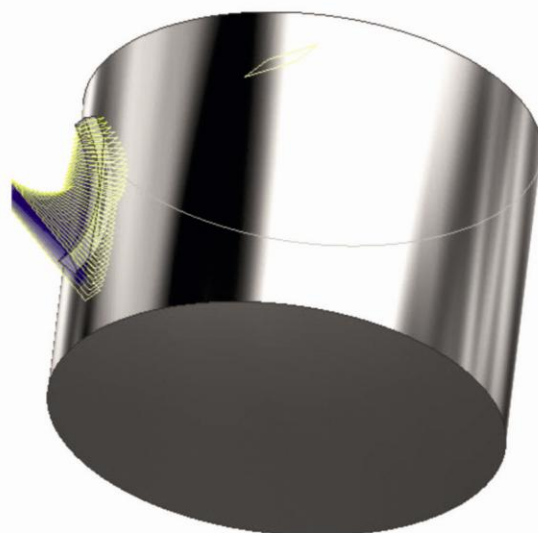
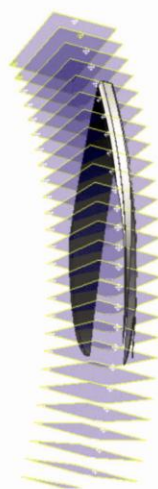




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΒΛΙΤΤΩΝ ΣΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ



**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΒΑΛΚΑΝΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

**Στους γονείς μου
Στέλιο και Ελευθερία
και στην αδελφή μου
Χριστίνα.**

Η επιστημονική έρευνα αποτελεί μια από τις ποικίλες οδούς προς τη γνώση εν γένει και επιστέγασμα της επιστημονικής έρευνας δεν είναι άλλο, από τη φυσική ή νοητική υλοποίηση ή ακόμη την απόδειξη της υπόστασης, του αντικείμενου της έρευνας. Απώτερος στόχος της εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας είναι η απόκτηση γνώσης. Όταν στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας συμπεριληφθεί και η υλοποίηση του αντικείμενου έρευνας τότε το όλο εγχείρημα χαρακτηρίζεται από μια σχετικά δύσκολη προς επίτευξη κατάσταση, αυτήν της πληρότητας.

Θεωρώ πως μέσα από την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατάφερα να αγγίξω την προαναφερθείσα κατάσταση της πληρότητας και η αίσθηση που αποκόμισα τη στιγμή εκείνη, αποτέλεσε την ανταμοιβή μου για το μόχθο που κατέβαλα. Πέραν όμως από την προσωπική ικανοποίηση θέλω να πιστεύω πως με την εργασία μου αυτή αφήνω στη σχολή αλλά και σε οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο ένα σχετικά απλό στη χρήση και αξιόπιστο εργαλείο.

Πρέπει όμως να σημειωθεί πως ένα πολύ μεγάλο μέρος των επιτευγμάτων της εργασίας αυτής δεν θα είχε υπόσταση χωρίς τη βοήθεια συγκεκριμένων ανθρώπων. Ανθρώπων υπεύθυνων και ευσυνείδητων που δε δίστασαν να προσφέρουν τον προσωπικό τους χρόνο και την εργασία τους, προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μου όπως και της εργασίας άμεσα και έγκαιρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, όλους τους καθηγητές και συμφοιτητές μου για τις γνώσεις, τις συμβουλές, τις εμπειρίες αλλά και τον χρόνο που μοιράστηκαν μαζί μου αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αντωνιάδη Αριστομένη και τον υποψήφιο Διδάκτωρ κ. Νικόλαο Ταπόγλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου έδωσαν σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και γιατί με τον τρόπο που εργάζονται μου υπενθύμισαν ότι πολλές φορές αξίζει να κάνουμε πράγματα επειδή έχουν ουσία και όχι επειδή απλώς πρέπει. Ειλικρινά τους ευχαριστώ πολύ γι' αυτό. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένειά μου για την κάθε είδους στήριξη που μου δίνουν χωρίς να περιμένουν το παραμικρό από μένα.

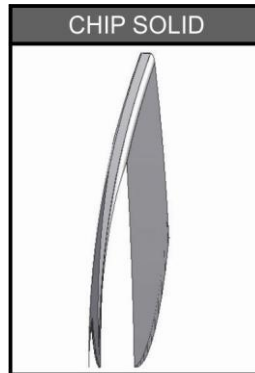
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	6
2.1 Οδοντωτοί τροχοί	6
2.2 Τύποι οδοντωτών τροχών	8
2.2.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί	8
2.2.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί	8
2.2.3 Οδοντωτός κανόνας	9
2.2.4 Σύστημα ατέρμονα - κορώνας	9
2.2.5 Επικυκλική οδόντωση	9
2.3 Υλικά κατασκευής	9
2.3.1 Υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών	9
2.3.2 Υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων	10
2.4 Μέθοδοι κατασκευής οδοντώσεων	11
2.4.1 Κοπή οδοντώσεων με ηλεκτροδιάβρωση	11
2.4.2 Διαδικασία κατασκευής μέσω κονιομεταλλουργίας	11
2.4.3 Δημιουργία οδοντώσεων με χύτευση	11
2.4.4 Κοπή οδοντώσεων σε κοινή φρεζομηχανή (GEAR MILLING)	12
2.4.5 Κοπή οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση (FELLOWS)	12
2.4.6 Κοπή οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση	13
2.4.7 Κοπή οδοντώσεων με κοπτικούς οδοντικούς κανόνες	15
2.4.8 Κοπή οδοντώσεων με κοπτικούς ατέρμονες κοχλίες	15
2.4.9 Δημιουργία οδοντωτών τροχών με έλαση - διέλαση	16
2.5 Διαδικασίες αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών	16
2.5.1 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με λείανση (GRINDING)	17
2.5.2 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με την μεθοδο SHAVING	17
2.5.3 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με LAPPING	18
2.6 Συνοπτικά	18
3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	19
3.1 Γλώσσα και περιβάλλον προγραμματισμού	19
3.2 Application programming interface	19
3.3 Visual basic for applications (VBA)	20
3.4 Δυνατότητες λογισμικού	20
3.5 Αρχεία εισόδου – Εκκίνηση λογισμικού	20
3.5.1 Αρχεία εισόδου	20
3.5.2 Εκκίνηση λογισμικού	21
3.6 Αρχεία εξόδου	23
3.7 Προγράμματα παρουσίασης αποτελεσμάτων	23
3.7.1 Κατασκευή καμπυλών μεταβολής γεωμετρίας αποβλήτου	23
3.7.2 Παρουσίαση καμπυλών μεταβολής γεωμετρίας αποβλήτου	24
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	24
4.1 Δημιουργία τομών στο απόβλιττο	24
4.2 Διαδικασία αντιγραφής στο απόβλιττο	27
4.3 Διαδικασία fixing	28
4.4 Προσδιορισμός πάχους κοπής στο απόβλιττο (thickness)	28
4.4.1 Προσδιορισμός των sketch entities του δοντιού	30
4.4.2 Προσδιορισμός των sketch entities στις θέσεις περιστροφής του αποβλήτου	32
4.4.3 Υπολογισμός πάχους κοπής (thickness)	34
4.5 Διαδικασία διαίρεσης του αποβλήτου (split)	36
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	38
6. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	54
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	56

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

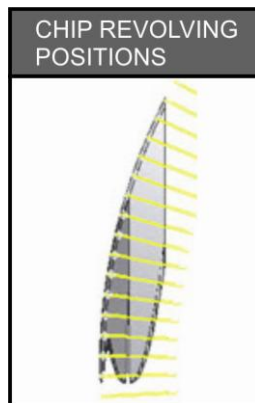
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται λογισμικό πρόγραμμα το οποίο δημιουργήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κοπής οδοντωτών τροχών με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού VISUAL BASIC μέσα από περιβάλλον προγραμματισμού εφαρμογών (APPLICATION PROGRAMMING INTERFACE) ενός συστήματος CAD (AUTODESK INVENTOR).

Το παρόν λογισμικό πραγματοποιεί συγκεκριμένη διαδικασία γεωμετρικής ανάλυσης κάνοντας χρήση στερεών μοντέλων αποβλίπτων οδοντωτών τροχών (Σχήμα 1.1), τα οποία προκύπτουν από λογισμικό προσομοίωσης. Η διαδικασία αυτή εστιάζεται σε επίπεδα κάθετα του αποβλίπτου, σαρώνοντας σε κάθε θέση περιστροφής για όλες τις θέσης κύλισης.



Σχήμα 1.1: Στερεό μοντέλο αποβλίπτου

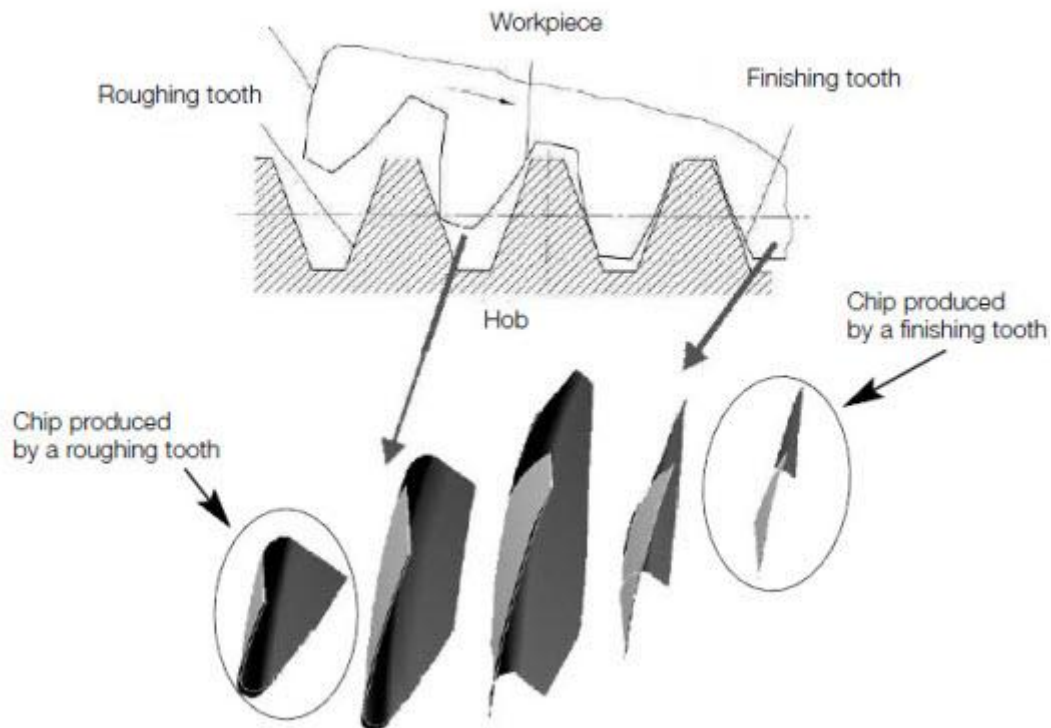
Η συνολική γεωμετρική ανάλυση εκτελείται με τον προσδιορισμό εμβαδού επιφανειών μέσω δημιουργίας τομών καθέτων στο απόβλιπτο (για κάθε θέση περιστροφής) και με την εύρεση μεγίστου και ελαχίστου πάχους κοπής σε όλες τις θέσεις περιστροφής του εκάστοτε αποβλίπτου προς επεξεργασία (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Θέσεις περιστροφής

Επιπλέον υποπρόγραμμα του κυρίως λογισμικού χρησιμοποιείται για την εκτέλεση τομών (SPLIT) και συναρμολόγησης (ASSEMBLY) στο προς επεξεργασία απόβλιπτο για την εικονική του παρουσίαση στα μέρη ανάλυσής του.

Το συγκεκριμένο λογισμικό προσδιορισμού γεωμετρίας δύναται να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε στερεό μοντέλο αποβλίπτου εφόσον έχει προκύψει με αντίστοιχη μέθοδο προσομοίωσης κατά την διαδικασία της κοπής. Τα απόβλιπτα που εισάγονται για ανάλυση προέρχονται από προσομοίωση κοπής με την μέθοδο φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντωτών τροχών (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Ανάπτυξη αποβλήτου σε διαδικασία κοπής

Σκοπός του λογισμικού αυτού είναι η βελτιστοποίηση των συνθηκών κατά την διαδικασία κοπής κατόπιν μελέτης της γεωμετρίας του αποβλήτου (τομές αποβλήτου, διαίρεση βάθους κοπής, συνθήκες διεύθυνσης). Για την αποφυγή ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών στο τεμάχιο κατεργασίας και κατά συνέπεια αστοχία του κοπτικού εργαλείου, επιδιώκουμε ευνοϊκότερη δημιουργία αποβλήτου, καλύτερη μορφή, καλύτερη επιφάνεια τεμαχίου μείωση των δυνάμεων κοπής, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Διαγράμματα και γραφήματα έπειτα από την διεξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων μέτρησης πάχους κοπής του αποβλήτου, κατασκευαστήκαν με τη βοήθεια του προγράμματος GRAPHER 4 και MICROSOFT OFFICE EXCEL 2007. Για την παρουσίαση αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα COREL DRAW X5.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Οδοντωτοί τροχοί

Ο οδοντωτός τροχός είναι συνήθως ένας ολόσωμος κύλινδρος ή δίσκος ή τροχός με βραχίονες. Πολλές φορές ο δίσκος έχει τρύπες για μείωση του βάρους του γραναζιού. Στο κέντρο του γραναζιού υπάρχει η πλήμνη (ομφαλός σύνδεσης με την άτρακτο), που έχει κατάλληλο αυλάκι για τη σφήνα, και στην περιφέρειά του η οδόντωση.

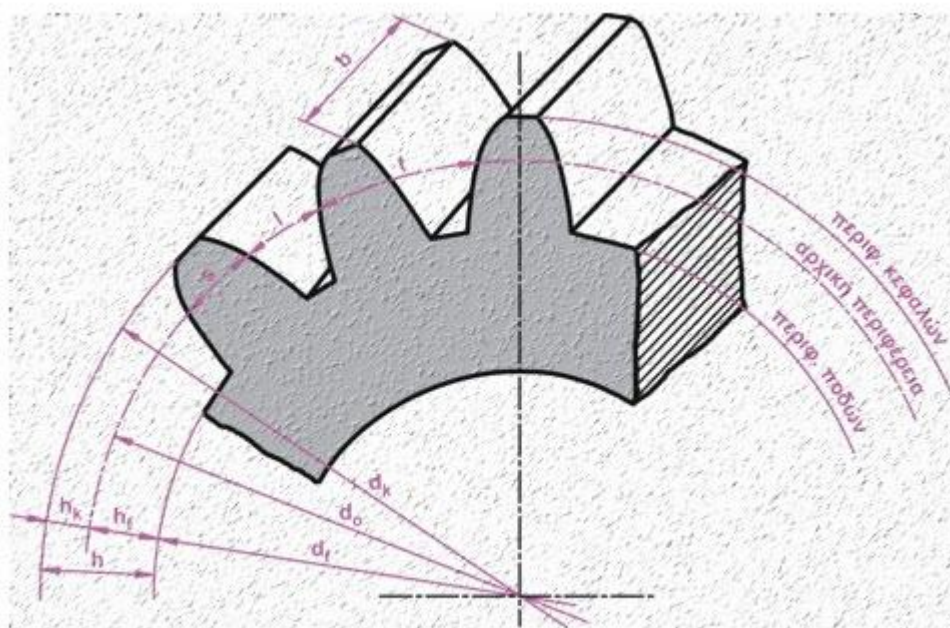
Λειτουργικός σκοπός των οδοντώσεων είναι η μετάδοση κίνησης σε περιπτώσεις ατράκτων με γεωμετρικούς άξονες παράλληλους, τεμνόμενους (υπό οποιαδήποτε γωνία) και ασύμβατους. Εκτός από τη μετάδοση της κίνησης μπορούμε να πετύχουμε και μετατροπή βασικών χαρακτηριστικών της, δηλαδή των στροφών και της ροπής του κινούμενου άξονα σε σχέση με αυτές του κινητήριου. Ενώ στην περίπτωση οδοντωτού τροχού - κανόνα μετατρέπεται η περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη ή το αντίθετο.

Αποτελεί ένα πολύ διαδεδομένο στοιχείο μηχανής και από την επιμελημένη κατασκευή του εξαρτάται η αρμονική λειτουργία ενός πολύ μεγάλου αριθμού μηχανών, οι οποίες ποικίλουν σε μέγεθος από τις γιγάντιες μηχανές των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έως τις μικροσκοπικές μηχανές των ρολογιών.

Οι οδοντώσεις χρησιμοποιούνται στα κιβώτια ταχυτήτων των αυτοκινήτων και των εργαλειομηχανών, στο διαφορικό, το τιμόνι, τον εκκεντροφόρο και άλλους βοηθητικούς μηχανισμούς των αυτοκινήτων, στους μειωτήρες (διατάξεις μετατροπής στροφών – ροπής), στις συνεργασίες κινητήριων μηχανών – εργαλειομηχανών που δεν συμπίπτουν οι γεωμετρικοί άξονες των ατράκτων τους καθώς και σε άλλες περιπτώσεις μετάδοσης που δεν απέχουν πολύ οι συνεργαζόμενες άτρακτοι.

Είναι κατάλληλες για απαιτήσεις μεγάλων ροπών, πολλών στροφών, ακρίβειας στην σχέση μετάδοσης, σχετικά χαμηλού θορύβου και μεγάλης διάρκειας ζωής με ελάχιστη συντήρηση.

Προκειμένου ένας οδοντωτός τροχός να συνεργάζεται με έναν άλλο και να μην υπάρξει ασυνέχεια στην μετάδοση της κίνησης, τα δόντια του πρέπει να έχουν το ίδιο ύψος, το ίδιο πάχος, την ίδια απόσταση μεταξύ τους και την ίδια μορφή. Οι άξονες ως προς τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι παράλληλοι, τεμνόμενοι υπό γωνία ή ασύμβατοι. Ο πιο απλός γεωμετρικά οδοντωτός τροχός είναι ο μετωπικός τροχός με ευθεία δόντια. Έτσι, τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός οδοντωτού τροχού παρουσιάζονται ως προς τον τροχό αυτό και φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά οδοντωτού τροχού

- Η περιφέρεια που διέρχεται από τις κεφαλές των δοντιών λέγεται περιφέρεια κεφαλών και η διάμετρος d_k που της αντιστοιχεί ονομάζεται διάμετρος κεφαλής.
- Η περιφέρεια που περνά από τη μέση περίπου των δοντιών λέγεται αρχική περιφέρεια ενώ η αντίστοιχη διάμετρος d_o λέγεται αρχική διάμετρος.
- Η διάμετρος d_f που αντιστοιχεί στη βάση των δοντιών ονομάζεται διάμετρος ποδιών.
- Το τμήμα h_k του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται έξω από την αρχική περιφέρεια, λέγεται κεφαλή του δοντιού ή ύψος κεφαλής.
- Το υπόλοιπο τμήμα h_f του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται μέσα στα όρια της αρχικής περιφέρειας, ονομάζεται πόδι του δοντιού.

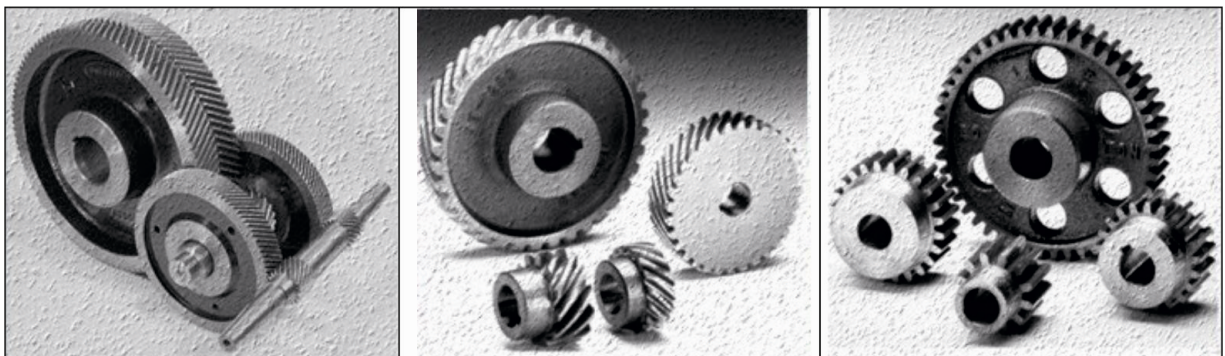
- Ως βήμα δοντιού, ορίζεται η απόσταση t ανάμεσα σε δύο αντίστοιχα σημεία δύο γειτονικών δοντιών, όταν αυτή η απόσταση μετρείται πάνω στην αρχική περιφέρεια.
- Το τμήμα s , όπως φαίνεται στο σχήμα, λέγεται πάχος δοντιού και μετρείται πάνω στη αρχική περιφέρεια.
- Η απόσταση b ονομάζεται μήκος του δοντιού.
- Ως διάκενο του δοντιού i , ορίζεται η διαφορά του βήματος από το πάχος του δοντιού.

2.2 Τύποι οδοντωτών τροχών

Οι οδοντωτοί τροχοί ποικίλουν και ταξινομούνται με βασικότερο κριτήριο την μορφή τους. Παρακάτω ακολουθεί κατηγοριοποίηση αυτών καθώς και περιγραφή τους.

2.2.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

Τα γρανάζια αυτού του τύπου (Σχήμα 2.2) μεταδίδουν την κίνηση μεταξύ παραλλήλων αξόνων. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν τα μετωπικά γρανάζια έχει κυλινδρική μορφή. Τα δόντια των γραναζιών μπορούν να είναι είτε παράλληλα, είτε κεκλιμένα προς τον άξονα τους, είτε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία. Τα παράλληλα τοποθετημένα γρανάζια μπορούν να είναι σε επαφή είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά (δηλαδή το ένα να είναι μέσα στο άλλο), ενώ η κεκλιμένη οδόντωση μπορεί να είναι είτε απλή είτε διπλή. Τα γρανάζια με κεκλιμένα ή ελικοειδή δόντια υπερτερούν των γραναζιών με ευθεία δόντια διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή και προκαλούν λιγότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους.



