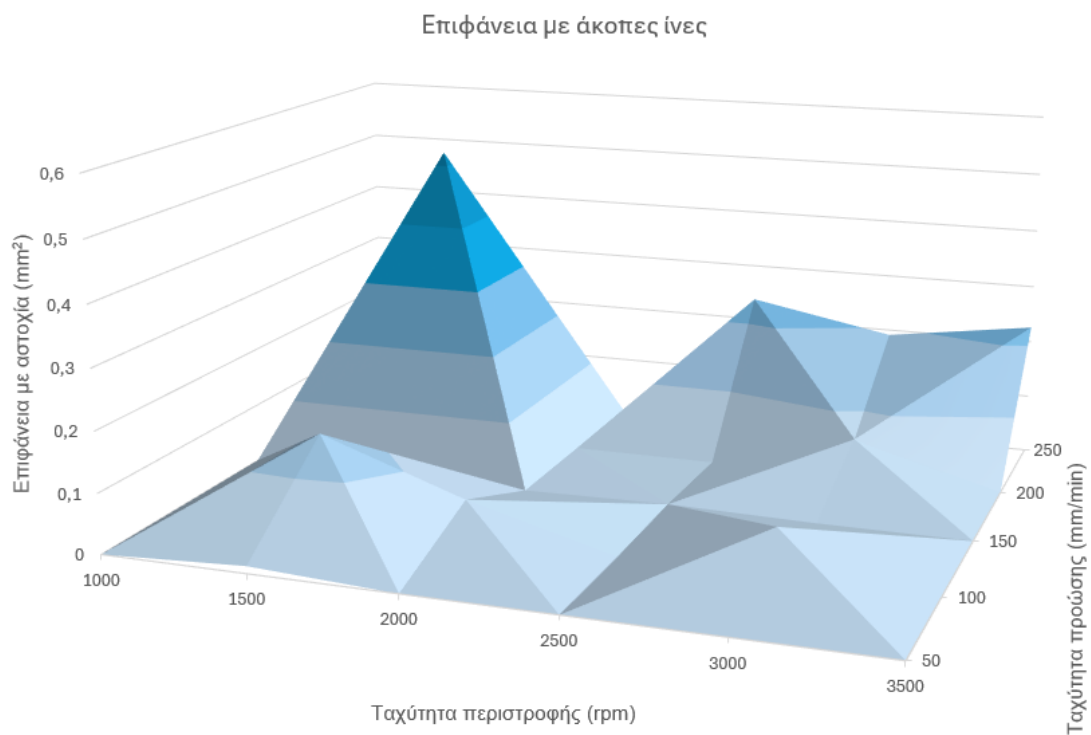


Σχήμα 5.2. Γράφημα για την επιφάνεια απόληξης στην είσοδο των οπών



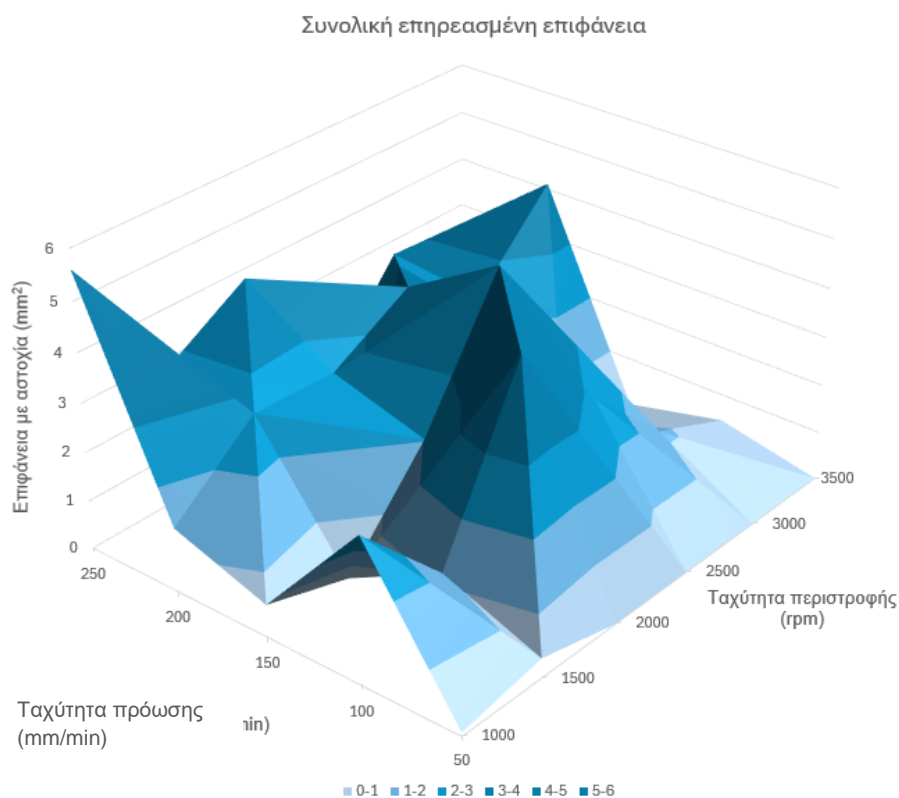
Σχήμα 5.3. Γράφημα για την επιφάνεια με αποκόλληση στην είσοδο των οπών