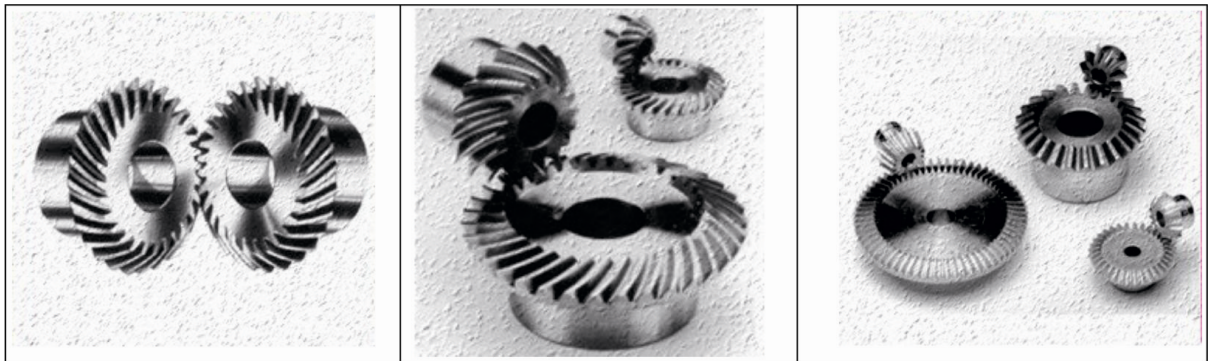
Σχήμα 2.2: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

2.2.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί

Τα κωνικά γρανάζια (Σχήμα 2.3) χρησιμοποιούνται για μεταδόσεις κίνησης σε άξονες είτε τεμνόμενους, είτε ασύμβατους. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν τα κωνικά γρανάζια έχει μορφή κόλουρου κώνου. Στα γρανάζια που μεταδίδουν κινήσεις μεταξύ αξόνων οι οποίοι τέμνονται υπό τυχούσα γωνία τα δόντια τους είναι είτε ευθεία, είτε ελικοειδή. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κωνικά γρανάζια με δόντια που έχουν καμπύλη μορφή, είτε αυτά είναι τόξα κύκλου είτε τμήματα σπειροειδών καμπυλών. Στα γρανάζια που μεταδίδουν κινήσεις μεταξύ αξόνων οι οποίοι είναι ασύμβατοι τα δόντια τους είναι ελικοειδή. Χρησιμοποιούνται πάντως για τη μετάδοση της κίνησης σε ασύμβατους άξονες οι οποίοι έχουν μικρή σχετικά μεταξύ τους απόσταση.

Τα κωνικά γρανάζια που μεταδίδουν κίνηση σε ασύμβατους άξονες έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από εκείνα που μεταδίδουν κίνηση σε τεμνόμενους άξονες διότι κατά τη λειτουργία τους αναπτύσσονται επ' αυτών αυξημένες δυνάμεις τριβής ολίσθησης. Για τη μετάδοση των κινήσεων σε ασύμβατους άξονες χρησιμοποιούνται και τα κοχλιωτά γρανάζια.

Ωστόσο αυτά βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε μικρές σχετικά φορτίσεις αλλά και μικρότερες σχέσεις μετάδοσης.



Σχήμα 2.3: Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί

2.2.3 Οδοντωτός κανόνας

Ο οδοντωτός κανόνας συνιστά ένα γρανάζι το οποίο προέκυψε από την κατεργασία μιας μεταλλικής επιφάνειας που είχε μορφή διαμήκου ράβδου. Τα δόντια του δεν είναι διατεταγμένα επί κύκλου, αλλά επί ευθείας. Επιτυγχάνει μια μετάδοση κίνησης «μετωπικού τύπου» και καταφέρνει να μετατρέψει την περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη και το αντίστροφο.

2.2.4 Σύστημα ατέρμονα - κορώνας

Μια άλλη διάταξη μετάδοσης κίνησης μεταξύ ασύμβατων αξόνων με κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις είναι το σύστημα ατέρμονα κοχλία – γραναζιού. Εδώ έχουμε έναν ατέρμονα κοχλία που φέρει κεκλιμένα δόντια και λειτουργεί σαν γρανάζι. Ο άξονας του ατέρμονα εφάπτεται στην περιφέρεια του γραναζιού στο οποίο μεταδίδεται η κίνηση. Αυτός ο τύπος μετάδοσης κίνησης έχει μικρό σχετικά βαθμό απόδοσης, αλλά προσφέρει το πλεονέκτημα της αθόρυβης λειτουργίας γιατί επιτυγχάνει απορρόφηση των δονήσεων.

2.2.5 Επικυκλική οδόντωση

Στη διάταξη αυτού του τύπου που προσομοιάζει στο πλανητικό σύστημα έχουμε ένα κεντρικό γρανάζι που καταλαμβάνει τη θέση του ήλιου και μια σειρά γραναζιών πλανητών που συνδέονται με τα δόντια του κεντρικού γραναζιού. Η πλανητική διάταξη προσφέρει τη δυνατότητα για μετάδοση μεγάλης ισχύος καθώς επίσης και για μεγάλες σχέσεις μετάδοσης. Οι πλανητικές οδοντώσεις έχουν λίγο μεγαλύτερο κόστος από τις άλλες γιατί περιλαμβάνουν μεγαλύτερο αριθμό γραναζιών, έχουν όμως παράλληλα το πλεονέκτημα ότι συχνά καταλαμβάνουν μικρό χώρο και έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης.

2.3 Υλικά κατασκευής

2.3.1 Υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών

- **Χυτοσίδηρος:** Έχει μεγάλη αντοχή στην διάβρωση και στις φθορές από σκόνες, άμμο κτλ. (ιδιαίτερα ο σκληρός) και γι' αυτό τον προτιμάμε για εργασίες σε περιβάλλον με τέτοια στοιχεία ή υγρασία. Δεν είναι κατάλληλος για μεγάλες ταχύτητες και μεγάλες απαιτήσεις κατασκευαστικής ακρίβειας.

- **Χάλυβας:** Είναι πιο κατάλληλος για μεγάλες ταχύτητες και ακριβείς διαστάσεις, αλλά σε περιβάλλοντα με ρύπους και υγρασία χρειάζεται προστασία και λίπανση. Όταν καταπονείται σε κρουστικά φορτία υφίσταται επιφανειακή βαφή και σκλήρυνση (ενανθράκωση) μέχρι βάθους 1mm περίπου, ώστε να διατηρήσει εσωτερικά την ελαστικότητά του.
- **Κράματα του αλουμινίου:** Όταν επιβάλλεται η κατασκευή να έχει μικρό βάρος.
- **Κεραμικά, πλαστικά, συνθετικές ρητίνες:** Όταν οι τροχοί εργάζονται σε διαβρωτικό και οξειδωτικό περιβάλλον. Εργάζονται με σχετικά χαμηλό θόρυβο, έχουν όμως περιορισμένη μηχανική αντοχή.

2.3.2 Υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων

Η χρήση των σκληρομετάλλων γίνεται ευρέως σήμερα λόγω του ότι χρησιμοποιούμε για αυτά επικαλύψεις. Τα καρβίδια κυρίως του Βολφραμίου δίνουν πολύ καλές κοπτικές ιδιότητες. Ως συνδετική ύλη χρησιμοποιείται το κοβάλτιο. Από την φύση τους τα σκληρομέταλλα είναι ψαθυρά υλικά και κατά συνέπεια η δημιουργία υψηλών εφελκυστικών τάσεων εγκυμονεί κινδύνους δημιουργίας ρωγμών ή ακόμα και θραύσεων. Η ψαθυρή αυτή θραύση συμβαίνει ύστερα από ελάχιστη ή καθόλου ψαθυρή παραμόρφωση, σε συχνά απρόβλεπτα επίπεδα τάσεων και μετά από ξαφνική ανάπτυξη κάποιου ρήγματος. Απαιτούμενες ιδιότητες εργαλείων κοπής:

- **Μεγάλη σκληρότητα**
- **Διατήρηση σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες**
- **Αντοχή σε πιέσεις, καλές ιδιότητες λογισμού, επαρκής στιβαρότητα**
- **Μεγαλύτερη αντοχή σε φθορά**
- **Χημική σταθερότητα**
- **Αντοχή σε thermal shock**

Το εργαλείο μπορεί να έχει γενικά μεγάλη σκληρότητα. Επειδή υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου τεμαχίου, το απόβλητο ρέει με μεγάλη ταχύτητα, γι' αυτό η σκληρότητα πρέπει να διατηρείται σε μεγάλες θερμοκρασίες. Παρακάτω (Σχήμα 2.4) φαίνονται σχηματικά οι παράγοντες που επιδρούν στην φθορά και θραύση του κοπτικού εργαλείου συγκεκριμένα στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων.



Σχήμα 2.4: Παράγοντες που επιδρούν στην φθορά και θραύση του κοπτικού εργαλείου συγκεκριμένα στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων.

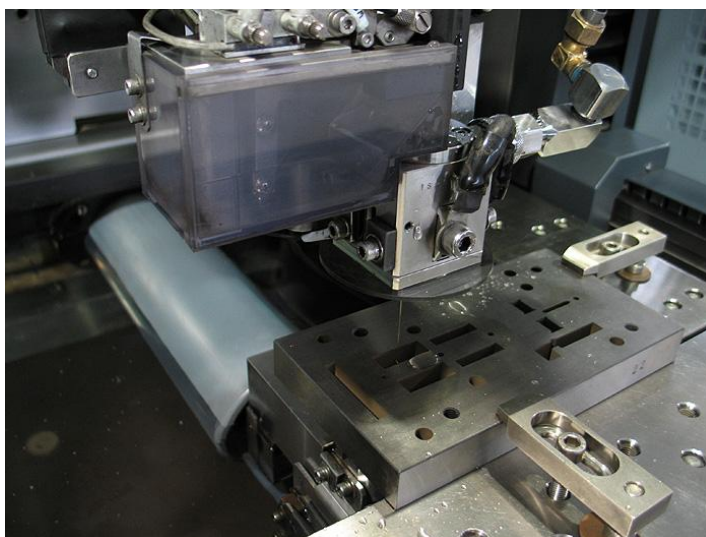
Μελέτες που προηγήθηκαν εκτίμησαν τις αιτίες των θραύσεων των κοπτικών δοντιών στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων και έδειξαν πως για την συγκεκριμένη κατεργασία, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.4 οι παράγοντες αυτοί κατατάσσονται σε σχέση με το κοπτικό εργαλείο, την γεωμετρία της κοπτικής ακμής την γεωμετρία του αποβλίττου και τις συνθήκες κατεργασίας.

2.4 Μέθοδοι κατασκευής οδοντώσεων

Η κατασκευή ενός οδοντωτού τροχού δεν είναι εύκολη υπόθεση. Απαιτούνται μεγάλες εγκαταστάσεις και πολλά μηχανήματα. Η αγορά αυτών είναι πολύ δαπανηρή και συμφέρει μόνο στην περίπτωση που κάποιος θα ιδρύσει μια γραμμή παραγωγής. Τα μικρά μηχανουργία στέλνουν σε τέτοιες μονάδες ημιτελείς οδοντωτούς τροχούς για την ολοκλήρωση των διαδικασιών. Οι κυριότερες μέθοδοι που ακολουθούνται για την κοπή οδοντώσεων είναι οι εξής:

2.4.1 Κοπή οδοντώσεων με ηλεκτροδιάβρωση

Πρόκειται για κατεργασία η οποία χρησιμοποιείται στην μορφοποίηση καλουπιών οδοντωτών τροχών και η λειτουργία της βασίζεται σε ηλεκτρικά φαινόμενα (Σχήμα 2.5). Η βύθιση ενός υλικού, μέσω ηλεκτρικού σπινθήρα στις ηλεκτρικές εκκενώσεις αποκτά την καθοδική μορφή. Θεμιτή κατάσταση είναι η 100% εξαέρωση του υλικού από το τεμάχιο και η 0% εξαέρωση του υλικού από το εργαλείο.



Σχήμα 2.5: Κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης

2.4.2 Διαδικασία κατασκευής μέσω κονιομεταλλουργίας

Σε αυτή την περίπτωση μεταλλική πούδρα τοποθετείται σε κατάλληλο καλούπι που έχει το σχήμα του οδοντωτού τροχού και συμπιέζεται από πρέσα. Κατόπιν, το πεπιεσμένο τεμάχιο οδηγείται σε κλίβανο όπου θερμαινόμενο αποκτά την επιθυμητή αντοχή. Η ακρίβεια της κατασκευής είναι καλή αλλά το υψηλό κόστος των εγκατεστημένων μηχανών δεν επιτρέπει παραγωγή μεγάλης κλίμακας.

2.4.3 Δημιουργία οδοντώσεων με χύτευση

Για μεγάλα δόντια και μικρές απαιτήσεις κατασκευαστικής ακρίβειας, ακατάλληλα για περιφερειακές ταχύτητες μεγαλύτερες από 2 m/s. Οι οδοντωτοί τροχοί χυτεύονται υπό πίεση σε κατάλληλα διαμορφωμένες μήτρες. Όπως ισχύει για όλες τις χυτεύσεις, οι μεταβολές του οδοντωτού τροχού λόγω συστολών και η ακρίβεια κατασκευής του καλουπιού επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος η οποία προκύπτει σχετικά χαμηλή. Για τη βελτίωση της ποιότητας απαιτούνται διεργασίες αποπεράτωσης όπως αυτές που παρουσιάζονται στη

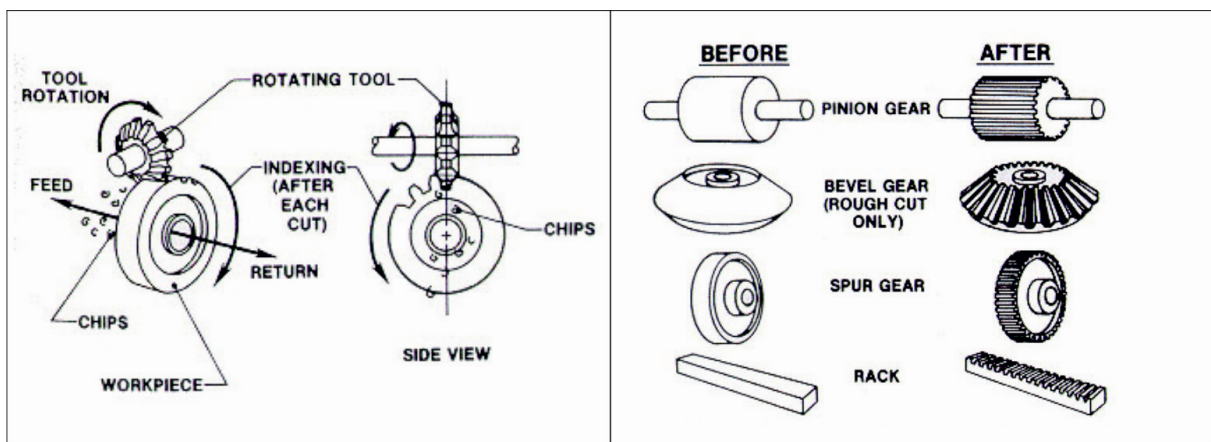
συνέχεια του κεφαλαίου. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια την αύξηση του κόστους παραγωγής και αποτελεί το λόγο που η μέθοδος προτιμάται για την παραγωγή μεγάλου αριθμού οδοντωτών τροχών σχετικώς χαμηλής ποιότητας.

2.4.4 Κοπή οδοντώσεων σε κοινή φραιζομηχανή (GEAR MILLING)



Με τη βοήθεια διαιρέτη για περιορισμένο αριθμό κομματιών. Τα κοπτικά εργαλεία στην περίπτωση αυτή είναι δισκοειδείς φραιζες ή ειδικά «κονδύλια». Είναι μια κατεργασία η οποία χρησιμοποιείται για το 70 – 80 % των κατεργασιών. Στο ομόρροπο φρεζάρισμα η κίνηση του κοπτικού γίνεται από κάτω προς τα πάνω, ενώ η γεωμετρία του αποβλήτου μετατρέπεται από χοντρό σε λεπτό. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το αντίρροπο, όπου η κίνηση είναι από πάνω προς τα κάτω ενώ το απόβλιπτο μετατρέπεται από λεπτό σε χοντρό. Τέλος στο εφαπτομενικό φρεζάρισμα υπάρχει πρόσθετη περιστροφή του κομματιού.

Κατά τη συγκεκριμένη κοπή είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός κοπτικού εργαλείου το οποίο να είναι ικανό να αφαιρέσει από ένα κύλινδρο το διάκενο ανάμεσα σε δύο δόντια του τροχού. Καθώς περιστρέφεται και κόβει υλικό από την περιφέρεια του κυλίνδρου, μετακινείται ταυτόχρονα αξονικά σε όλο το πλάτος του. Αφού ένα διάκενο έχει κοπεί, ο τροχός περιστρέφεται στην κατάλληλη θέση και κόβεται το επόμενο διάκενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να έχουν κοπεί όλα τα διάκενα του τροχού. Μια τέτοια κοπή φαίνεται στο Σχήμα 2.6 όπως επίσης και οι δυνατές διαμορφώσεις του εργαλείου κοπής.



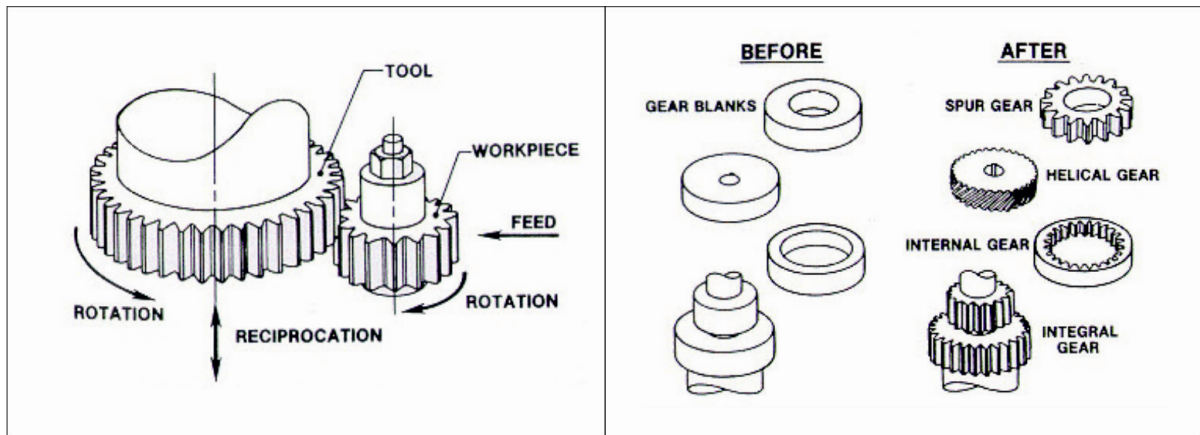
Σχήμα 2.6: Κατεργασία σε φραιζομηχανή

Τα δόντια της στήλης της φραιζας είναι διατεταγμένα σε ελικοειδή γραμμή. Τα ρυθμιζόμενα μέρη κατά το φραιζάρισμα είναι η γωνία κλίσης της οδόντωσης καθώς και η γωνία ελίκωσης.

2.4.5 Κοπή οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση (FELLOWS)

Πρόκειται για μια μέθοδο πολύ παρεμφερή με την κοπή με χρήση οδοντωτού κανόνα. Η κυριότερη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το κοπτικό εργαλείο έχει τη μορφή ενός συνεργαζόμενου με τον υπό κοπή τροχό. Καθώς το εργαλείο Fellows παλινδρομεί στη διεύθυνση του άξονα του τροχού, περιστρέφεται ταυτόχρονα ενώ μετά από κάθε πλήρη περιστροφή του υπό κοπή τροχού οι άξονες περιστροφής εργαλείου και τροχού μετακινούνται ακτινικά αυξάνοντας έτσι το βάθος της επόμενης κοπής.

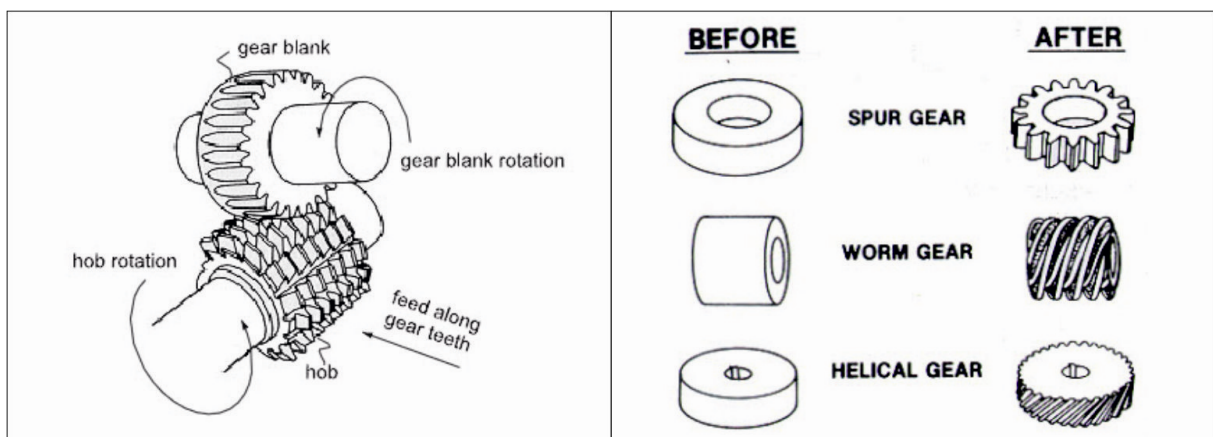
Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως πρόκειται για μια πραγματική διαδικασία γένεσης αφού δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του εργαλείου κατά την διαδικασία κοπής. Επιπλέον η μέθοδος μας επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών οδοντώσεων όπως φαίνεται και στο συνοδευτικό Σχήμα 2.7. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως κάθε διάκενο κόβεται από συγκεκριμένο δόντι του εργαλείου και επομένως εάν κάποιο από αυτά έχει ελάττωμα, αυτό μεταφέρεται αυτούσιο στην κατατομή του υπό κοπή τροχού.



Σχήμα 2.7: Κατεργασία με την μέθοδο FELLOWS

2.4.6 Κοπή οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων

Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος αυτή (Σχήμα 2.8), θα πρέπει κανείς να θεωρήσει σχετική κίνηση δύο οδοντωτών τροχών σε σύμπλεξη. Εάν κανείς θεωρήσει τον έναν από τους δύο τροχούς ως το υπό κατεργασία αντικείμενο, και τον άλλο σαν κοπτικό εργαλείο, τότε η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου πρέπει να αντιστοιχεί λόγω της σύμπλεξης των οδοντώσεων, σε αντίστοιχη κίνηση του αντικειμένου. Εάν το κοπτικό εργαλείο κατά την περιστροφή του έχει την δυνατότητα αφαίρεσης του υλικού, στο αμέσως επόμενο διάκενο, τότε με την πλήρη περιστροφή του αντικειμένου θα έχει ολοκληρωθεί και η κοπή των οδοντώσεων. Η δυνατότητα αυτή της αφαίρεσης υλικού δίνεται στο κοπτικό εργαλείο είτε λόγω της κατάλληλης διαμόρφωσης κοπτικών επιφανειών, είτε και λόγω κατάλληλης δευτερεύουσας κοπτικής κίνησης. Η γενική αυτή μέθοδο κατασκευής οδοντώσεων με την κύλιση μεταξύ κοπτικού εργαλείου αντικειμένου κατεργασίας παρουσιάζεται στην πράξη με διάφορες παραλλαγές οι οποίες ευνοούν την παραγωγή ορισμένων τύπων οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 2.8: Κατεργασία με κύλιση οδοντωτών τροχών

Οι παραλλαγές της μεθόδου της κύλισης οφείλονται κυρίως στην μορφή του κοπτικού εργαλείου και στις δυνατότητες δευτερευουσών κινήσεων που έχει η κάθε μηχανή. Η πλειοψηφία των τελικών προϊόντων οδοντώσεων παράγεται μέσω της κατεργασίας (κοπής) του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντωτών τροχών. Η κατεργασία όμως αυτή δεν προσφέρει τη δυνατότητα κοπής εσωτερικών οδοντώσεων κάτι που γίνεται με πλάνιση με κύλιση. Η σύνθετη κινηματική της εν λόγω κατεργασίας, αλλά και η πολύπλοκη γεωμετρία των κοπτήρων, αποτελούν δύο μόνο από τα σημαντικά προβλήματα που ανακύπτουν, μέσω των προσπαθειών βελτιστοποίησής της. Για το λόγω αυτό, ελάχιστες εξειδικευμένες επιστημονικές ομάδες δραστηριοποιούνται ερευνητικά στην περιοχή, και ακόμα λιγότερες αναπτύσσουν αξιόπιστα υπολογιστικά (αναλυτικά & αριθμητικά) μοντέλα, τα οποία υποστηρίζουν διαδικασίες επιλογής βέλτιστων τεχνολογικών παραμέτρων.

Η κοπή με την μέθοδο κοπτικών οδοντωτών τροχών χρησιμοποιεί κοπτικά εργαλεία με την μορφή οδοντωτών τροχών τα οποία παλινδρομούν σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο περιστροφής τους. Τα εργαλεία αυτά συγχρόνως περιστρέφονται με αποτέλεσμα την διαμόρφωση στην επιφάνεια του αντικειμένου της μορφής του δοντιού. Η επιφάνεια του δοντιού προκύπτει ως περιβάλλουσα των διαδοχικών θέσεων που λαμβάνει το κοπτικό εργαλείο σχετικά με το αντικείμενο κατεργασίας. Για να είναι δυνατή η διαμόρφωση αυτή, θα πρέπει φυσικά και το αντικείμενο να περιστρέφεται με τον αριθμό στροφών που αντιστοιχεί στον αριθμό στροφών του κοπτικού και στον αριθμό οδοντώσεων κοπτικού και αντικειμένου. Εάν δοθεί κλίση στο κοπτικό εργαλείο, είναι δυνατόν να παραχθούν με την μέθοδο αυτή και τροχοί με πλάγια ή και ελικοειδή δόντια. Φυσικά για να είναι δυνατή η παραγωγή ελικοειδών επιφανειών είναι απαραίτητο το κοπτικό εργαλείο να μετέχει και σε μια επιπλέον δευτερεύουσα κίνηση. Η μεγάλη αυτή ποικιλία κινήσεων και η ανάγκη για μια πιο λεπτομερή ρύθμιση του αριθμού στροφών του κοπτικού εργαλείου και του αντικειμένου, καθιστούν τις εργαλειομηχανές κύλισης πολυσύνθετες μηχανές μεγάλου κόστους.

Για τη μείωση χρόνου κατεργασίας και αύξηση παραγωγικότητας εργαλειομηχανών κατασκευής οδοντωτών τροχών, συνήθως ο τροχός διαμορφώνεται προκαταρκτικά είτε με χύτευση, είτε με σφυρηλάτηση, είτε στην φραιζα, και στην συνέχεια διαμορφώνεται η τελική μορφή του με την μέθοδο της κύλισης. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η διάρκεια ζωής των κοπτικών μέσων. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται τέσσερις τύποι κοπτικών τροχών ανάλογα με την μορφή που θέλουμε να πετύχουμε στο τελικό προϊόν.



Σχήμα 2.9: Τύποι κοπτικών τροχών

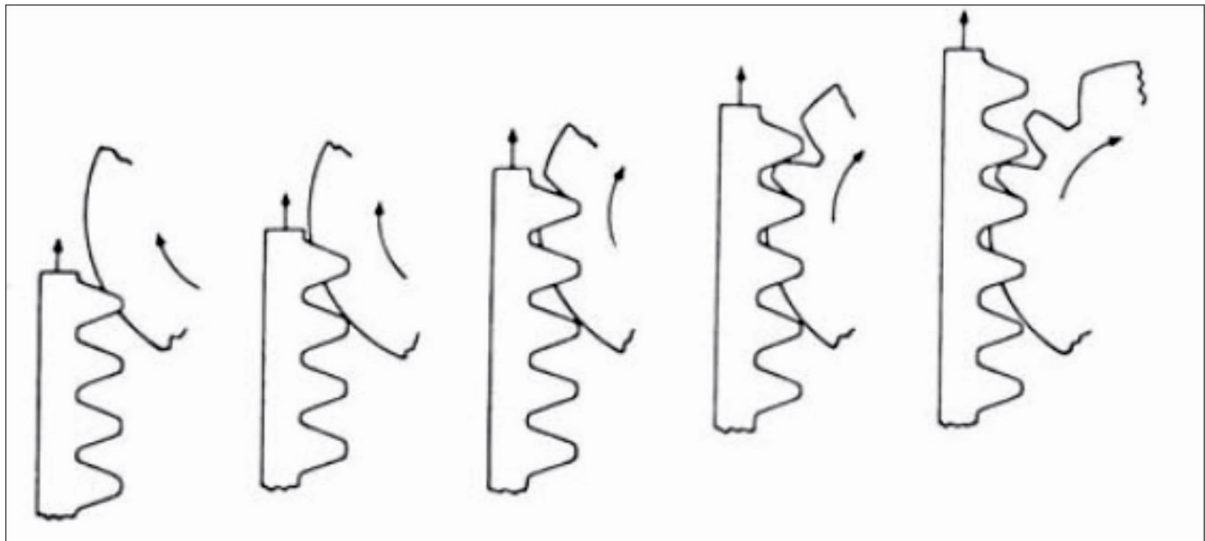
Κατά το φραιζάρισμα με κύλιση εκτός της δημιουργούμενης φθοράς που παρατηρείται κατά κύριο λόγο στην ελεύθερη επιφάνεια των δοντιών, σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά την κατεργασία σχετίζονται με τις μηχανικές υπερκαταπονήσεις που δέχεται το κοπτικό εργαλείο. Έτσι παρουσιάζονται περιπτώσεις κατεργασιών κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση, όπου παρατηρούνται θραύσεις κοπτικών ακμών ακόμα και στην αρχή της κατεργασίας, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης εργαλείων από σκληρο μέταλλα.

2.4.7 Κοπή οδοντώσεων με κοπτικούς οδοντικούς κανόνες

Η μέθοδος της κύλισης χρησιμοποιείται επίσης και για την διαμόρφωση οδοντώσεων με κοπτικά εργαλεία με την μορφή οδοντωτού κανόνα. Στην περίπτωση αυτή, εάν θεωρήσουμε την σχετική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ως προς το αντικείμενο κατεργασίας, θα παρατηρήσουμε ότι η επιφάνεια του δοντιού παράγεται και στην περίπτωση αυτή ως η περιβάλλουσα των τροχιών των κοπτικών δοντιών.

Η χρησιμοποίηση του οδοντωτού κανόνα ως κοπτικού εργαλείου παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα από άποψη κόστους εργαλείων γιατί λόγω του ευθύγραμμου σχήματος των οδοντώσεων είναι απλούστερη η κατασκευή και η τροχισή τους. Κατά την κοπή το κοπτικό εργαλείο κινείται ευθύγραμμα ώστε να είναι δυνατή η κύλιση του πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, ενώ ταυτόχρονα παλινδρομεί σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο περιστροφής του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή είναι σαφές ότι για να είναι δυνατή η κύλιση του κοπτικού στο αντικείμενο, ο κατασκευαζόμενος τροχός θα πρέπει να περιστρέφεται με κατάλληλη γωνιακή ταχύτητα, ώστε η περιφερειακή ταχύτητα του τροχού να είναι ίση με την γραμμική ταχύτητα του κανόνα.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα κατασκευής όλων των οδοντώσεων που αντιστοιχούν σε ένα μέγεθος οδόντα με ένα μόνο κοπτικό εργαλείο, ανεξάρτητα από τον αριθμό οδοντώσεων του κατασκευαζόμενου τροχού. Παρακάτω (Σχήμα 2.10) φαίνεται σχηματικά η διαδικασία διαμόρφωσης με την συγκεκριμένη μέθοδο.



Σχήμα 2.10: Διαμόρφωση με οδοντωτό κανόνα

2.4.8 Κοπή οδοντώσεων με κοπτικούς ατέρμονες κοχλίες

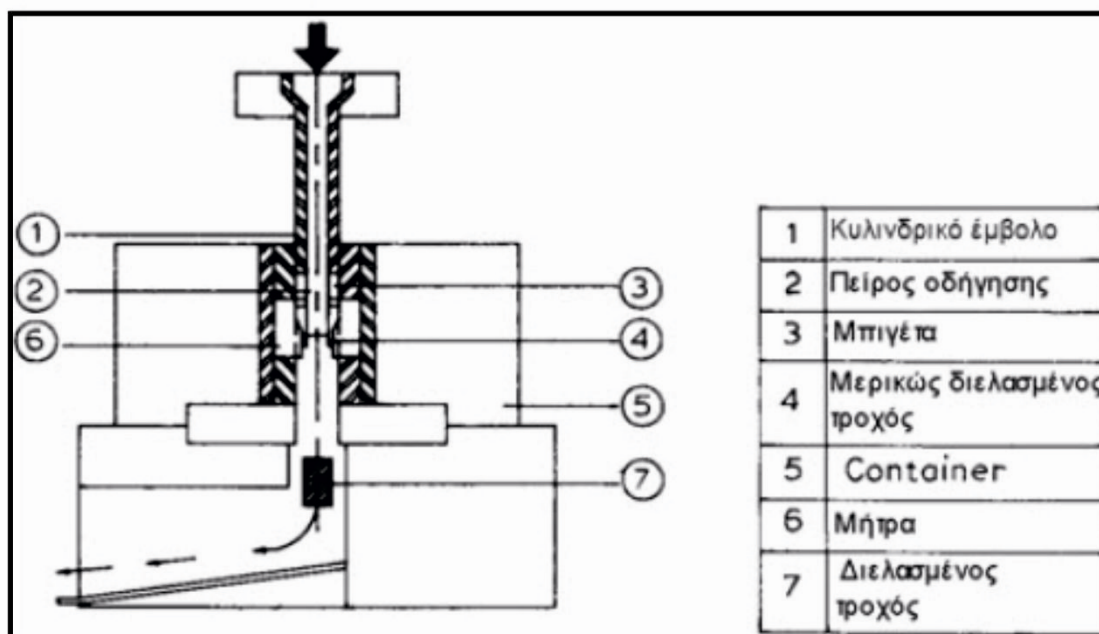
Με ανάλογο τρόπο είναι δυνατή η διαμόρφωση των οδοντώσεων με την χρήση κοπτικών εργαλείων με την μορφή ατέρμονου κοχλία. Στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια του δοντιού προκύπτει από την κινηματική συνεργασία μεταξύ οδοντωτού τροχού και ατέρμονα κοχλία.

Κατά την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου κατά 360 μοίρες, η κοπτική επιφάνεια εμπλέκεται με τον υπό κατασκευή τροχό, αφαιρώντας το υλικό στο διάκενο μεταξύ των δοντιών, επόμενη κοπτική επιφάνεια κατεργάζεται το επόμενο διάκενο. Για να είναι δυνατή η αρμονική συνεργασία μεταξύ τροχού και ατέρμονα, είναι φυσικά απαραίτητη η ταυτόχρονη περιστροφή του τροχού κατά ανάλογη γωνία. Επίσης για να είναι δυνατή η αποκοπή του διακένου καθόλο το μήκος δοντιού, είναι απαραίτητη η μετακίνηση του ατέρμονα κατά την διεύθυνση του άξονα του τροχού.

Όπως στην περίπτωση της φραιζας, έτσι και στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η ομόρροπη και η αντίρροπη κοπή. Η αντίρροπη κοπή παρουσιάζει γενικά το πλεονέκτημα της δυνατότητας χρησιμοποίησης μεγαλύτερης πρόωσης και βάθους κοπής, αλλά συγχρόνως απαιτεί και μεγαλύτερη στιβαρότητα της κατασκευής. Η αντίρροπη κοπή χρησιμοποιείται κυρίως για την κοπή μαλακών χαλύβων, οπότε είναι δυνατή η μείωση του χρόνου κατεργασίας κατά 100%. Για άλλα υλικά όπως ο χυτοσίδηρος δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη από την χρήση της αντίρροπης κοπής και χρησιμοποιείται συνήθως η ομόρροπη.

2.4.9 Δημιουργία οδοντωτών τροχών με έλαση - διέλαση

Κατά την ψυχρή έλαση (Σχήμα 2.11) το μέταλλο εφελκύεται μέσα από διαφορετικού μεγέθους μήτρες και το τελικό προϊόν είναι ένας οδοντωτός τροχός πολύ μεγάλου πλάτους, από τον οποίο κόβονται πολλοί μικρότερου πλάτους αλλά ιδίου module και αριθμού δοντιών τροχοί. Κατά τη διέλαση το θερμό μέταλλο ωθείται με χρήση πρέσσας να διέλθει από την μήτρα η οποία του προσδίδει το σχήμα του οδοντωτού τροχού. Αυτού του είδους οι τροχοί επιτυγχάνουν μεγάλη διαστατική ακρίβεια και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος ενδείκνυται για την κοπή τροχών με πολύ μικρές διαστάσεις.



Σχήμα 2.11: Μηχανή έλασης - διέλασης

2.5 Διαδικασίες αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών

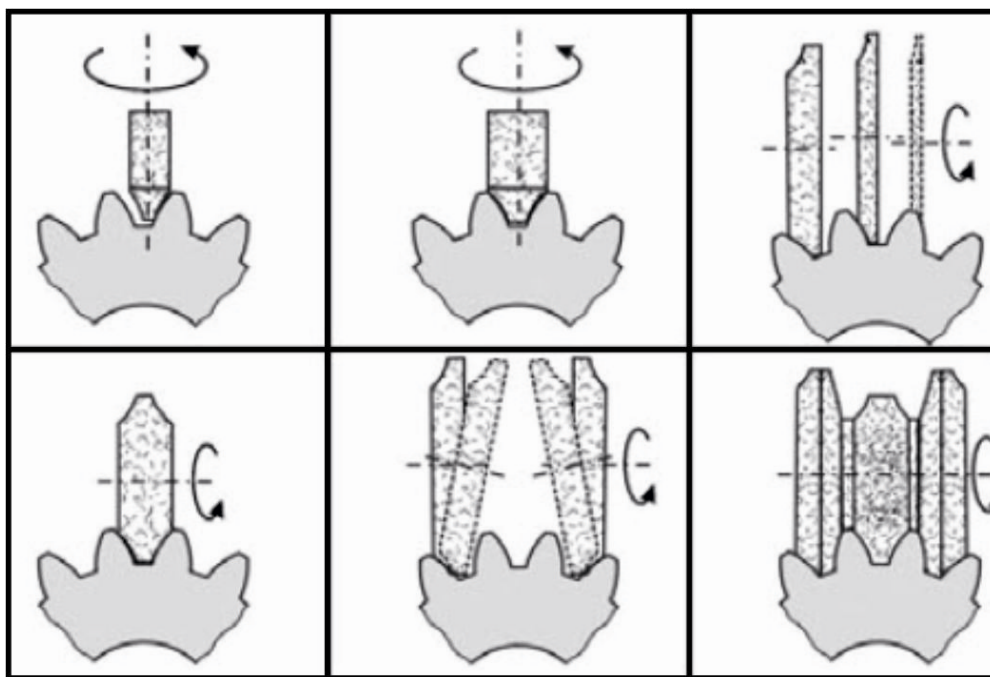
Η μηχανουργική κατεργασία των οδοντωτών τροχών δεν περατώνεται με την κοπή της οδόντωσης. Για την καλή λειτουργία της μετάδοσης με οδοντωτούς τροχούς, την μείωση του θορύβου, την αντοχή την αντοχή του δοντιού στις δυσμενείς συνθήκες επιφανειακής φθοράς

και τον καλό συντελεστή μηχανικής απόδοσης, είναι απαραίτητες και άλλες επιφανειακές επεξεργασίες (μηχανουργικές κατεργασίες). Κατά την λειτουργία της μηχανής ρινίσματος, ο κοπτικός τροχός κυλίνεται στην επιφάνεια του αντικειμένου ενώ ταυτόχρονα παλινδρομεί κατά την διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο περιστροφής του αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αφαίρεση μικρών ρινισμάτων υλικού και η απαλοιφή των ανωμαλιών της επιφάνειας του αντικειμένου.

Για την βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας και την μείωση της τριβής και της φθοράς κατά την λειτουργία το αντικείμενο μετά την διαδικασία του ρινίσματος ακολουθεί λείανση των επιφανειών των οδόντων με την βοήθεια ειδικών λειαντικών τροχών. Οι κυριότερες από τις επιφανειακές επεξεργασίες αποπεράτωσης παρουσιάζονται παρακάτω.

2.5.1 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με λείανση (GRINDING)

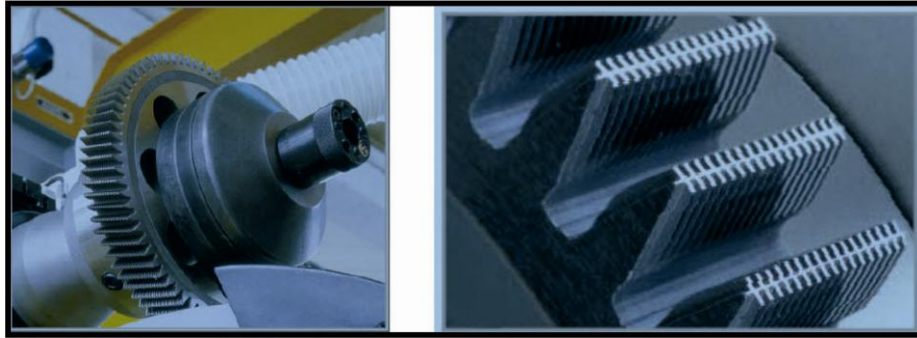
Για την βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας και την μείωση της τριβής και της φθοράς κατά την λειτουργία των οδοντωτών τροχών ακολουθεί λείανση των επιφανειών των δοντιών με την βοήθεια ειδικών λειαντικών τροχών. Για την λείανση των πολύπλοκων επιφανειών των δοντιών χρησιμοποιούνται κυρίως είτε λειαντικές μηχανές κύλισης είτε λειαντικοί τροχοί μορφής. Παρακάτω (Σχήμα 2.12) φαίνεται η βασική διάταξη που χρησιμοποιείται για την λείανση μετωπικών οδοντωτών τροχών με την βοήθεια λειαντικού τροχού μορφής.



Σχήμα 2.12: Διαδικασία αποπεράτωσης με την μέθοδο της λείανσης

2.5.2 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με την μεθοδο SHAVING

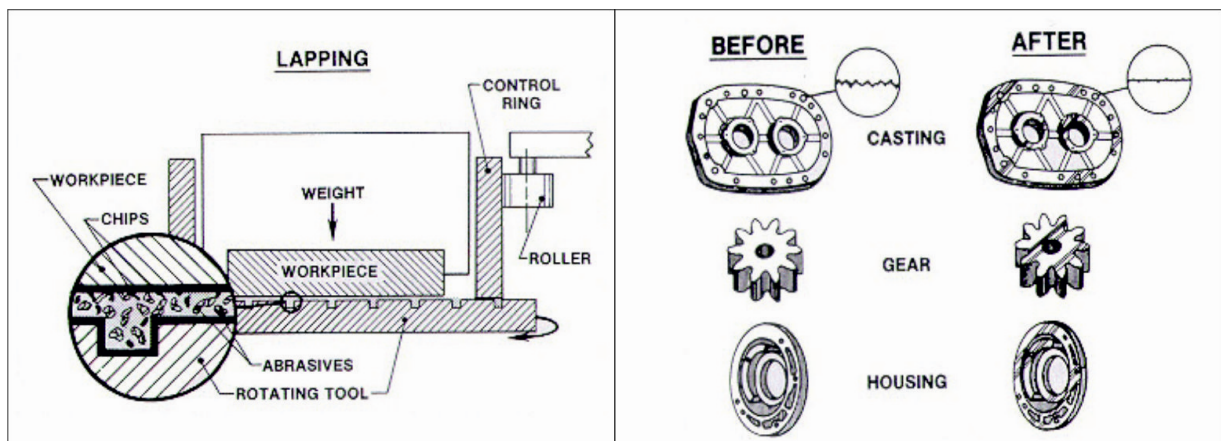
Είναι η διαδικασία αφαίρεσης τριχοειδών υπολειμμάτων μετάλλου από τις επιφάνειες της κατατομής και λαμβάνει χώρα πριν τη σκλήρυνση του τροχού. Το κοπτικό εργαλείο (Σχήμα 2.13) έχει τη μορφή οδοντωτού τροχού οι κατατομές του οποίου διαθέτουν εγκοπές που λειτουργούν σαν αιχμές κοπτικού εργαλείου και οι οποίες ουσιαστικά “ξύνουν” την επιφάνεια των κατατομών.



Σχήμα 2.13: Κοπτικό εργαλείο της μεθόδου SHAVING

2.5.3 Αποπεράτωση οδοντωτών τροχών με LAPPING

Η αφαίρεση πολύ μικρών σωματιδίων μετάλλου που βρίσκονται στην επιφάνεια του δοντιού μετά τη θερμική του κατεργασία γίνεται με έναν από τους δύο ακόλουθους τρόπους: είτε χρησιμοποιώντας κοπτικό εργαλείο για lapping (μετωπικοί τροχοί) είτε θέτοντας σε περιστροφή δύο συνεργαζόμενους τροχούς (ελικοειδής, κωνικούς ή με ασύμβατους άξονες) οι οποίοι ψεκάζονται ταυτόχρονα με λειαντική σκόνη για lapping. Και στις δύο περιπτώσεις η λειαντική ουσία επιτυγχάνει την αφαίρεση μετάλλου με βάση την ταχύτητα ολισθήσεως. Η ταχύτητα αυτή λαμβάνει μια μέγιστη τιμή στην περιοχή ποδός του ενός τροχού, ελαττώνεται μέχρι την τιμή μηδέν στον κύκλο κυλίσεως και στη συνέχεια αυξάνει μέχρι μια άλλη μέγιστη τιμή στην κεφαλή του δοντιού. Από αυτή τη διαφορά στην ταχύτητα γίνεται εμφανής και στις αποδοδόμενες επιφάνειες ενώ στην περιοχή του σημείου ολισθήσεως απαιτείται συμπληρωματική λείανση. Παρακάτω (Σχήμα 2.14) φαίνεται η αντίστοιχη διαδικασία καθώς και το αποπερατωμένο προϊόν.