Τέλος η επιφάνεια με άκοπες ίνες φαίνεται να ελαχιστοποιείται για  $F=150\text{mm/min}$  και να αυξάνεται με την αύξηση της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής και σε αυτήν την αστοχία συμβάλλει στην καταστροφή της μήτρας, γεγονός που αφήνει τις ίνες χωρίς στήριξη με αποτέλεσμα να κάμπτονται ελαστικά, αντί για να αφαιρούνται (σχήμα 5.4).

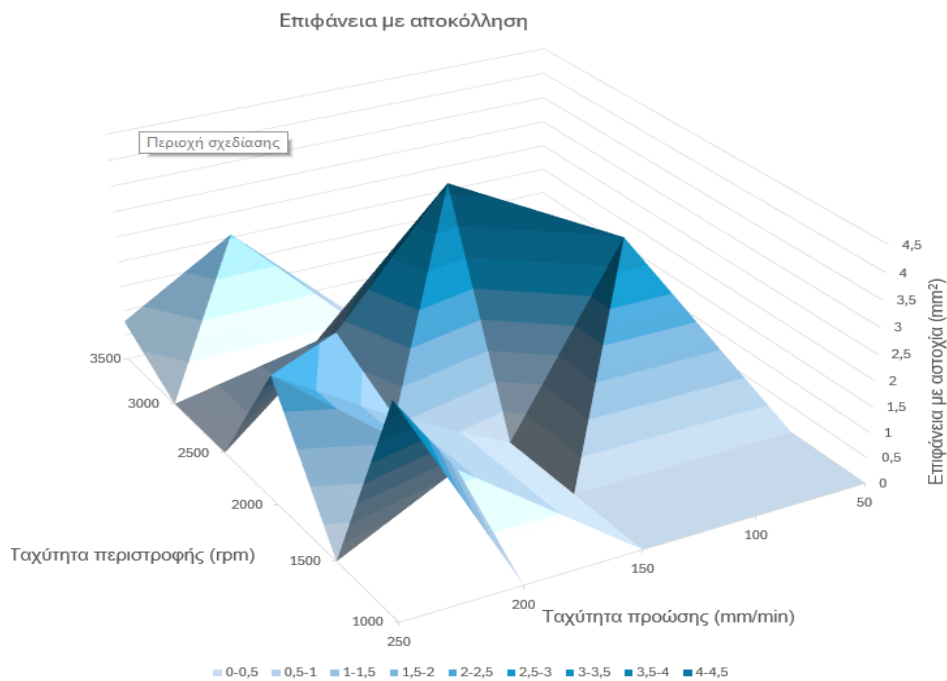


Σχήμα 5.4. Γράφημα για την επιφάνεια με άκοπες ίνες στην είσοδο των οπών

Για την έξοδο της οπής, με την ίδια μέθοδο για την είσοδο της οπής οι βέλτιστες συνθήκες κοπής προκύπτουν για  $F=150\text{mm/min}$  και  $S=1500\text{rpm}$  έχοντας επιφάνεια με αστοχία μόλις  $0.141\text{mm}^2$  ή  $0.179\%$  της ονομαστικής διαμέτρου της οπής (σχήμα 5.5).