Σχήμα 2.14: Κατεργασία αποπεράτωσης με LAPPING

2.6 Συνοπτικά

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια περιληπτική περιγραφή των μεθόδων παραγωγής οδοντωτών τροχών. Αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί είναι πως, οι κυριότερες μέθοδοι (Hobbing, Fellows κ.α.), που παράγουν και το μεγαλύτερο μέρος των οδοντωτών τροχών, βασίζουν την αρχή λειτουργίας τους στην κοπή με οδοντωτό κανόνα. Αυτά τα είδη κοπής εκμεταλλεύονται τη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων σε συνδυασμό με την κινηματική που χαρακτηρίζει την κοπή για να δημιουργήσουν τις επιθυμητές επιφάνειες. Με αυτό τον τρόπο “δύσκολες” γεωμετρίες παράγονται με σχετικά απλό και αποτελεσματικό τρόπο. Στην παρούσα εργασία το λογισμικό που δημιουργήθηκε αναφέρεται στην μέθοδο κατεργασίας με κύλιση οδοντωτών τροχών όπου είναι και η κυριότερη πλέον μέθοδος για την κατασκευή γραναζιών.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκαν προγράμματα μακροεντολών για την πραγματοποίηση κινήσεων κατεργασίας, οι οποίες δεν καλύπτονται από την καθοδήγηση της εργαλειομηχανής αυτής. Οι μακροεντολές αυτές, παρατίθενται στη συνέχεια.

3.1 Γλώσσα και περιβάλλον προγραμματισμού

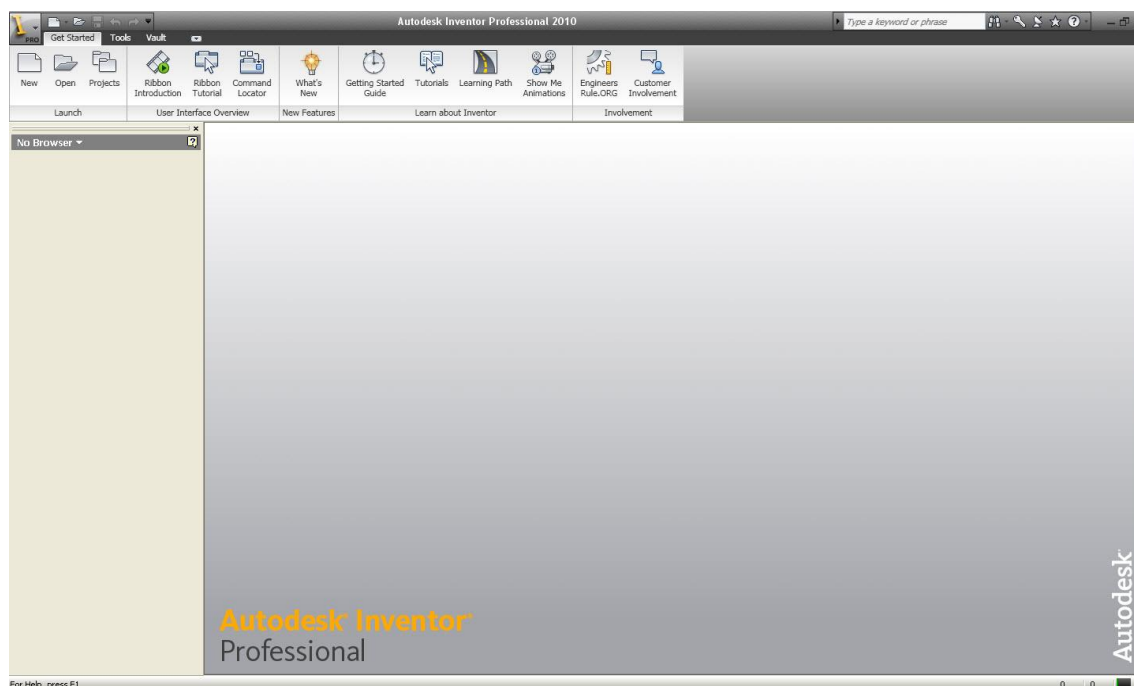
Το λογισμικό αναπτύχθηκε στο περιβάλλον προγραμματισμού API του Autocad Inventor 9 και χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic για την δημιουργία ενός εκτελέσιμου προγράμματος.

3.2 Application programming interface



Ο όρος API χρησιμοποιείται για να περιγράψει την λειτουργικότητα που παρέχεται από μια εφαρμογή που επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί μέσα από ένα πρόγραμμα. Μέσα από την API μπορούν να αυτοματοποιηθούν διαδικασίες και να δημιουργηθούν προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούν τις ίδιες λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης όταν χρησιμοποιεί το πρόγραμμα μέσα από το τυπικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης. Μπορούν όμως να δημιουργηθούν και πολλές άλλες διαδικασίες οι οποίες δεν μπορούν να

εκτελεστούν απευθείας μέσα από γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής. Το περιβάλλον API είναι επίσης σημαντικό επειδή επιτρέπει εξωτερικές εφαρμογές να λειτουργήσουν παράλληλα με το Autodesk Inventor. Το Autodesk Inventor είναι ένα παραμετρικό σύστημα CAD γενικής χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι δεν στοχεύει σε κάποιο συγκεκριμένο τομέα και δεν χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση μόνο κάποιων συγκεκριμένων τύπων προϊόντων. Παρέχοντας περιβάλλον API το Autodesk Inventor επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει επιπλέον λειτουργικότητα και να βελτιστοποιήσει επαναλαμβανόμενες διαδικασίες, αυξάνοντας την αποδοτικότητα με βάση τις απαιτήσεις του προγράμματος που αναπτύσσει. Παρακάτω (Σχήμα 3.1) φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του Autodesk Inventor.



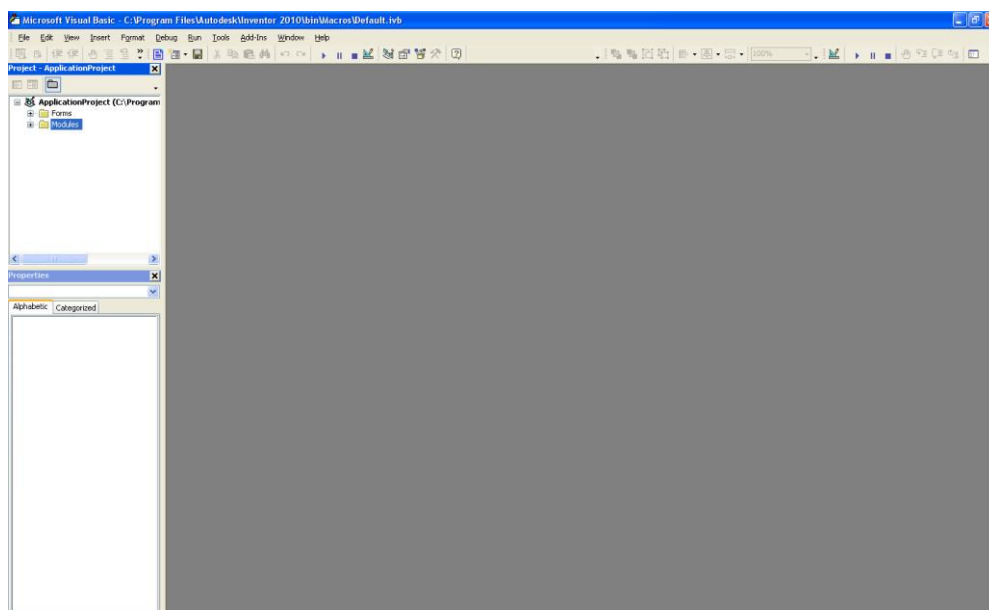
Σχήμα 3.1: Περιβάλλον του Autodesk Inventor

3.3 Visual basic for applications (VBA)



Η Visual basic είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού στο οποίο κανείς έχει πρόσβαση μέσα από το Autodesk inventor. Τα προγράμματα τα οποία δημιουργούνται με VBA αποκαλούνται ως μακρο-εντολές (“macros”). Ένα πρόγραμμα γραμμένο στην VBA έχει προσβασιμότητα σε όλα τα χαρακτηριστικά της API.

Η επιλογή της συγκεκριμένης γλώσσας προγραμματισμού μέσα από το περιβάλλον API παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Η VBA διανέμεται μαζί με το Autodesk Inventor, συνεπώς δεν απαιτεί από τον χρήστη να έχει διαθέσιμη την γλώσσα προγραμματισμού ως τρίτη εφαρμογή. Επιπλέον οι μακρο-εντολές της VBA μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα με τις τρέχουσες εφαρμογές στο Autodesk Inventor παρουσιάζοντας αυξημένη αποδοτικότητα και μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Παρακάτω (Σχήμα 3.2) φαίνεται το περιβάλλον της VBA.



Σχήμα 3.2: Περιβάλλον της Visual Basic

3.4 Δυνατότητες λογισμικού

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί τομές στο απόβλιπτο οδοντωτού τροχού σε κάθε θέση περιστροφής για όλες τις θέσεις κύλισης με σκοπό την εύρεση σε κάθε τομή της γεωμετρίας του απόβλιπτου. Το λογισμικό δύναται να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις στερεών μοντέλων αποβλίπτων που προκύπτουν κατά την διαδικασία προσομοίωσης της κοπής με την μέθοδο κύλισης οδοντωτών τροχών.

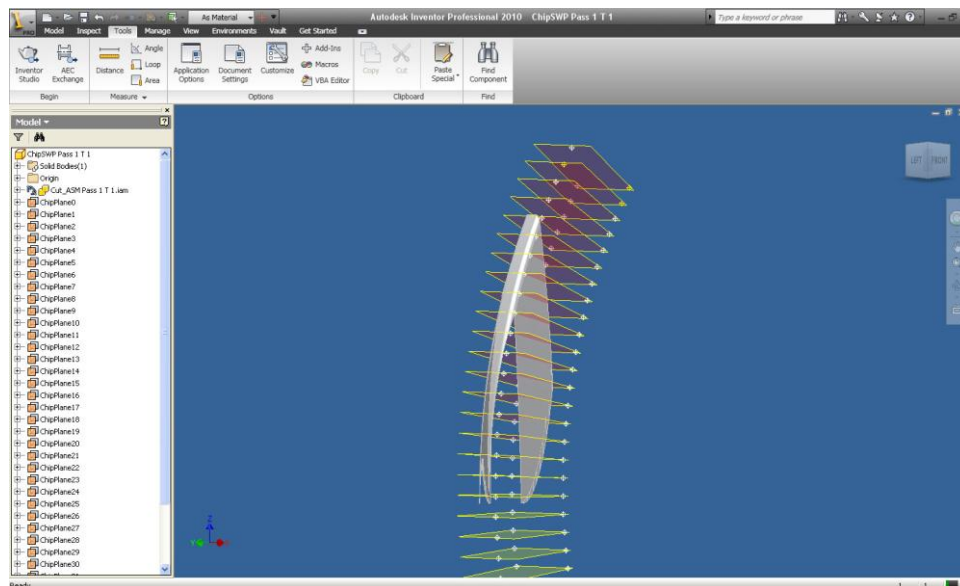
Κατάλληλη φόρμα δεδομένων που έχει κατασκευαστεί και εξηγείται στην συνέχεια δέχεται αριθμητικά χαρακτηριστικά αποβλίπτου καθώς και παραμέτρους ανάλυσης διευκολύνοντας την διαδικασία εύρεσης γεωμετρικών τιμών.

3.5 Αρχεία εισόδου – Εκκίνηση λογισμικού

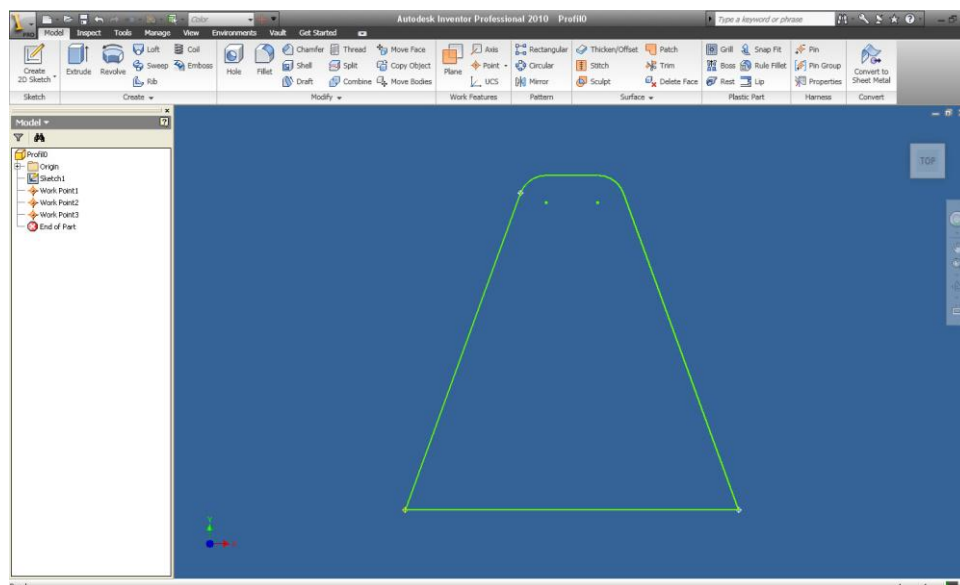
3.5.1 Αρχεία εισόδου

Για την εκτέλεση της εφαρμογής χρειάζεται αρχικά να εισαχθεί στο Autodesk inventor το στερεό μοντέλο του αποβλίπτου που θα αξιολογηθεί καθώς και το προφίλ του κοπτικού δοντιού (module).

Τα αρχεία εισόδου είναι μορφής “.iprt” και έχουν προέρθει από λογισμικό προσομοίωσης κοπής με κύλιση οδοντωτών τροχών. Παρακάτω (Σχήμα 3.3 , Σχήμα 3.4) φαίνεται στερεό μοντέλο αποβλήτου όπως προκύπτει από την κατεργασία κοπής καθώς και προφίλ του δοντιού σε γραφικό περιβάλλον Autodesk Inventor.



Σχήμα 3.3: Τεμάχιο προς μέτρηση μέσα από γραφικό περιβάλλον του Autodesk Inventor



Σχήμα 3.4: Προφίλ δοντιού μέσα από γραφικό περιβάλλον του Autodesk Inventor

3.5.2 Εκκίνηση λογισμικού

Η φόρμα που εμφανίζεται κατά την εκτέλεση του λογισμικού (Σχήμα 3.5) επιτρέπει με βάση τα αρχεία εισόδου, την εκκίνηση διαδικασίας αξιολόγησης του πάχους κοπής (GEAR INPUT DATA) καθώς και την εικονική διαίρεση του αποβλήτου σε τμήματα (SPLIT INPUT DATA).

The image shows a software interface with a light beige background. It is divided into two main sections for data input.

GEAR INPUT DATA

- scale of step:
- start part:
- end part:
- location:
- ☐ insert point:
- execute** button

SPLIT INPUT DATA

- chip:
- start:
- end plane:
- location:
- execute** button

Below the 'SPLIT INPUT DATA' section is a large, empty rectangular box with a thin black border.

Σχήμα 3.5: Φόρμα εκκίνησης λογισμικού

Για μέτρηση πάχους κοπής (GEAR INPUT DATA) ο χρήστης καλείται να επιλέξει:

- Την διαίρεση βήματος μέτρησης πάχους κοπής
- Το αρχικό έως και το τελικό κομμάτι που θέλει να αξιολογήσει
- Την τοποθεσία που έχει καταχωρήσει το απόβλιττο

Για την διαίρεση του αποβλίττου σε τμήματα (SPLIT INPUT DATA) ο χρήστης καλείται να επιλέξει:

- Το απόβλιττο που θέλει να αναλύσει
- Το αρχικό και τελικό επίπεδο (θέση περιστροφής) του αποβλίττου
- Την τοποθεσία που έχει καταχωρήσει το απόβλιττο

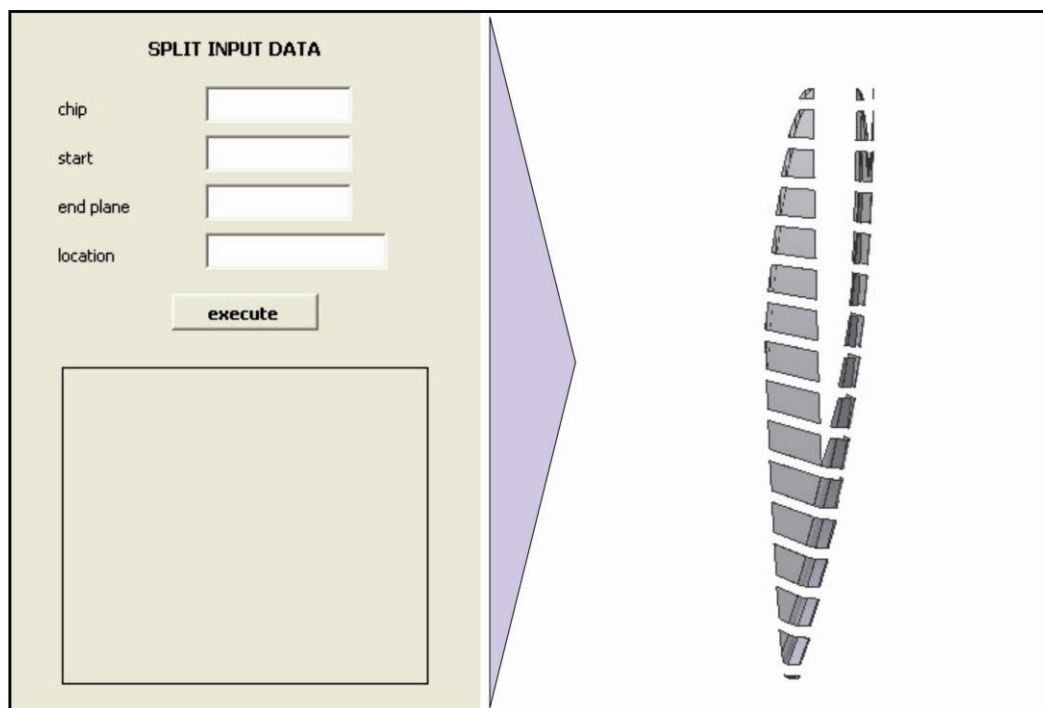
Με χρήση της εντολής **“execute”** ξεκινά αντίστοιχα η οποιαδήποτε από τις δυο διαδικασίες.

3.6 Αρχεία εξόδου

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα αποτελέσματα της γεωμετρικής ανάλυσης καταχωρούνται στην τοποθεσία "C:\hobbing\results". Τα αρχεία εξόδου που δημιουργούνται είναι τα εξής:

- Αρχείο μορφής ".txt" με την ονομασία "area". Περιέχει αποτελέσματα μέτρησης εμβαδού επιφάνειας κάθετη στο απόβλιπτο.
- Αρχείο μορφής ".txt" με την ονομασία "thickness". Περιέχει αποτελέσματα μέτρησης πάχους κοπής στο προφίλ του αποβλίπτου.
- Αρχεία μορφής ".ipt" και ".jpeg" με την διαίρεση που πραγματοποιείται στο στερεό μοντέλο του αποβλίπτου κατά την εφαρμογή.

Κατά την διαδικασία διαίρεσης το επεξεργασμένο μοντέλο (Σχήμα 3.6) εμφανίζεται σε μορφή ".jpg" στην φόρμα επιλογών ως αρχείο εξόδου.



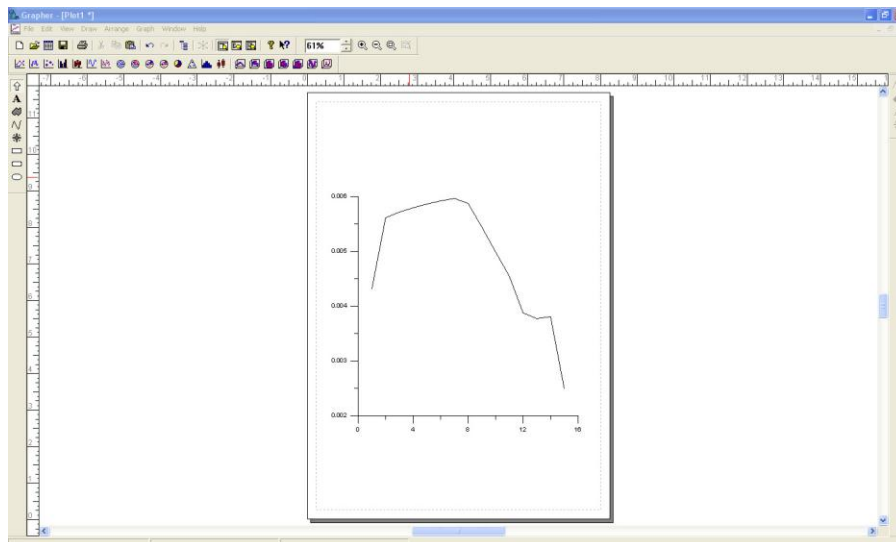
Σχήμα 3.6: Απόβλιπτο μετά την διαδικασία διαίρεσης

Τα αρχεία "area" και "thickness" μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία και εξαγωγή διαγραμμάτων σε προγράμματα όπως EXCEL και GRAPHER .

3.7 Προγράμματα παρουσίασης αποτελεσμάτων

3.7.1 Κατασκευή καμπυλών μεταβολής γεωμετρίας αποβλίπτου

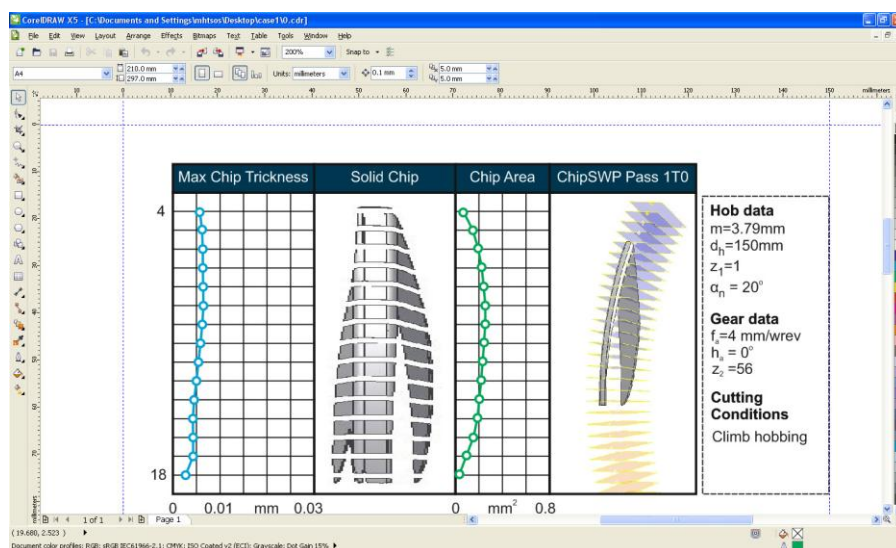
Τα αριθμητικά αποτελέσματα που αποθηκεύονται σε αρχείο ".txt" καταχωρούνται σε πρόγραμμα κατασκευής γραφημάτων GRAPHER 4 δημιουργώντας της καμπύλες πάχους και επιφάνειας του αποβλίπτου. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος GRAPHER 4.



Σχήμα 3.7: Περιβάλλον εργασίας του προγράμματος GRAPHER 4.

3.7.2 Παρουσίαση καμπυλών μεταβολής γεωμετρίας αποβλήτου

Τα γραφήματα των καμπυλών που κατασκευάζονται στο πρόγραμμα GRAPHER 4 στην συνέχεια καταχωρούνται στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Corel Draw X5 όπου και διαμορφώνονται στην τελική τους μορφή για την παρουσίαση τους όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.8 παρακάτω.



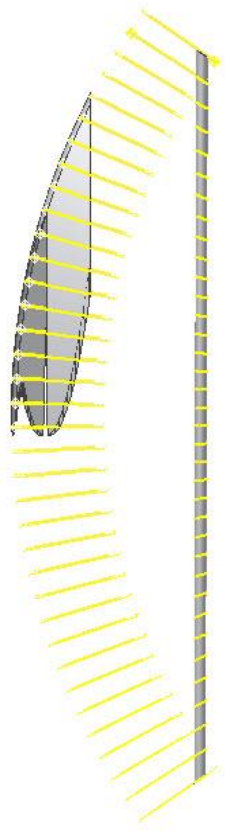
Σχήμα 3.8: Περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Corel Draw X5

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

4.1 Δημιουργία τομών στο απόβλιττο

Έχει δημιουργηθεί υποπρόγραμμα το οποίο λαμβάνει υπόψη του για ανάλυση τα επίπεδα που τέμνουν το στερεό απόβλιττο στις θέσεις περιστροφής δηλαδή μόνο αυτά που τέμνουν υλικό αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο και το προγραμματιστικό λάθος. Αυτό πραγματοποιείται δημιουργώντας εικονική ράβδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 πίσω από

το απόβλιπτο μέσω εύρεσης της ακτίνας του module και της εφαρμογής “loft” του Autodesk Inventor.

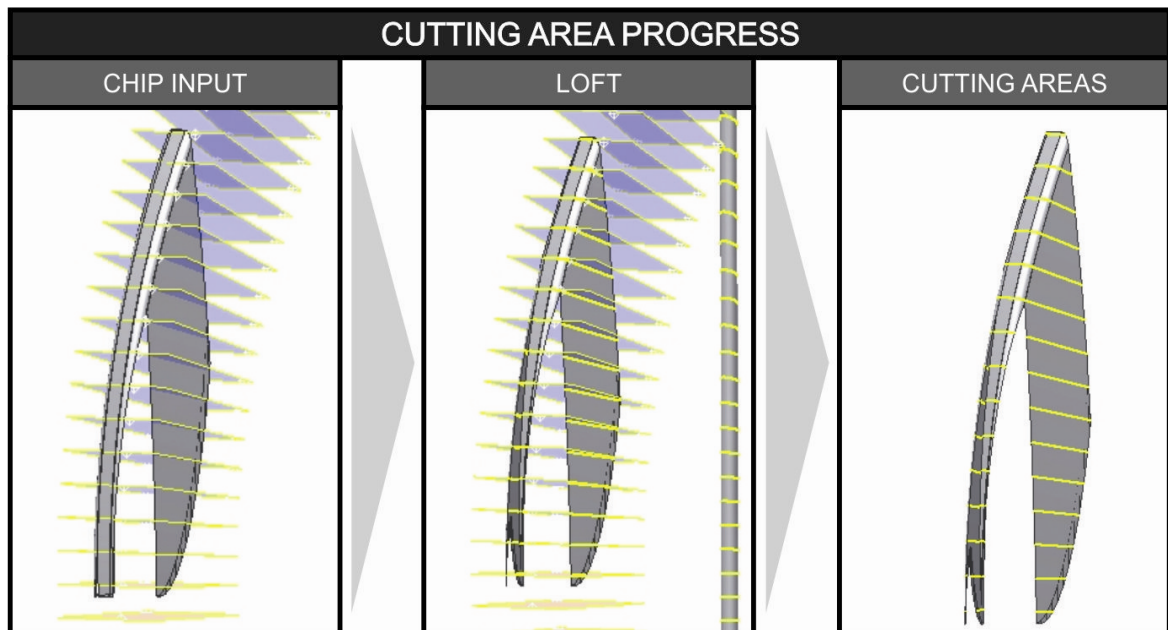


Σχήμα 4.1: Διαδικασία loft στο απόβλιπτο

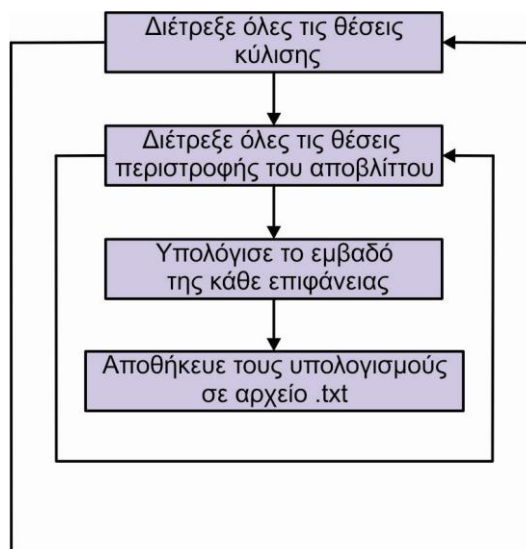
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα κομμάτι κώδικα της διαδικασίας αυτής. Η δημιουργία της βοηθητικής αυτής ράβδου επιτυγχάνεται δημιουργώντας SketchCircles σε συγκεκριμένες θέσεις και εισάγοντας μεταξύ αυτών υλικό. Να σημειώσουμε ότι η δημιουργία της ράβδου αυτής είναι βοηθητική για την αποφυγή προγραμματιστικού λάθους και δεν επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

```
Dim oCircle1 As SketchCircle
Set oCircle1 = osketch.SketchCircles.AddByCenterRadius(oTransGeom.CreatePoint2d(0, mitsos * 2), mitsos)
Dim oProfile1 As Profile
Set oProfile1 = osketch.Profiles.AddForSolid
Dim osketch0 As PlanarSketch
Set osketch0 = oCompDef.Sketches.Add(oCompDef.WorkPlanes.Item("ChipPlane" & iPlanes1))
Dim oCircle2 As SketchCircle
Set oCircle2 = osketch0.SketchCircles.AddByCenterRadius(oTransGeom.CreatePoint2d(0, mitsos * 2), mitsos)
```

Στη συνέχεια το πρόγραμμα σαρώνει τα επίπεδα που κόβουν υλικό και υπολογίζει το εμβαδόν κάθε επιφάνειας του απόβλιττου. Τα αποτελέσματα μέτρησης επιφανειών αποθηκεύονται σε αρχείο ως “area.txt”. Η διαδικασία και το διάγραμμα ροής υπολογισμού των επιφανειών φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.2: Διαδικασία σχηματισμού τομών στο απόβλιττο



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής υπολογισμού επιφανειών στο απόβλιττο

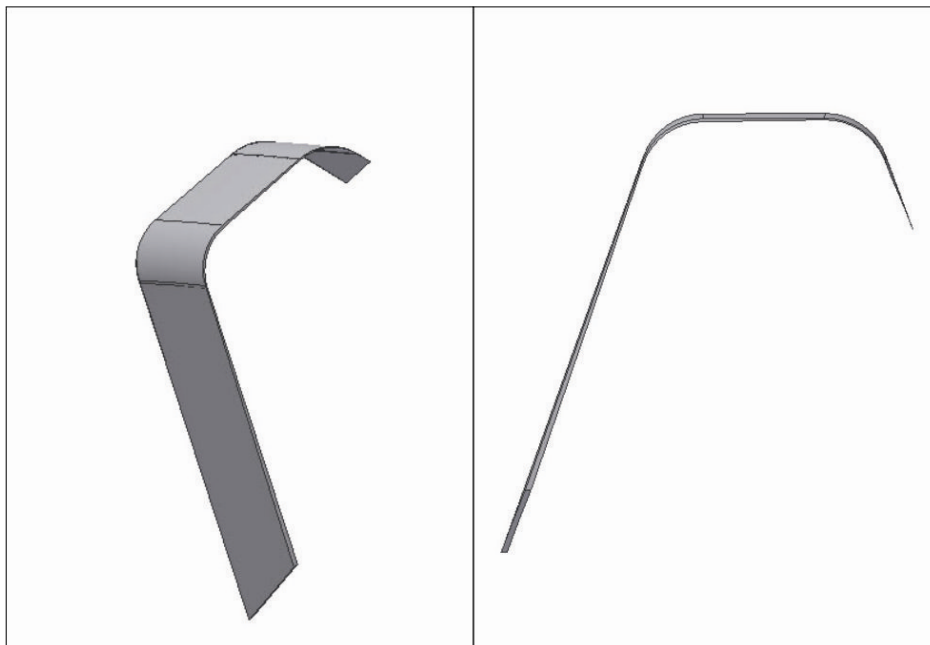
Παρακάτω απεικονίζεται η υπορουτίνα που χρησιμοποιείται και υπολογίζει την επιφάνεια για κάθε θέση περιστροφής του απόβλιττου.

```

For i = m - 1 To iPlanes1 - (n + 1)
    Set osketch = oCompDef.Sketches.Add(oCompDef.WorkPlanes.Item("ChipPlane" & i), True)
    osketch.Edit
    Set oPasteControlDef =
  
```

```
ThisApplication.CommandManager.ControlDefinitions.Item("SketchProjectCutEdgesCmd")  
oPasteControlDef.Execute
```

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η επιφάνεια του αποβλήτου που σαρώνει και υπολογίζει η παραπάνω υπορουτίνα για συγκεκριμένη θέση περιστροφής.



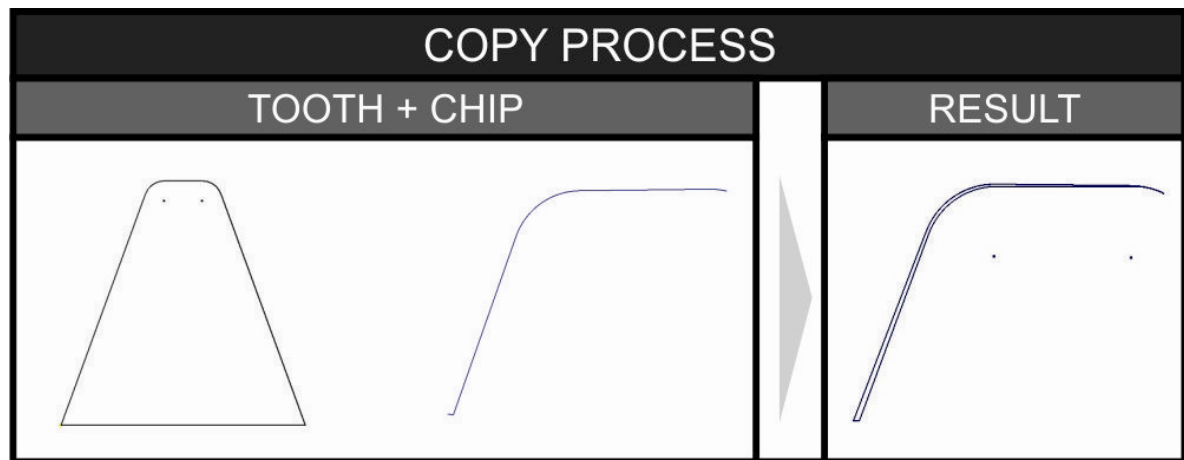
Σχήμα 4.4: Επιφάνεια συγκεκριμένης θέσης περιστροφής

4.2 Διαδικασία αντιγραφής στο απόβλιττο

Δημιουργείται συνάρτηση η οποία αντιγράφει το προφίλ της εκάστοτε επιφάνειας του αποβλήτου στο προφίλ του οδόντος του κοπτικού εργαλείου. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας το επεξεργασμένο κομμάτι αποθηκεύεται. Λειτουργικό κομμάτι της συνάρτησης αυτής φαίνεται στη συνέχεια.

```
Dim oSketchToCopy As PlanarSketch  
Set oSketchToCopy = oDef.Sketches.Item(1)  
Call oPartDoc.SelectSet.Clear  
Call oPartDoc.SelectSet.Select(oSketchToCopy)  
Dim oCopyControlDef As ControlDefinition  
Set oCopyControlDef = ThisApplication.CommandManager.ControlDefinitions.Item("AppCopyCmd")  
oCopyControlDef.Execute  
Set oPartDoc1 = ThisApplication.Documents.Add(kPartDocumentObject, _  
ThisApplication.FileManager.GetTemplateFile(kPartDocumentObject))  
Set oCompDef = oPartDoc1.ComponentDefinition  
Dim osketch As PlanarSketch  
Set osketch = oCompDef.Sketches.Add(oCompDef.WorkPlanes.Item(3))  
osketch.Edit  
Dim oPasteControlDef As ControlDefinition  
Set oPasteControlDef = ThisApplication.CommandManager.ControlDefinitions.Item("AppPasteCmd")  
oPasteControlDef.Execute
```

Στο παρακάτω Σχήμα 4.5 φαίνεται εικονικά η πρόοδος της διαδικασίας αντιγραφής της ακμής του αποβλήτου στην ακμή δοντιού καθώς και μια πρώτη εικόνα του πάχους κοπής στο συγκεκριμένο επίπεδο.



Σχήμα 4.5: Διαδικασίας αντιγραφής της ακμής του αποβλήτου στην ακμή δοντιού

4.3 Διαδικασία fixing

Στην συγκεκριμένη διαδικασία μέσω της εφαρμογής FIXING του Autodesk Inventor “κλειδώνουμε” όλα τα σημεία και τα entities του επεξεργασμένου από την προηγούμενη διαδικασία κομματιού. Η διαδικασία αυτή εκτελείται για το κλείδωμα των γραμμών, των σημείων, και των καμπυλών στο δισδιάστατο πλέον κομμάτι μας για να είναι δυνατή στην συνέχεια η επεξεργασία.

Η υπορουτίνα παρακάτω χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη συνάρτηση καθώς βρίσκει τα sketch entities (points, elliptical arcs) σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 8 και τα κλειδώνει.

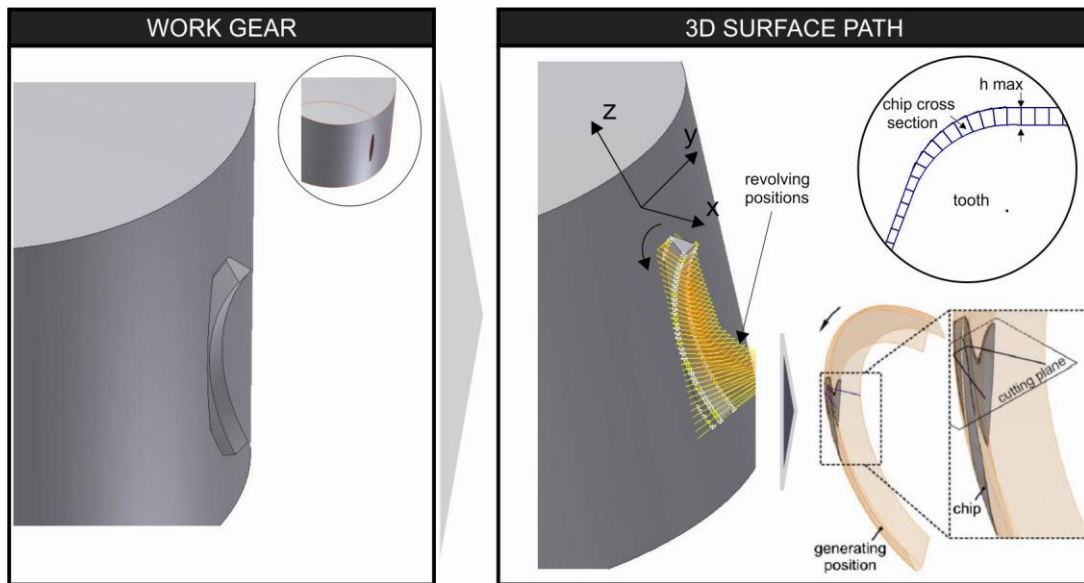
```

For i = 1 To k
  If osketch.SketchEntities.Item(i).Type = kSketchPointObject Then
    If Not (osketch.SketchEntities.Item(i).Geometry.Y) > 8 Then
      Call osketch.GeometricConstraints.AddGround(osketch.SketchEntities.Item(i))
    End If
  End If
  If osketch.SketchEntities.Item(i).Type = kSketchEllipticalArcObject Then
    Call osketch.GeometricConstraints.AddGround(osketch.SketchEntities.Item(i))
  End If
End If
Next i

```

4.4 Προσδιορισμός πάχους κοπής στο απόβλιττο

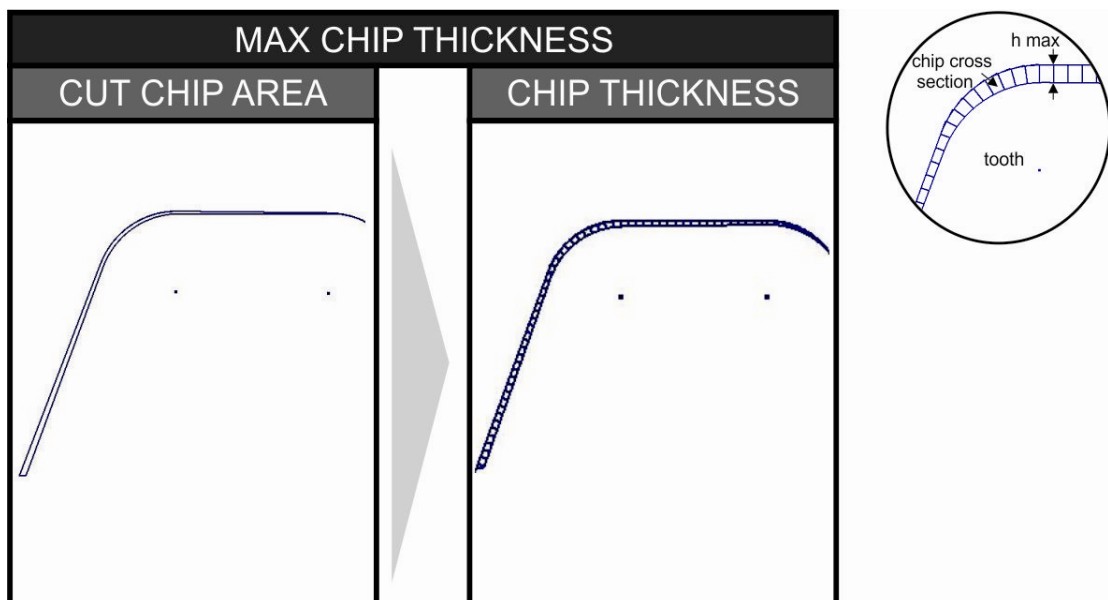
Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι και η πιο σημαντική λειτουργικά στο όλο λογισμικό που κατασκευάστηκε.



Σχήμα 4.6: Κομμάτι προς επεξεργασία και ανάπτυξη τροχιάς κοπτικού

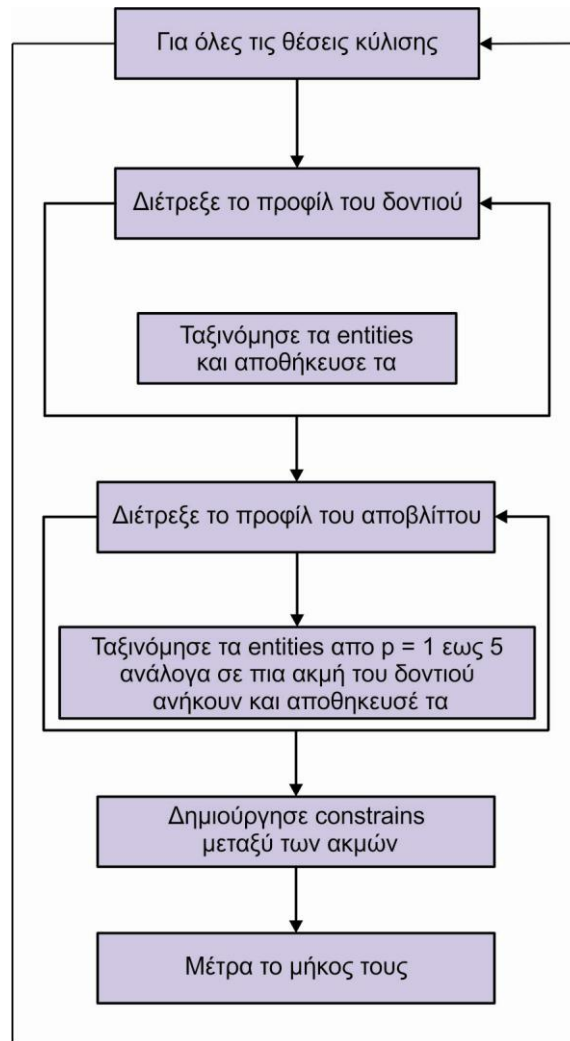
Έχοντας δημιουργήσει την αντιγραφή της ακμής του αποβλίττου στο προφίλ του κοπτικού δοντιού επιδιώκουμε την κατασκευή γραμμών (μηκών) στο επεξεργασμένο κομμάτι μεταξύ των ακμών δοντιού και αποβλίττου.

Παρακάτω (Σχήμα 4.7) παρουσιάζεται η εικονικά η διαδικασία τοποθέτησης μηκών για την αξιολόγηση του πάχους κοπής. Αριστερά η αντιγραφή του προφίλ του δοντιού στο απόβλιττο. Δεξιά τα μήκη που δημιουργούνται περιφερειακά μεταξύ των ακμών.



Σχήμα 4.7: Διαδικασία τοποθέτησης μηκών

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 4.8).