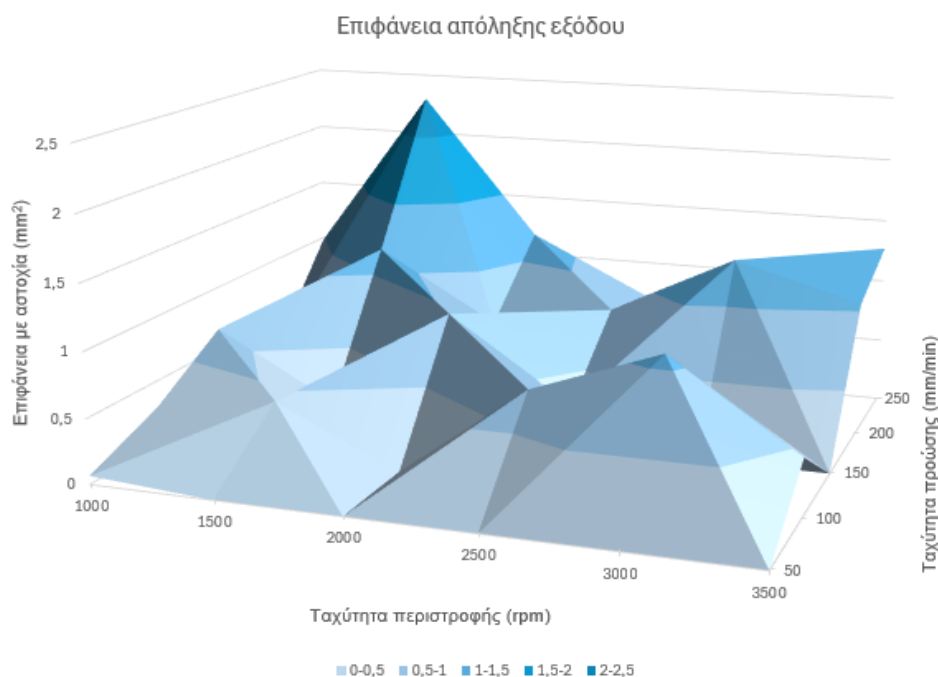


Σχήμα 5.5. Γράφημα για τη συνολική επηρεασμένη επιφάνεια στην έξοδο των οπών



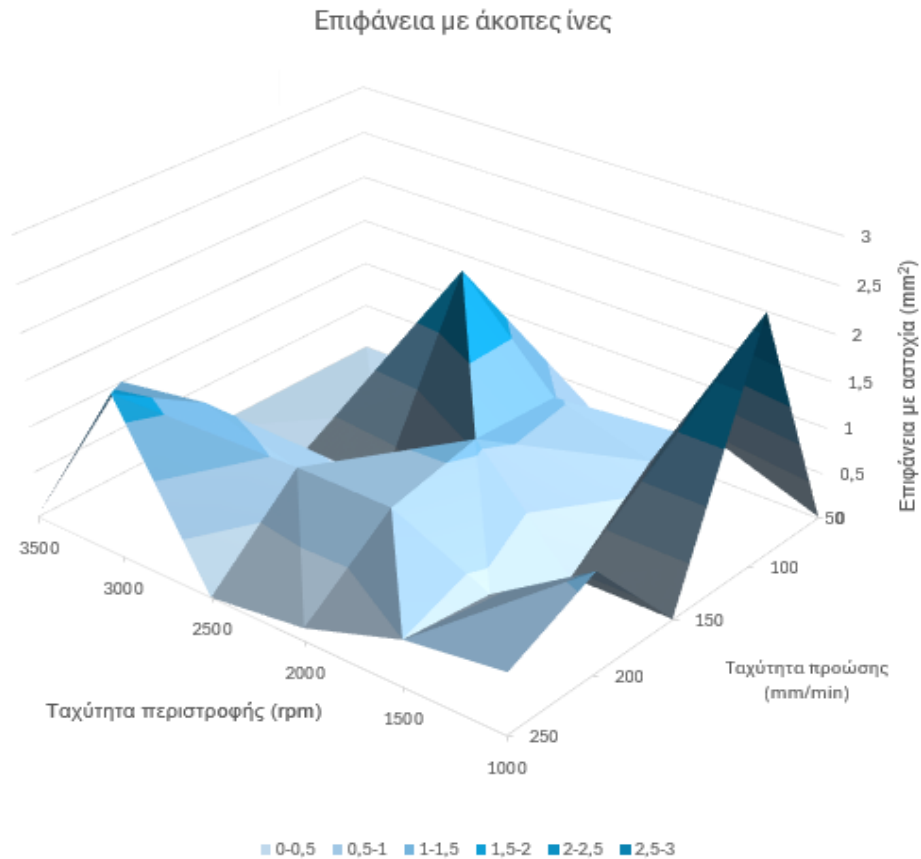
Σχήμα 5.6. Γράφημα για την επιφάνεια με αποκόλληση στην έξοδο των οπών

Στο παραπάνω σχήμα 5.6 φαίνεται ότι η ελαχιστοποίηση της αποκόλλησης στην έξοδο των οπών προκύπτει στις χαμηλές προώσεις και αυτό λόγω της χαμηλής δύναμης ώθησης. Έτσι η βέλτιστη πρόωση είναι  $F=150\text{mm/min}$  και η ταχύτητα περιστροφής είναι  $S=1500\text{rpm}$  καθώς από εκείνη την ταχύτητα και πάνω λόγω υψηλής θερμοκρασίας δημιουργείται καταστροφή της μήτρας, και αποκόλληση των στρώσεων. Ομοίως για μεγαλύτερες προώσεις, για να μειωθεί η ταχύτητα ώθησης, πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής γεγονός που δημιουργεί τα προαναφερθέντα προβλήματα.



Σχήμα 5.7. Γράφημα για την επιφάνεια απόλξης στην έξοδο των οπών

Όσον αφορά τη δημιουργία απόληξης στην έξοδο της οπής (σχήμα 5.7) φαίνεται ότι αυξάνοντας την πρόωση και την ταχύτητα κοπής αυξάνεται και το μέγεθος της αστοχίας. Τα βέλτιστα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη αστοχία βρέθηκαν για  $F=100\text{mm/min}$  και  $S=2000\text{rpm}$  και τα αμέσως επόμενα για  $F=150\text{mm/min}$  και  $S=1500\text{rpm}$ . Αυξάνοντας την ταχύτητα περιστροφής σε αυτές τις προώσεις μεγαλώνει η επιφάνεια με αστοχία.



Σχήμα 5.8. Γράφημα για την επιφάνεια με άκοπες ίνες στην έξοδο των οπών

Τέλος η ελάχιστη επιφάνεια με άκοπες ίνες στην έξοδο οπής εντοπίστηκε στις συνθήκες κοπής  $F=150\text{mm/min}$  και  $S=1500\text{rpm}$  με μηδενική επηρεασμένη επιφάνεια. Στις χαμηλότερες στροφές το πρόβλημα παραμένει μηδαμινό όμως με την αύξηση των στροφών η αστοχία φαίνεται να μεγαλώνει. Παράλληλα με μεγαλύτερες ή μικρότερες προώσεις παράγεται χειρότερη τελική επιφάνεια ανεξαρτήτως της ταχύτητας περιστροφής όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.

## 5.2 Προοπτικές

Στην παρούσα εργασία οι προοπτικές εξέλιξης αφορούν την περαιτέρω μελέτη και προσομοίωση του πειράματος. Συγκεκριμένα θα μπορούσαν να διεξαχθούν παραπάνω πειράματα πάνω στη διάτρηση με διαφορετικά κοπτικά εργαλεία, διαφορετικές κατεργασίες όπως η συμβατική διάτρηση αλλά με εξελεγμένα κοπτικά εργαλεία.