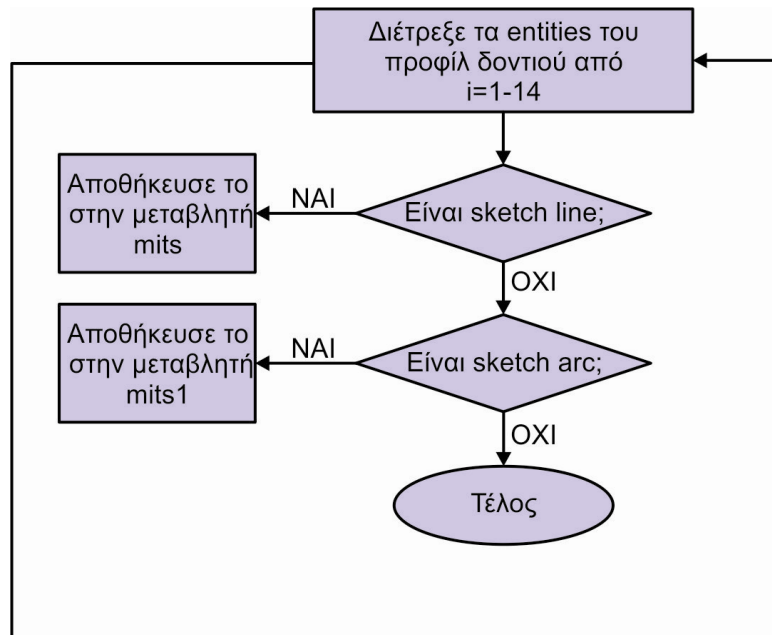
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής προσδιορισμού πάχους κοπής αποβλήτου

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τον υπολογισμό του μέγιστου μήκους κοπής σε κάθε επίπεδο του αποβλήτου παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Να σημειωθεί ότι κατά την κατασκευή της συγκεκριμένης συνάρτησης προέκυπταν αρκετά εμπόδια στην ροή λόγω πολυπλοκότητας του κώδικα και αδυναμίας μεταγλώττισης της γλώσσας προγραμματισμού σε αρκετά σημεία με αποτέλεσμα την εμφάνιση προγραμματιστικών σφαλμάτων. Για την αποφυγή των σφαλμάτων αυτών και την δημιουργία αξιοπιστίας στο λογισμικό έγινε εκτεταμένη χρήση υπορουτίνων και συνθηκών οι οποίες δεν χρήζουν λόγω να εκτεθούν και να σχολιαστούν. Θα παρατεθούν λοιπόν παρακάτω ορισμένα δειγματικά κομμάτια του κώδικα που αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες διαδικασίες.

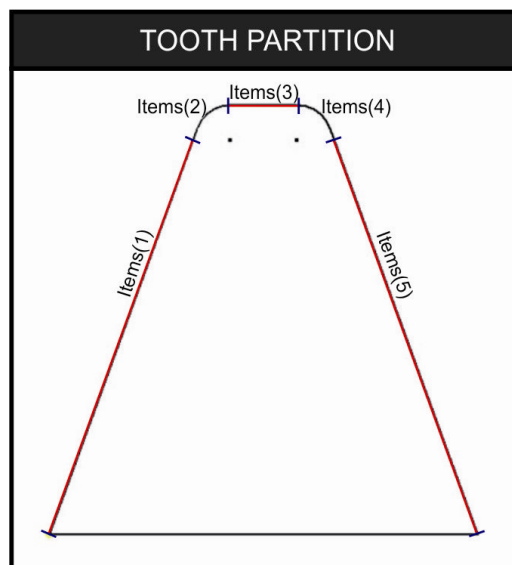
4.4.1 Προσδιορισμός των sketch entities του δοντιού

Το προφίλ του δοντιού του κοπτικού εργαλείου αποτελείται από δεκατέσσερα sketch entities, τα οποία διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: sketch lines, sketch points, sketch arcs, sketch elliptical arcs. Η παρακάτω διαδικασία (Σχήμα 4.9) ελέγχει σε ποιά κατηγορία ανήκει κάθε entity και στην συνέχεια τα αποθηκεύει σε μεταβλητές και τα ταξινομεί.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσδιορισμού των sketch entities σε προφίλ του δοντιού

Στην συνέχεια αυτό επιτυγχάνεται η διαίρεση και κατηγοριοποίηση των μερών του προφίλ του δοντιού σε μεταβλητές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 . Οι μεταβλητές αυτές (Items(1), Items(2), Items(3), Items(4), Items(5)) ορίζουν τα πέντε τμήματα του προφίλ του δοντιού τα οποία θα μας χρησιμεύσουν στην συνέχεια για την τμηματοποίηση των στοιχείων του αποβλήτου και την δημιουργία των μηκών μέτρησης πάχους από ακμή σε ακμή.



Σχήμα 4.10: Διακριτοποίηση δοντιού σε sketch entities

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα κομμάτι του κώδικα της διαδικασίας αυτής με τις συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την καταχώρηση των τμημάτων του δοντιού σε μεταβλητές.

```
If mits.EndSketchPoint.Geometry.x = 0 And mits.StartSketchPoint.Geometry.Y =
```

```

mits.EndSketchPoint.Geometry.Y Then
    Set Items(0) = mits
End If
If mits.EndSketchPoint.Geometry.x <> 0 And mits.StartSketchPoint.Geometry.Y =
mits.EndSketchPoint.Geometry.Y Then
    Set Items(3) = mits
End If
If mits.Geometry.StartPoint.Y <> mits.Geometry.EndPoint.Y Then
    If mits.Geometry.StartPoint.Y < mits.Geometry.EndPoint.Y Then
        Set Items(1) = mits
    End If
    If mits.Geometry.StartPoint.Y > mits.Geometry.EndPoint.Y Then
        Set Items(5) = mits
    End If
End If

```

Η αποθήκευση των μεταβλητών λοιπόν έχει ως εξής:

Items(1) → sketch line

Items(2) → sketch Arc

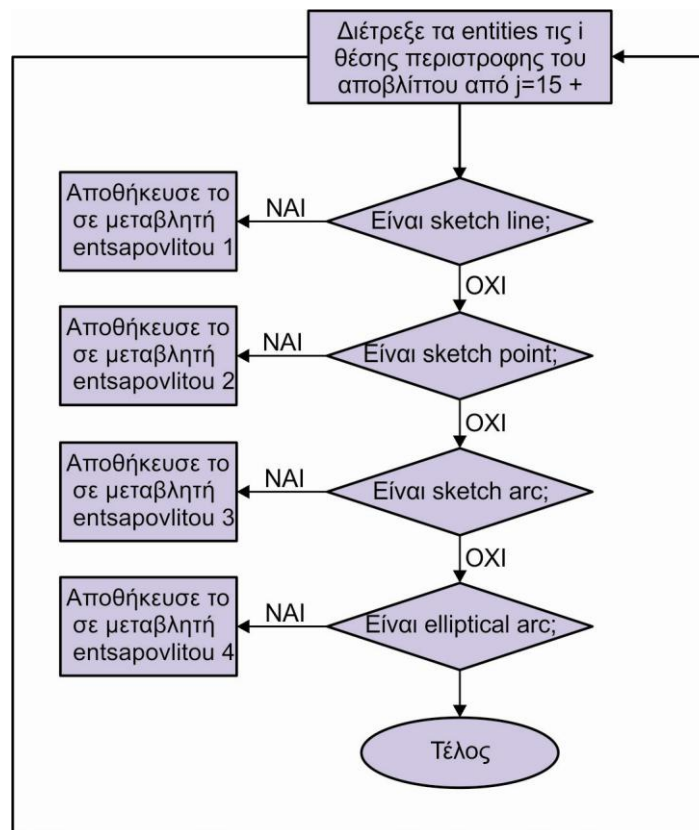
Items(3) → sketch line

Items(4) → sketch Arc

Items(5) → sketch line

4.4.2 Προσδιορισμός των sketch entities στις θέσεις περιστροφής του αποβλήτου

Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία εύρεσης και κατηγοριοποίησης των sketch entities των προφίλ στις θέσεις περιστροφής του αποβλήτου (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσδιορισμού των sketch entities σε κάθε θέση περιστροφής.

Παρακάτω βλέπουμε αντίστοιχα το δειγματικό κομμάτι του κώδικα όπου με χρήση συνθηκών γίνεται η εύρεση των sketch entities και η αυτόματη αποθήκευσή τους σε μεταβλητές.

Τα sketch entities που βρίσκονται είναι :

- Sketch splines
- Sketch lines
- Sketch points
- Sketch elliptical arcs

```
If k = 0 Then
    Set EntsApovlitou(m) = osketch1.SketchEntities.Item(i)
    If EntsApovlitou(m).Type = kSketchSplineObject Then
        Set mits2 = EntsApovlitou(m)
        xentsapovlitou(m) = mits2.StartSketchPoint.Geometry.x
    End If
    If EntsApovlitou(m).Type = kSketchArcObject Then
        Set mits1 = EntsApovlitou(m)
        xentsapovlitou(m) = mits1.StartSketchPoint.Geometry.x
    End If
    If EntsApovlitou(m).Type = kSketchLineObject Then
        Set mits = EntsApovlitou(m)
        xentsapovlitou(m) = mits.StartSketchPoint.Geometry.x
    End If
    If EntsApovlitou(m).Type = kSketchEllipticalArcObject Then
        Set mits3 = EntsApovlitou(m)
        xentsapovlitou(m) = mits3.EndSketchPoint.Geometry.x
    End If
    m = m + 1
End If
```

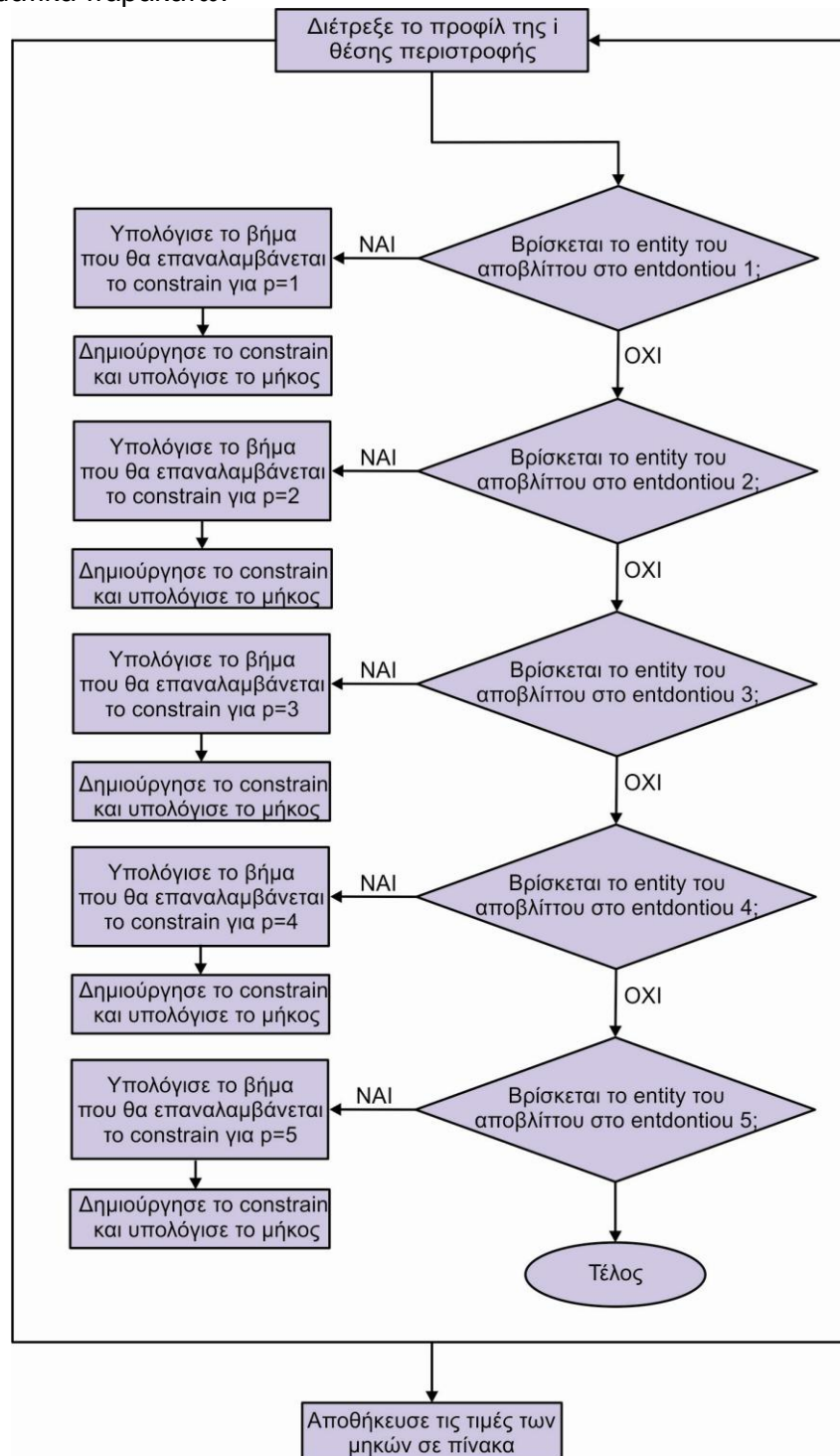
Το επόμενο βήμα της διαδικασίας αυτής είναι με χρήση κατάλληλου υποπρογράμματος να βρεθεί σε ποια τμήματα Items() του δοντιού αντιστοιχούν τα entities του αποβλήτου (σε ποιό Items() ξεκινάει το απόβλιττο και που τελειώνει) που μόλις βρέθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε μεταβλητές ανάλογα με το είδος τους στην προηγούμενη υπορουτίνα. Μέρος του κώδικα της διαδικασίας αυτής δίνεται παρακάτω.

```
If ptval5(0) < Items(1).Geometry.EndPoint.x Then p = 1
    If ptval5(0) < Items(2).Geometry.StartPoint.x And ptval5(0) >= Items(1).Geometry.EndPoint.x Then
        p = 2
    If ptval5(0) < Items(3).Geometry.EndPoint.x And ptval5(0) >= Items(2).Geometry.StartPoint.x Then
        p = 3
    If ptval5(0) < Items(4).Geometry.StartPoint.x And ptval5(0) >= Items(3).Geometry.EndPoint.x Then
        p = 4
    If ptval5(0) >= Items(5).Geometry.StartPoint.x Then p = 5
    If ptval6(0) >= Items(5).Geometry.StartPoint.x Then q = 1
    If ptval6(0) >= Items(3).Geometry.EndPoint.x And ptval6(0) < Items(4).Geometry.StartPoint.x Then
        q = 2
    If ptval6(0) < Items(3).Geometry.EndPoint.x And ptval6(0) >= Items(2).Geometry.StartPoint.x Then
        q = 3
    If ptval6(0) < Items(3).Geometry.StartPoint.x And ptval6(0) > Items(2).Geometry.EndPoint.x Then q
        = 4
    If ptval6(0) <= Items(1).Geometry.EndPoint.x Then q = 5
```

Για κάθε $p = 1, 2, 3, 4, 5$ μεταφερόμαστε και στο αντίστοιχο τμήμα δοντιού – αποβλίπτου.

4.4.3 Υπολογισμός πάχους κοπής (Thickness)

Η παρακάτω διαδικασία (Σχήμα 4.12) ελέγχει και διαχωρίζει για κάθε ένα από τα πέντε πρώτα sketch entities του δοντιού τι entity αποβλίπτου βρίσκεται απέναντί τους. Αποθηκεύει τους συνδυασμούς αυτούς σε πέντε διαφορετικές καταστάσεις ($p = 1$ έως 5). Στην συνέχεια για κάθε κατάσταση υπολογίζεται το βήμα που θα επαναληφθεί η μέτρηση μήκους και δημιουργείται το μήκος μέσω του οποίου υπολογίζουμε το βάθος κοπής. Η διαδικασία φαίνεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσδιορισμού του πάχους κοπής σε κάθε θέση περιστροφής.

Κατόπιν με την χρήση του παρακάτω κώδικα όλα τα μήκη μεταξύ των ακμών (αποβλήτου-δοντιού) για κάθε θέση περιστροφής βρίσκονται με χρήση συνθήκης και αποθηκεύονται στον "mlinespinakas(v)".

```
mlinespinakas(v) = oLine1.Length
Set pinakasLines(v) = oLine1
pinakasxyl(v, 0) = oLine1.StartSketchPoint.Geometry.x
pinakasxyl(v, 1) = oLine1.StartSketchPoint.Geometry.Y
If oLine1.Length = mikosLine1 Then
    pinakasxyl(v, 2) = 0
    mlinespinakas(v) = 0
Else
    pinakasxyl(v, 2) = oLine1.Length
    mlinespinakas(v) = oLine1.Length
End If
```

Στην συνέχεια με χρήση βρόγχου που παρουσιάζεται παρακάτω επιλέγουμε το μέγιστο και ελάχιστο μήκος σε κάθε θέση περιστροφής του αποβλήτου.

```
For i = 0 To v - 1
    If shmeio = pinakasxyl(i) Then
        enshmeio = mlinespinakas(i)
    Else
        If shmeio > pinakasxyl(i) And shmeio < pinakasxyl(i + 1) Then
            enshmeio = mlinespinakas(i) + ((mlinespinakas(i + 1) + mlinespinakas(i)) *
            ((shmeio - pinakasxyl(i)) / (pinakasxyl(i + 1) - pinakasxyl(i))))
        End If
    End If

Next i

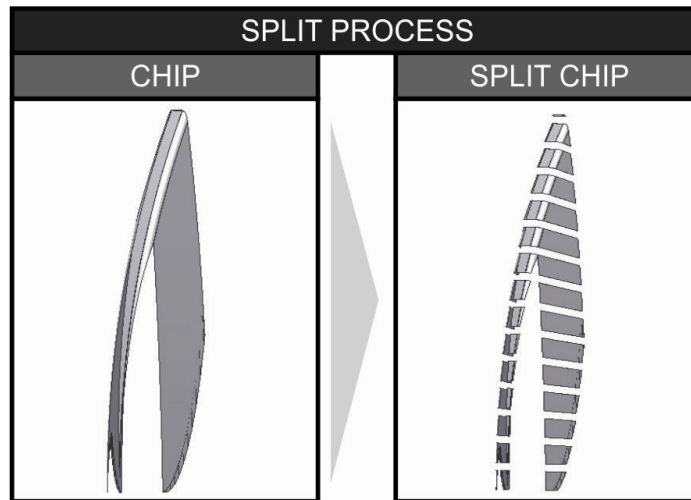
Line1:
oPartDoc1.Save
oPartDoc1.Close

i = 0
stoixeio = 0
For i = 0 To v - 1
    If stoixeio < mlinespinakas(i) Then
        stoixeio = mlinespinakas(i)
    End If
Next i

i = 0
stoixeio = 0
For i = 0 To v - 1
    If stoixeio > mlinespinakas(i) Then
        stoixeio = mlinespinakas(i)
    End If
Next i
```

4.5 Διαδικασία διαίρεσης του αποβλίττου (Split)

Με χρήση καταλλήλου λογισμικού το οποίο δημιουργήθηκε στα πλαίσια της εργασίας δημιουργούμε τομές στο στερεό αποβλίττο με σκοπό την διαίρεσή του σε επιμέρους τμήματα. Στις τομές αυτές πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση εμβαδού επιφανειών και πάχους κοπής. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας σε στερεό μοντέλο αποβλίττου παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση στερεού αποβλίττου το οποίο έχει διαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα

Με την χρήση καταλλήλου υποπρογράμματος που παρουσιάζεται παρακάτω της συνάρτησης SPIIT πετυχαίνουμε διαίρεση του αποβλίττου σε κάθε θέση περιστροφής, ενώ στην συνέχεια πραγματοποιείται εκ' νέου συναρμολόγηση των μερών με κάποια ανοχή απόστασης μεταξύ τους .

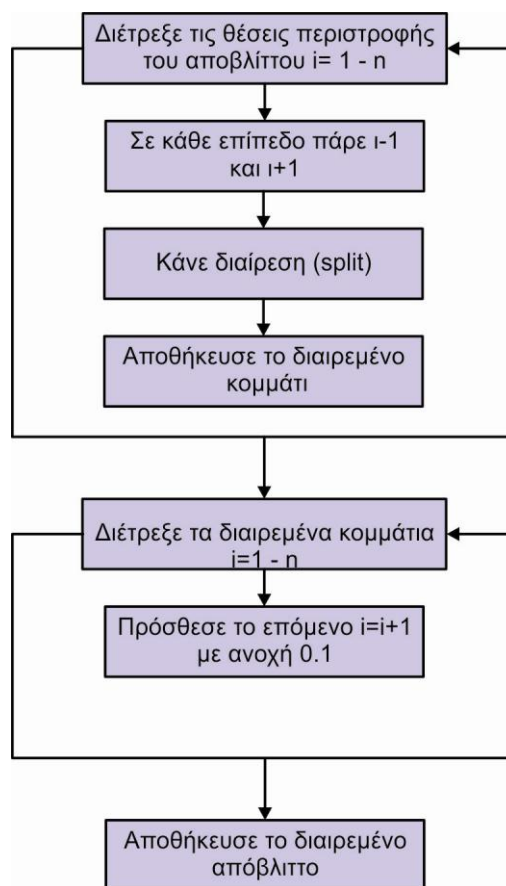
```
k = i - 1
Dim ospltcomp As SplitFeature
Set ospltcomp = oCompDef.Features.SplitFeatures.TrimSolid(oCompDef.WorkPlanes.Item("ChipPlane" & i), oCompDef.SurfaceBodies.Item(1), True)
Dim ospltcomp1 As SplitFeature 'kovei apo k kai katw'
Set ospltcomp1 = oCompDef.Features.SplitFeatures.TrimSolid(oCompDef.WorkPlanes.Item("ChipPlane" & k), oCompDef.SurfaceBodies.Item(1), False)
```

```
For i = ar
  c = c - 0.1
  Call oMatrix.SetToRotation(3.14159265358979 / 4, oTG.CreateVector(0, 0, 1), oTG.CreatePoint(0, 0, 0))
  Call oMatrix.SetTranslation(oTG.CreateVector(1, 1, c))
  Dim oOcc As ComponentOccurrence
  Set oOcc = oAsmCompDef2.Occurrences.Add("C:\hobbing\split\part" & i & ".ipt", oMatrix)
Next i
```

Το συγκεκριμένο λογισμικό κάνει χρήση στερεών αποβλίττων που έχουν προέλθει από προσομοίωση κοπής. Κατά την διαδικασία εισάγουμε σε κατάλληλη φόρμα που έχει δημιουργηθεί την εκάστοτε θέση κύλισης του αποβλίττου που θέλουμε να επεξεργαστούμε. Το λογισμικό δουλεύει ως εξής: Διατρέχει όλες τις θέσεις περιστροφής του αποβλίττου και

πραγματοποιεί τομές μέσω της εφαρμογής SPLIT που παρέχεται από το πρόγραμμα Autodesk Inventor αποθηκεύοντας τα κομμάτια σε ξεχωριστά αρχεία μορφής “.ipt”.

Στην συνέχεια κατάλληλο υποπρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί εισάγει τα διαιρεμένα κομμάτια του αρχικού αποβλήτου και τα συναρμολογεί εκ' νέου με μεταξύ τους ανοχή 0.1 mm. Το καινούργιο αρχείο δημιουργείται σε περιβάλλον assembly του Autodesk Inventor και αποθηκεύεται σε μορφή “.iam” αλλά και σε μορφή “.jpg” ως αρχείο εξόδου στην φόρμα δεδομένων. Η ροή της διαδικασίας φαίνεται στο (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής διαδικασίας διαίρεσης του αποβλήτου με την εφαρμογή SPLIT.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

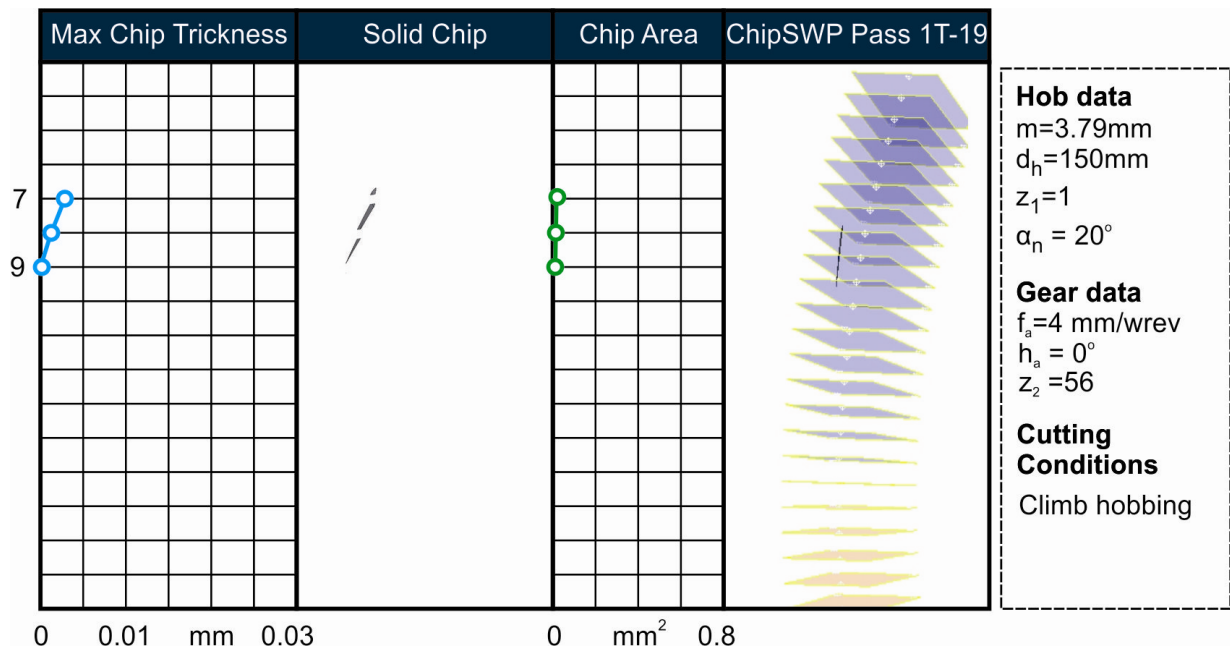
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ανακτήθηκαν για συγκεκριμένη κοπή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά κατεργασίας:

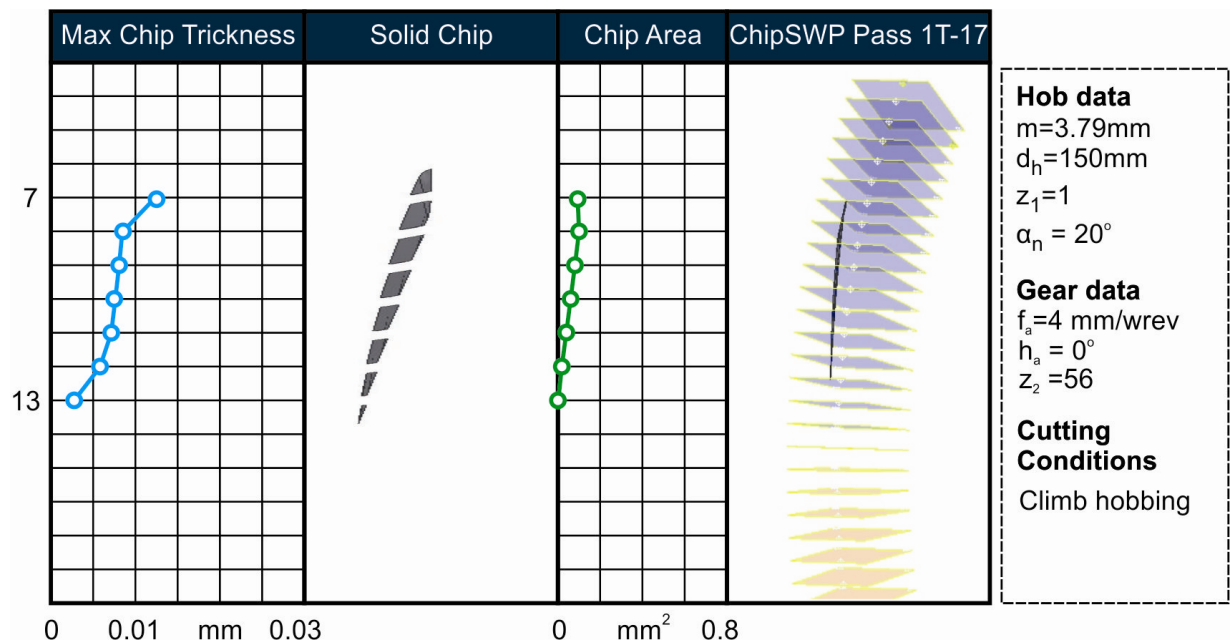
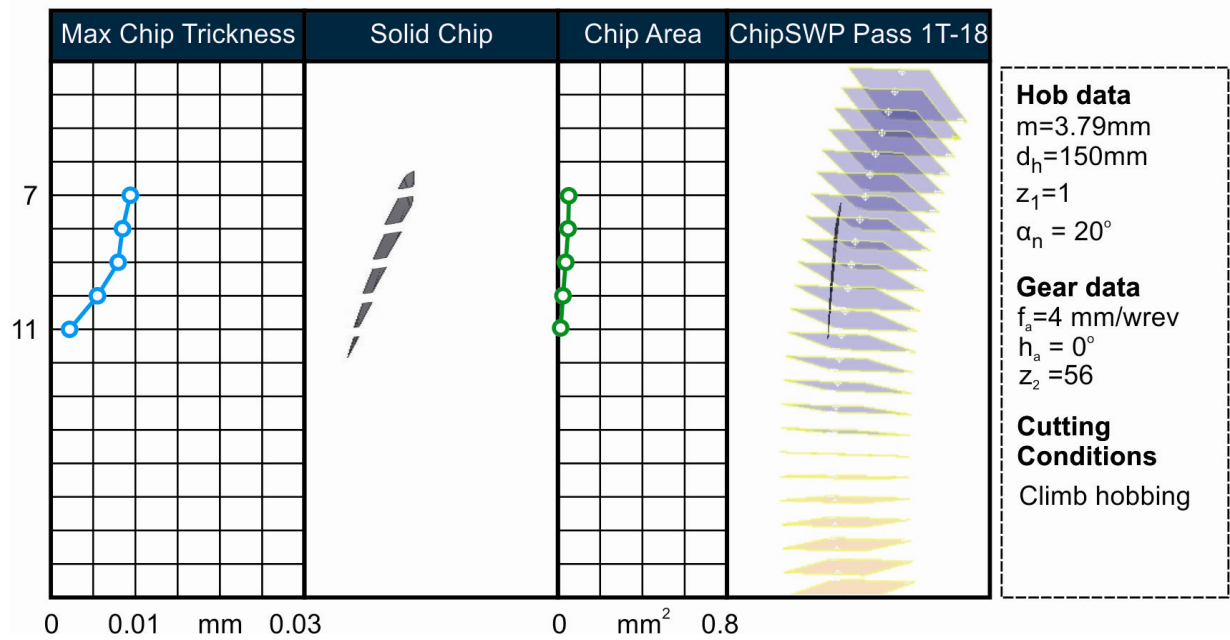
Module	3.79 mm
Διάμετρος φραιζας	150 mm
Αριθμός αρχών φραιζας	1
Γωνία πίεσης	20°
Αξονική πρόωση	4 mm/wrev
Γωνία ελίκωσης	0°
Αριθμός δοντιών τροχού	56
Συνθήκες κοπής	climb hobbing

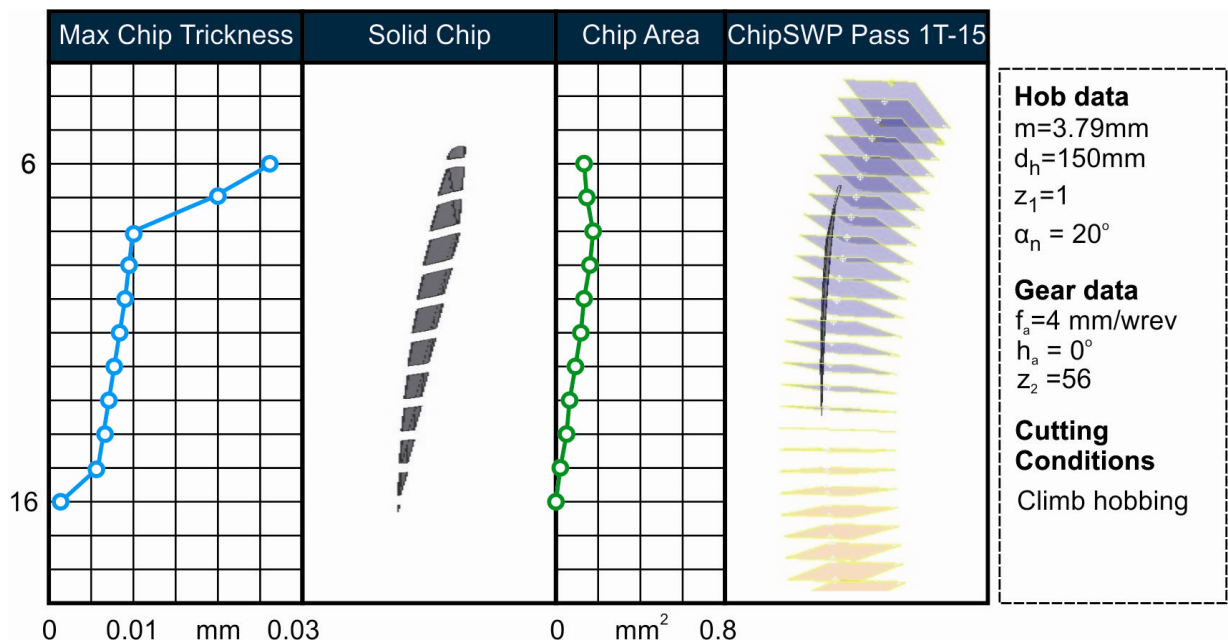
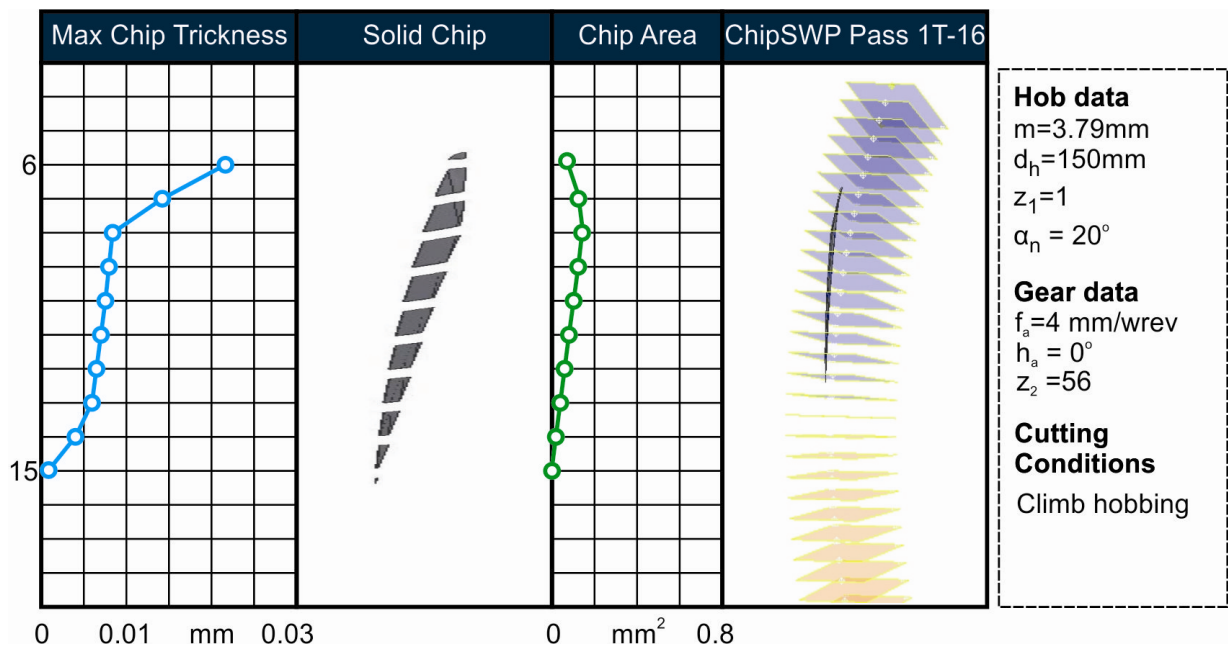
Οι πίνακες αποτελεσμάτων παραθέτουν τα εξής:

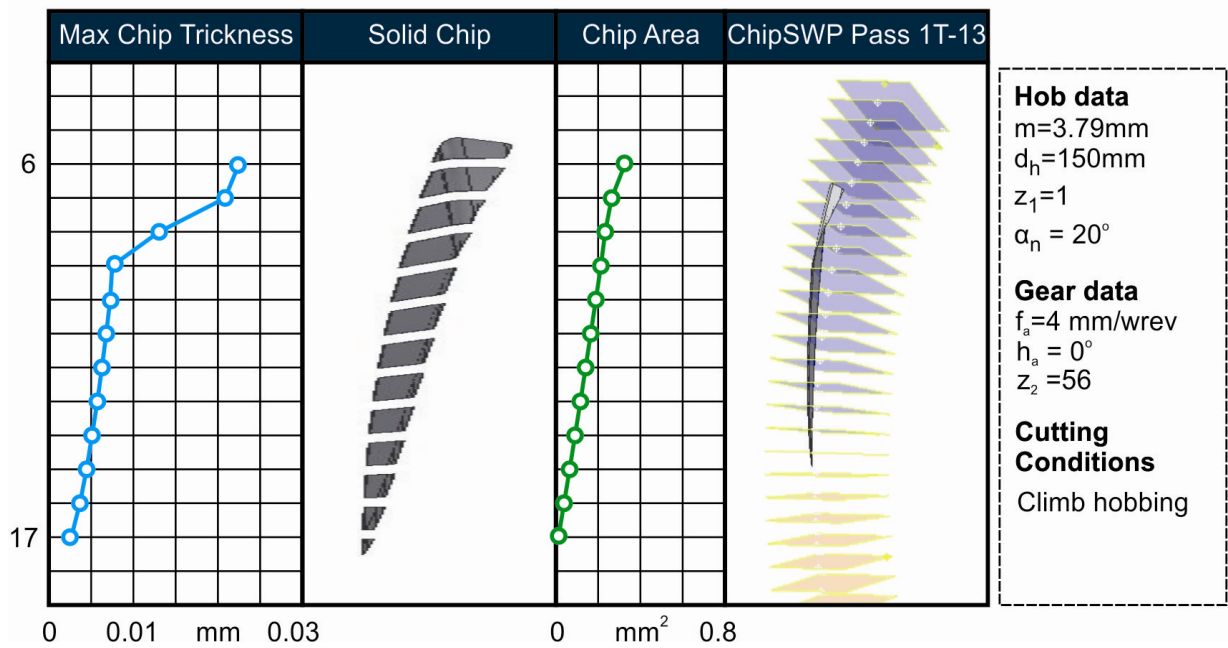
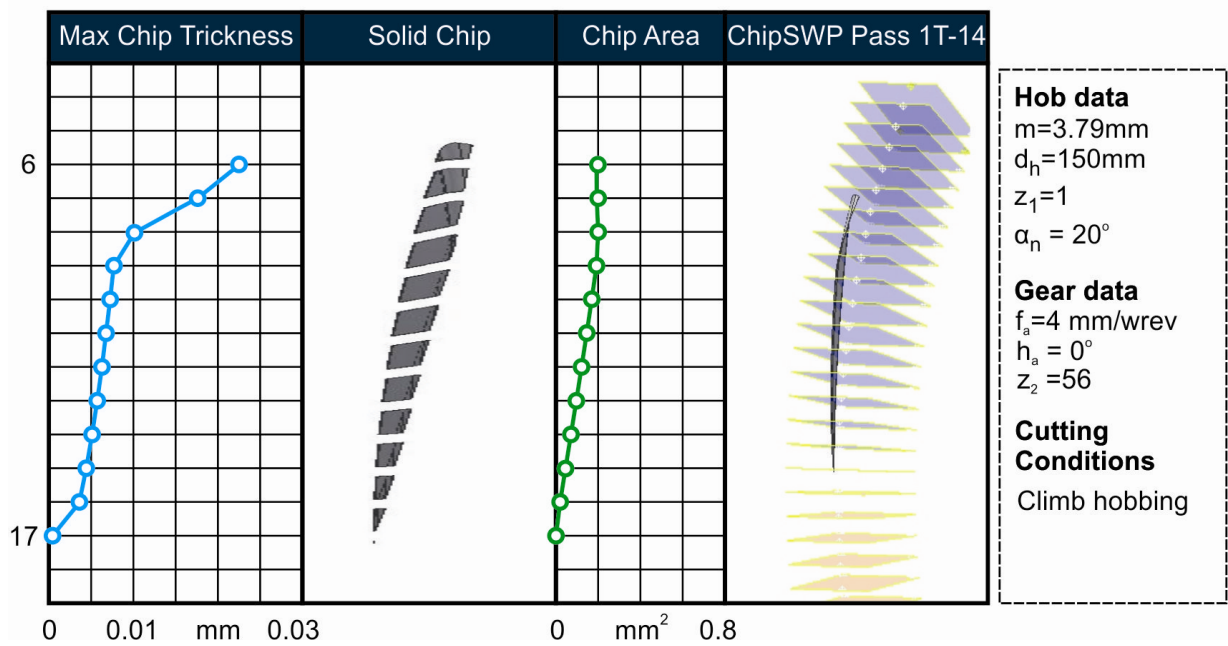
- Μέγιστο πάχος κοπής (Max Chip Thickness)
- Διαιρεμένο σε επίπεδα απόβλιπτο (Solid Chip)
- Εμβαδό επιφάνειας σε κάθε επίπεδο (Chip Area)
- Θέση κύλισης (Chip SWP 1T)

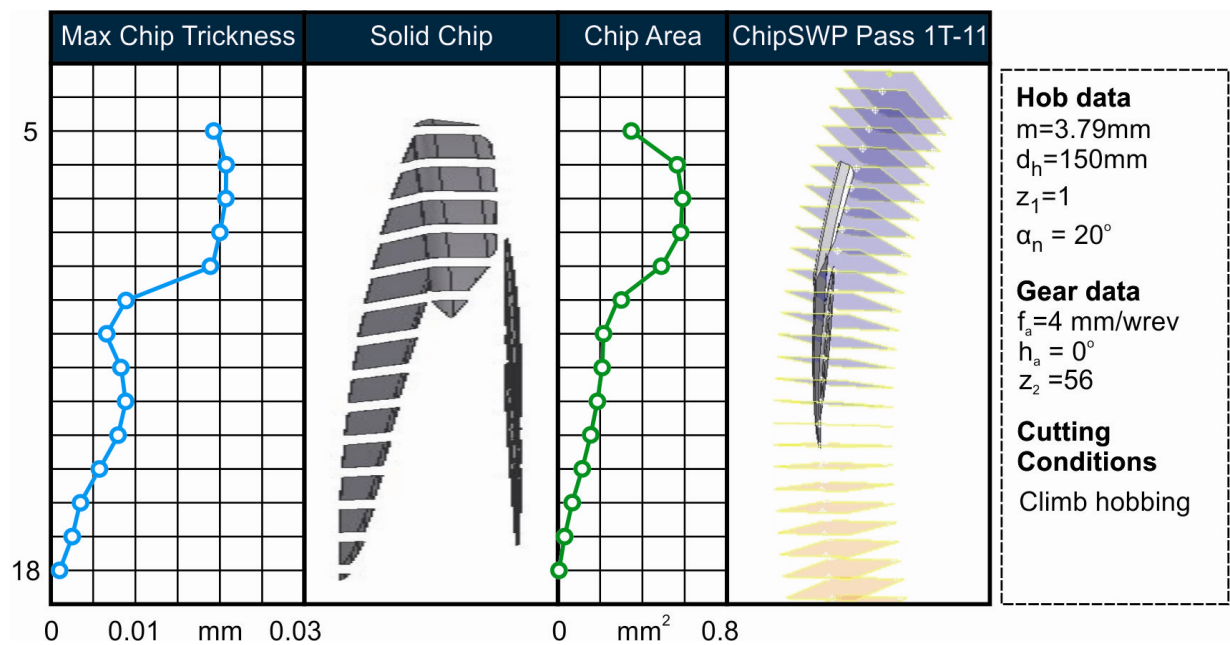
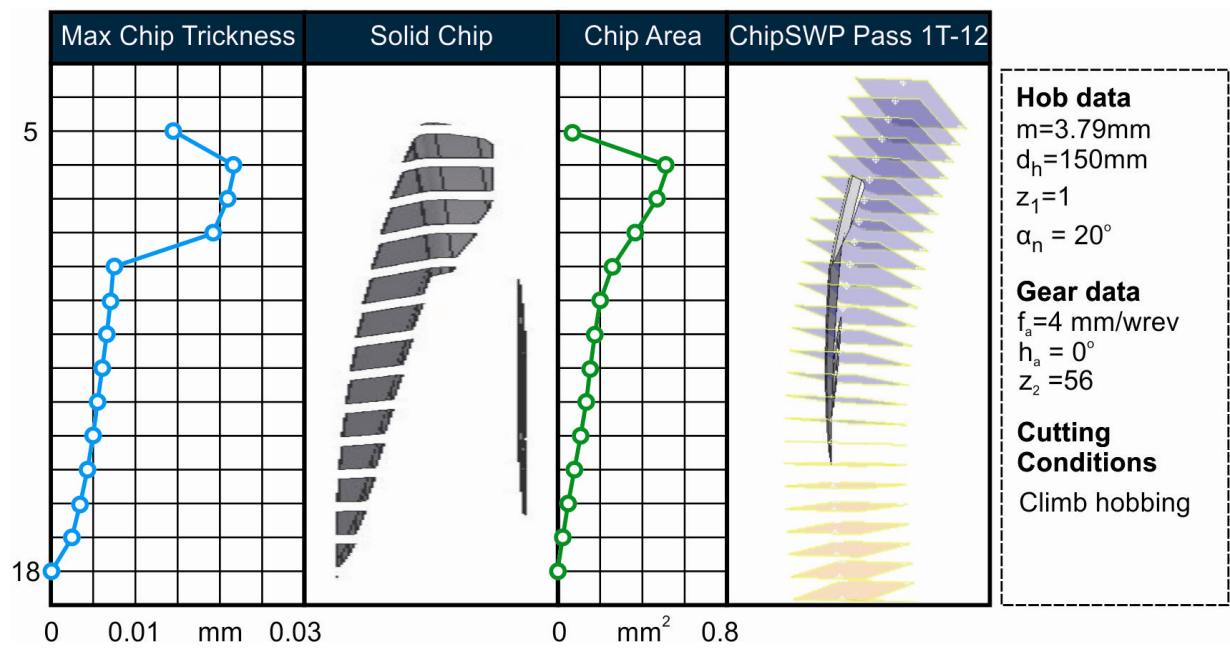
Η αξιολόγηση πραγματοποιείται σε δεκατέσσερις θέσεις περιστροφής για δεκαοχτώ θέσεις κύλισης του κοπτικού (-19 έως 11) όπως φαίνεται και στη συνέχεια στην παρουσίαση αποτελεσμάτων.