Όσον αφορά το ελικοειδές φραιζάρισμα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας, θα είχε όφελος να διεξαχθεί πείραμα με διάφορα βάθη κοπής που εκτελούνται ανά επανάληψη στη διαδικασία του φραιζαρίσματος. Δηλαδή στον προγραμματισμό του G-Code το βάθος κοπής ανά βήμα να είναι 3mm μέχρι το τελικό επιθυμητό βάθος της οπής. Έπειτα για την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας θα μπορούσαν να εξεταστούν μεταβλητές συνθήκες κοπής για την είσοδο και έξοδο της οπής.

Τέλος με την βοήθεια λογισμικού πετρερασμένων στοιχείων θα είχε όφελος να δημιουργηθεί η προσομοίωση της κατεργασίας ώστε να μπορεί προσφερθεί η δυνατότητα εύρεσης των βέλτιστων συνθηκών κοπής με το ελάχιστο κόστος και χρόνο για τον κάθε ερευνητή και την κάθε βιομηχανία.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ISLAM SAAD ELSAYED MOHAMED SHYHA, DRILLING OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC COMPOSITES, PHD, University of Birmingham, 2010, <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/1353/5/Shyha10PhD.pdf>
- [2] Feras Korkees , Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review, POLYMER - PLASTICS TECHNOLOGY AND MATERIALS 2023, Volume 62, No. 14, pag.1789–1822, <https://doi.org/10.1080/25740881.2023.2234461>
- [3] Χαρίκλεια Ευσταθίου, Πειραματική μελέτη και προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της δημιουργίας απόληξης (burr) στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεταπτυχιακή εργασία, 2015
- [4] Αχιλλέας Παππάς, Προσδιορισμός συντελεστών δυνάμεων κοπής στη διάτρηση σε αλουμίνιο AL7075, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική εργασία, 2012. <http://artemis.library.tuc.gr/DT2013-0153/DT2013-0153.pdf>
- [5] P. Jagadeesh et al, Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review, Heliyon Volume 9, Issue 3, e14428, March 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14428>
- [6] C Murphy, G Byrne, and M D Gilchrist, The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials, Institution of mechanical engineers, Volume 216, Issue 2, 2002, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/0954405021519735>
- [7] Wen-Chou Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 37, Issue 8, August 1997, pag. 1097-1108, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)
- [8] C Murphy, G Byrne, and M D Gilchrist, The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials, Institution of mechanical engineers, Volume 216, Issue 2, 2002, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/0954405021519735>
- [9] X. Wang et al, Tool wear of coated drills in drilling CFRP, Journal of Manufacturing Processes 15 (2013) 127–135, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.019>
- [10] A. Sadek a , M. Meshreki b , M.H. Attia, Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates , CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 61, Issue 1, 2012, pag. 123-126, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.089>
- [11] [https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/Composite\\_material\\_machining\\_guide\\_Aerospace.pdf](https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/Composite_material_machining_guide_Aerospace.pdf)
- [12] Wolfgang Hintze, Dirk Hartmann, Christoph Schütte, Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An

experimental study, *Composites Science and Technology* 71 (2011) 1719-1726.  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.002>

[13] SLAM SAAD ELSAYED MOHAMED SHYHA, DRILLING OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC COMPOSITES, PHD, University of Birmingham, 2010,  
<https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/1353/5/Shyha10PhD.pdf>

[14] D. Iliescu a, D. Gehin a, I. Iordanoff, F. Girot , M.E. Gutiérrez b, A discrete element method for the simulation of CFRP cutting, *Composites Science and Technology* 70 (2010) 73–80, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.007>

[15] Alessandro Abena, Khamis Essa, 3D micro-mechanical modelling of orthogonal cutting of UD-CFRP using smoothed particle hydrodynamics and finite element methods, *Composite Structures* 218, 2019, pag. 174–192,  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.037>

[16] Wolfgang Hintze, Rolf Clausen, Christoph Schütte, Kristoffer Kroll, Evaluation of the total cutting force in drilling of CFRP: a novel experimental method for the analysis of the cutting mechanism, *Production Engineering*, 2018, 12, pag. 431–440,  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11740-018-0807-2.pdf>

[17] Daxi Genga, Yihang Liua, Zhenyu Shaoa, Zhenghui Lua, Jun Caia, Xun Lia, Xinggang Jianga, Deyuan Zhang, Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review, *Composite Structures* Volume 216, 15 May 2019, pag. 168-186, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>

[18] Goh Kai Ze, A. Pramanik, A.K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, N. Radhika, Challenges associated with drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites-A review, *Composites Part C: Open Access*, Volume 11, July 2023, 100356,  
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100356>

[19] H. Ho-Cheng, C. K. H. Dharan, Delamination During Drilling in Composite Laminates, *Journal of manufacturing Science of Engineering*, Aug 1990, 112(3), pag. 236-239,  
<https://doi.org/10.1115/1.2899580>

[20] Wen-Chou Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 37, Issue 8, August 1997, pag. 1097-1108,  
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)

[21] Ali Faraz, Dirk Biermann, Klaus Weinert, Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issue 15, December 2009, pag. 1185-1196,  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002>

[22] Daniel Istvan Poor , Norbert Geier , Csongor Pereszlai, Jinyang X, A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterization and challenges, *Composites Part B: Engineering* Volume 223, 15 October 2021, 109155,  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>

- [23] Jinyang Xu, Qinglong An, Ming Chen, A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP, *Composite Structures* Volume 117, November 2014, pag. 71-82, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.034>
- [24] Fei Su, Juntang Yuan, Fujian Sun, Zhenhua Wang & Zhaohui Deng, Analytical cutting model for a single fiber to investigate the occurrences of the surface damages in milling of CFRP, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 96, pag. 2671–2685, (2018), <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-1797-0>
- [25] Robert Voss, Lukas Seeholzer, Friedrich Kuster, Konrad Wegener, Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Volume 18, August 2017, pag. 75-91, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>
- [26] Norbert Geier, J. Paulo Davim, Tibor Szalay, Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 125, October 2019, 105552 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>
- [27] Naohiko Sugita, Liming Shu, Katsuyo Kimura, Giichi Arai, Koichi Arai, Dedicated drill design for reduction in burr and delamination during the drilling of composite materials, *CIRP Annals* Volume 68, Issue 1, 2019, pag. 89-92, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.094>
- [28] Robert Voß, Marcel Henerichs, Stephan Rupp, Friedrich Kuster, Konrad Wegener, Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* ,Volume 12, January 2016, pag. 56-66, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.09.003>
- [29] Dieter Meinhard, Andreas Haeger, Volker Knoblauch, Drilling induced defects on carbon fiber-reinforced thermoplastic polyamide and their effect on mechanical properties, *Composite Structures* Volume 256, 15 January 2021, 113138, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113138>
- [30] Daxi Geng, Yihang Liu, Zhenyu Shao, Zhenghui Lu, Jun Cai, Xun Li, Xinggang Jiang, Deyuan Zhang, Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review, *Composite Structures* Volume 216, 15 May 2019, pag. 168-186, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>
- [31] Geier, N., Pereszalai, C. "Analysis of Characteristics of Surface Roughness of Machined CFRP Composites", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(1), pag. 67–80, 2020, <https://doi.org/10.3311/PPme.14436>
- [32] Changying Wang, Gongyu Liu, Qinglong An, Ming Chen, Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates, *Composites Part B: Engineering* Volume 109, 15 January 2017, pag. 10-22 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.015>
- [33] Wen-Chou Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 37, Issue 8, August 1997, pag. 1097-1108, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)

[34] K. Weinert, C. Kempmann, Cutting Temperatures and Their Effects on the Machining Behaviour in Drilling Reinforced Plastic Composites, *Advanced Engineering Materials*, Volume6, Issue8, August, 2004, pag. 684-689, <https://doi.org/10.1002/adem.200400025>