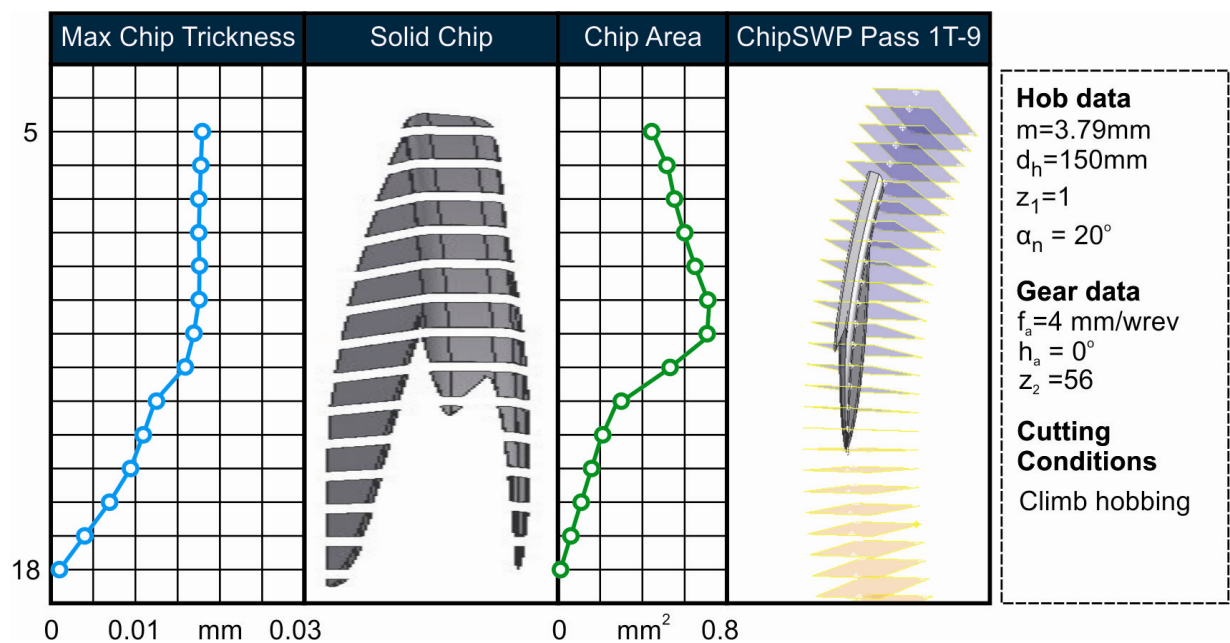
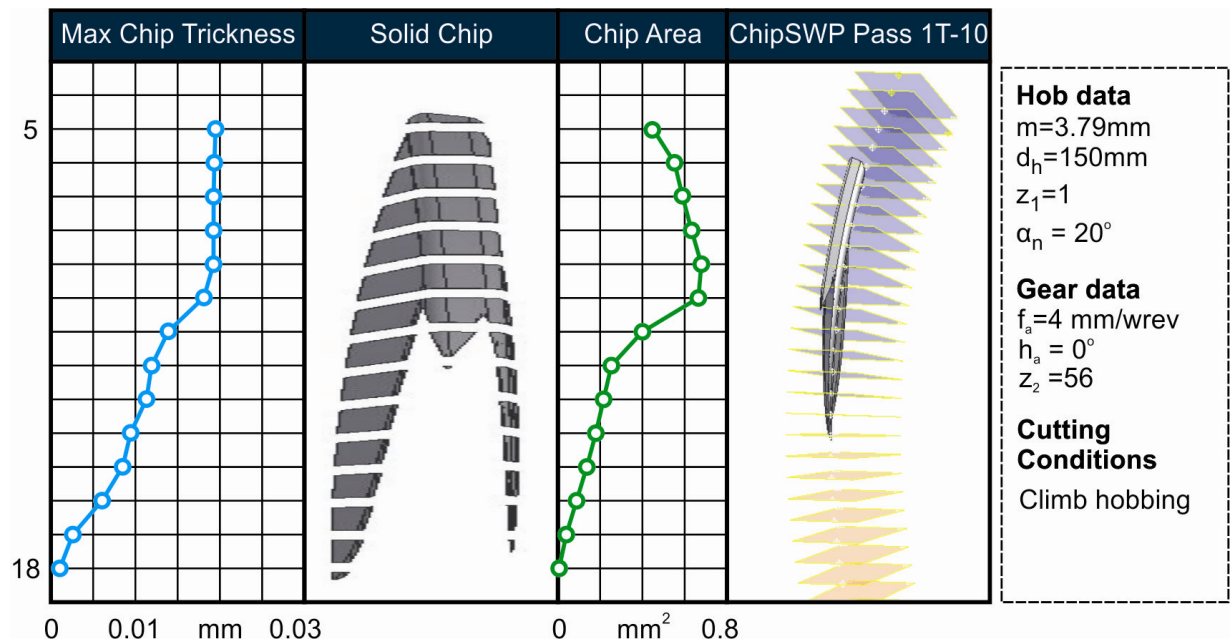


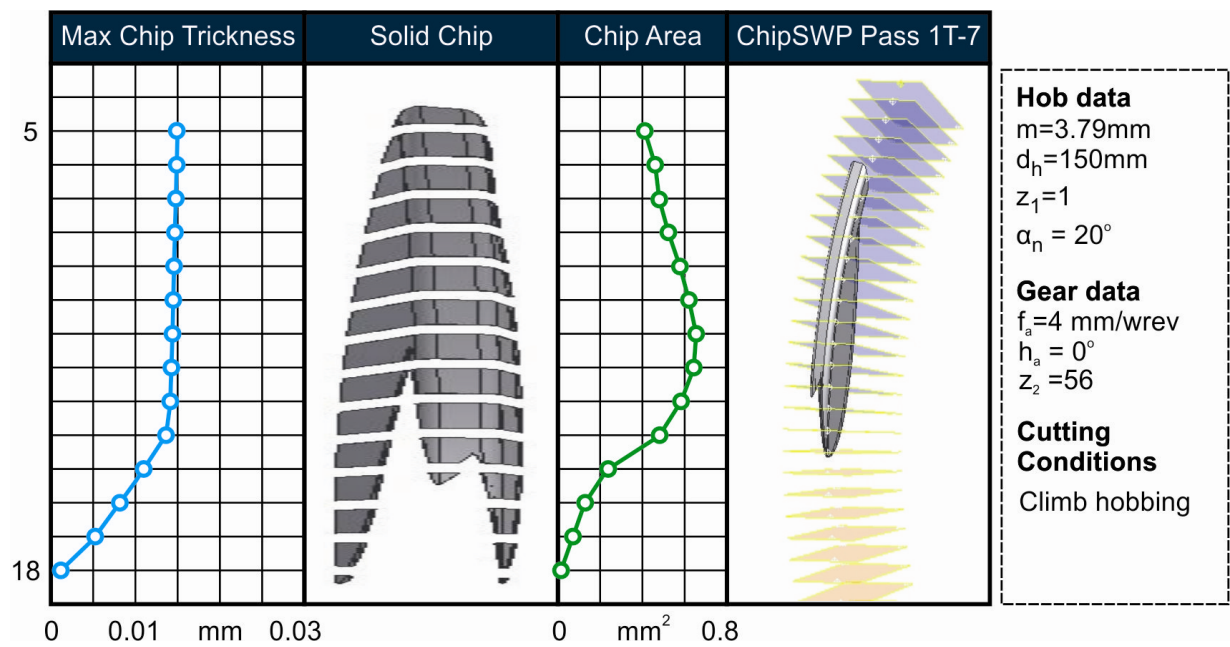
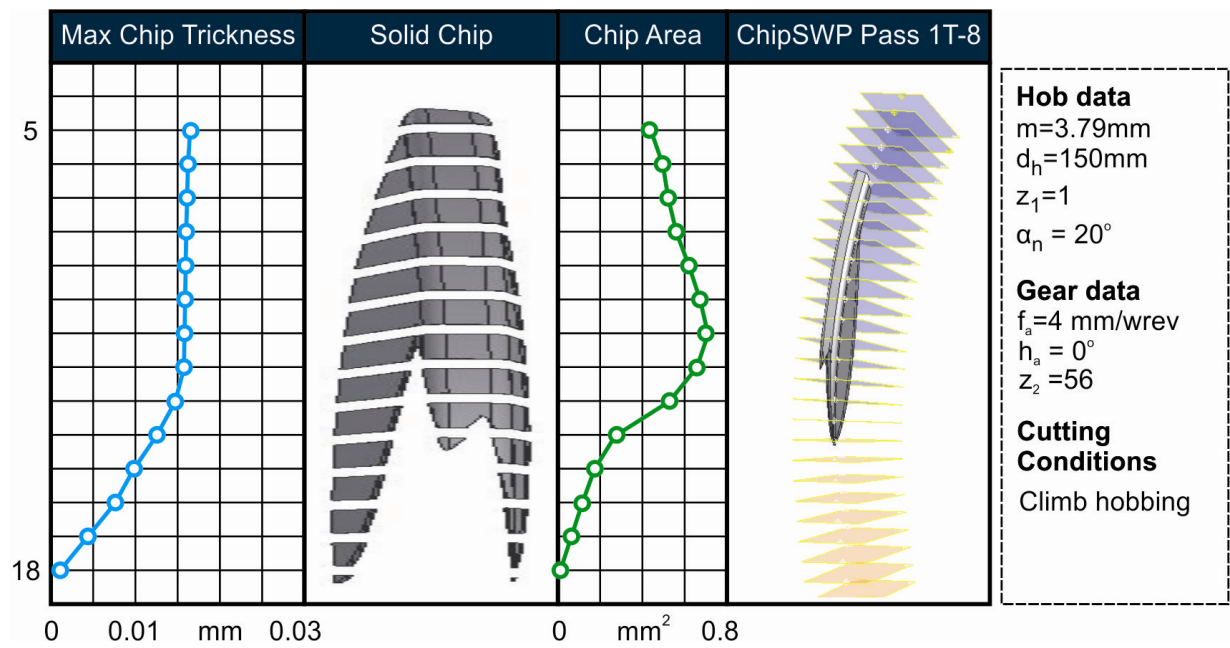


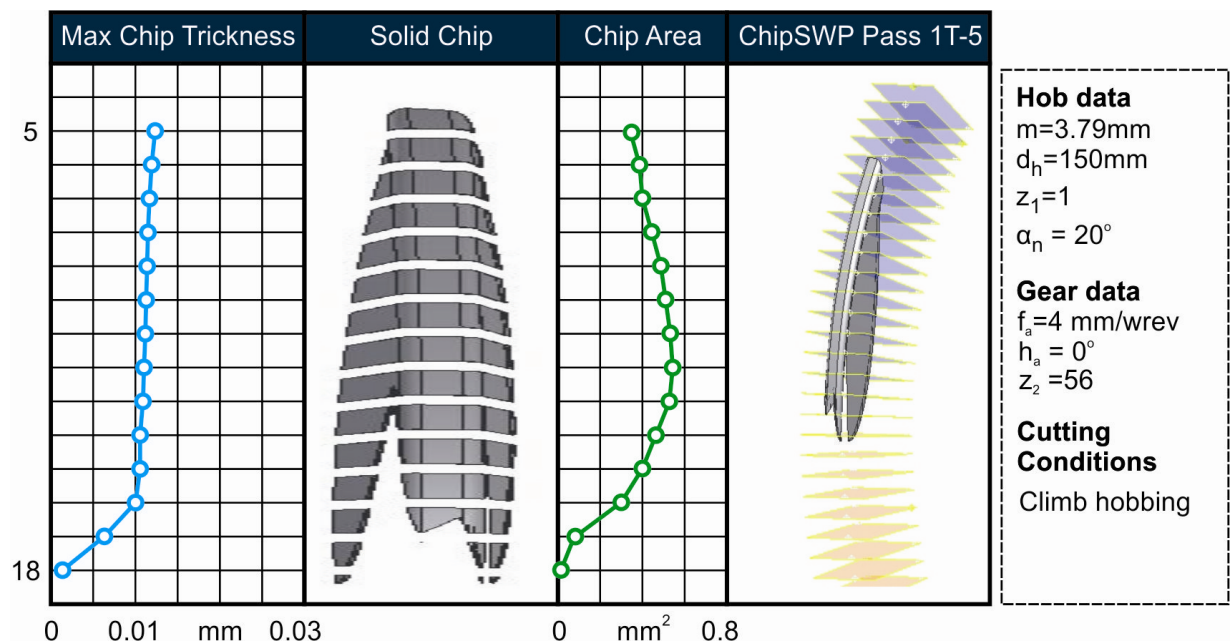
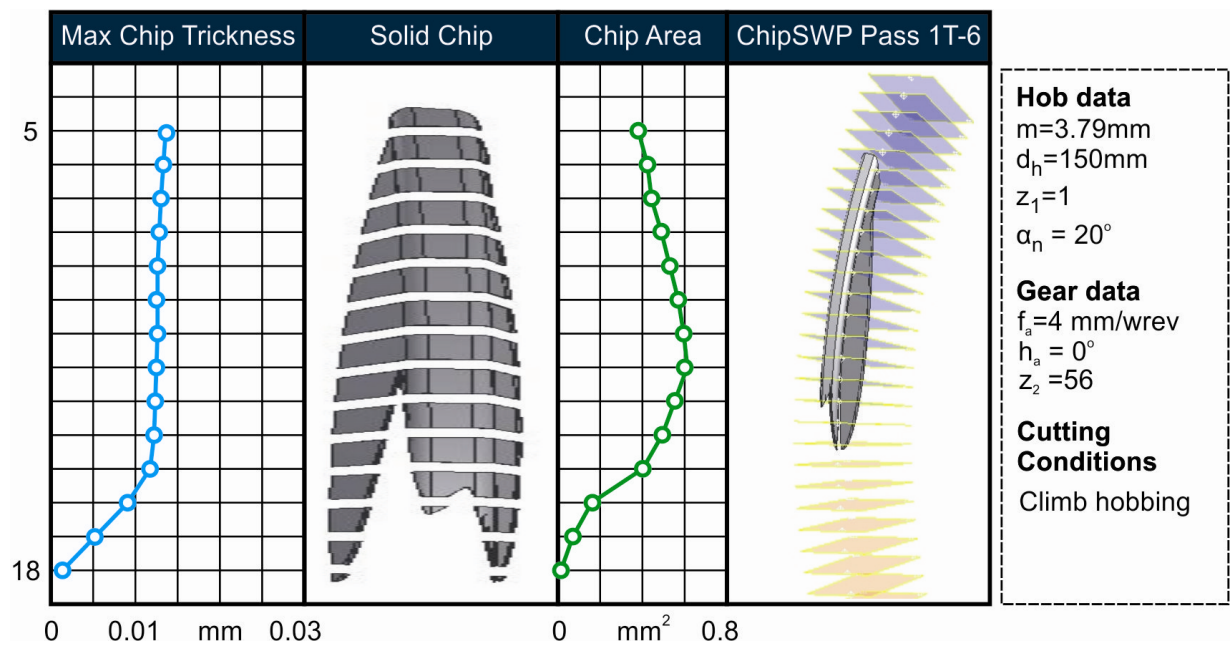


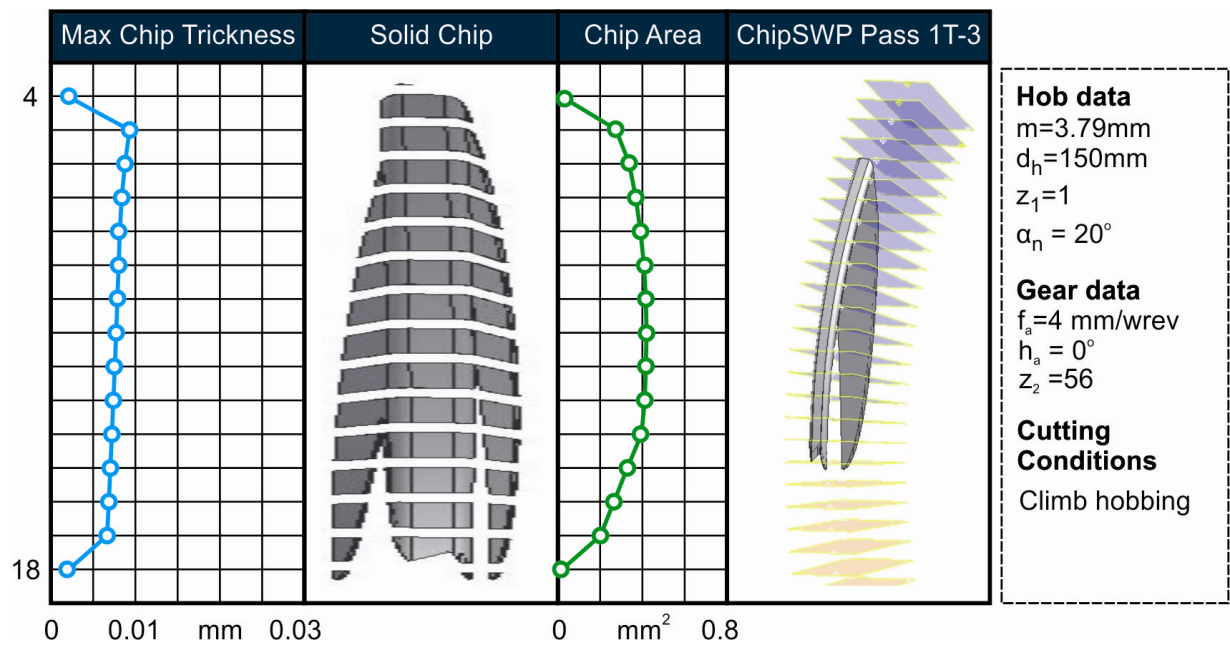
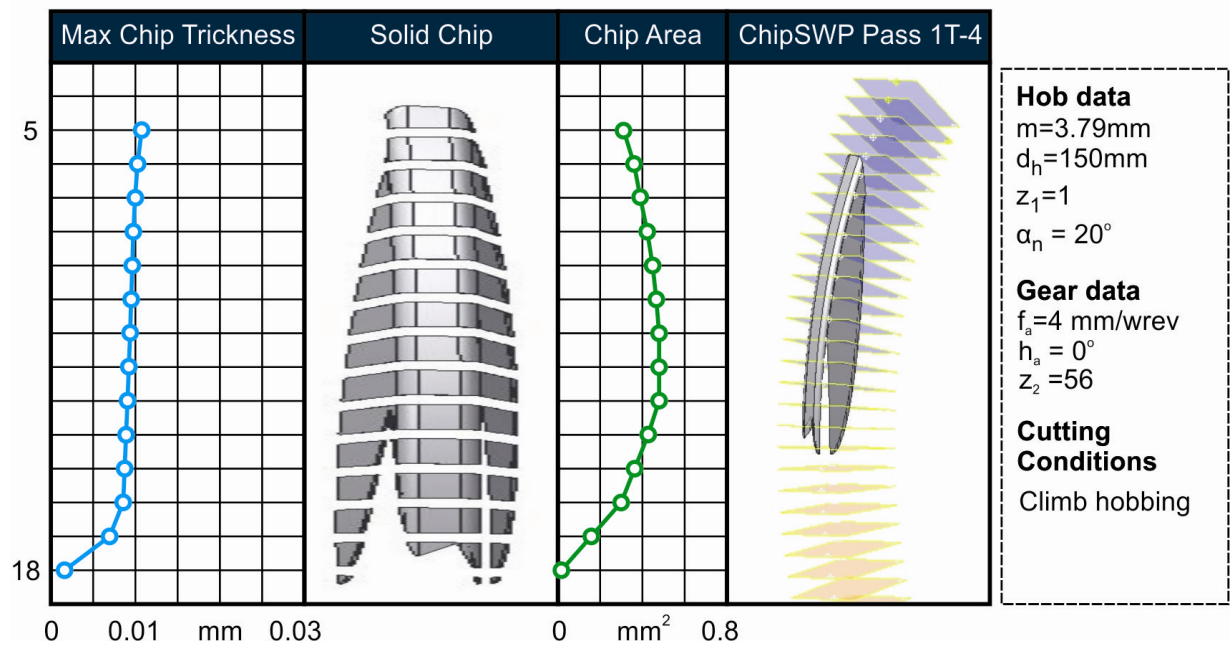


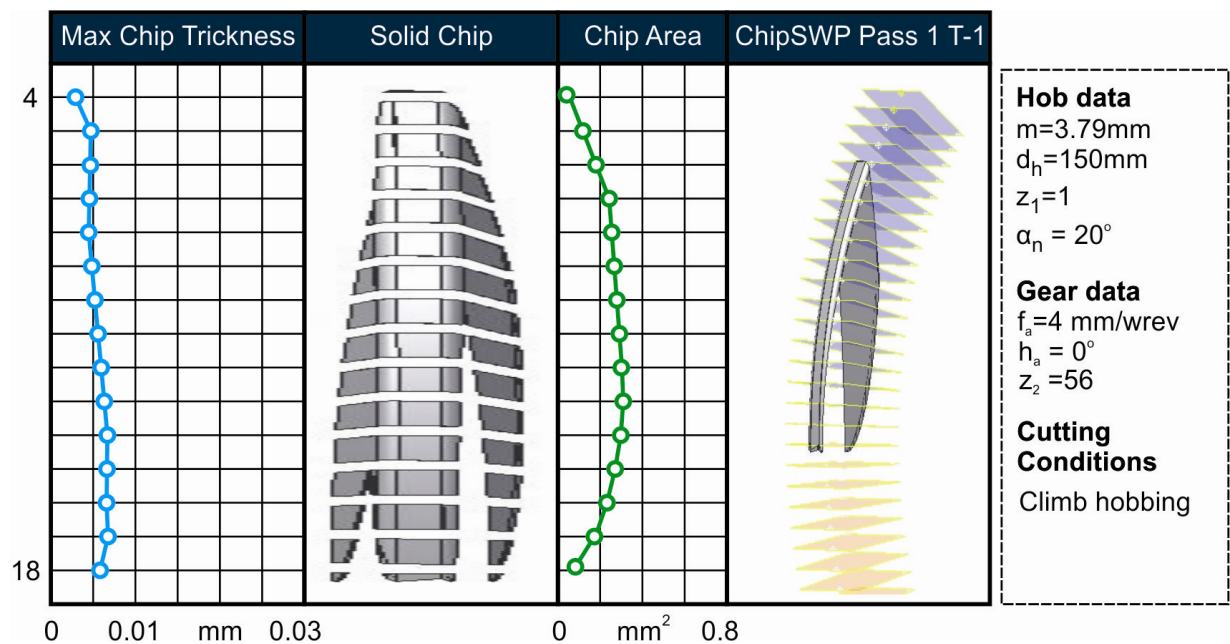
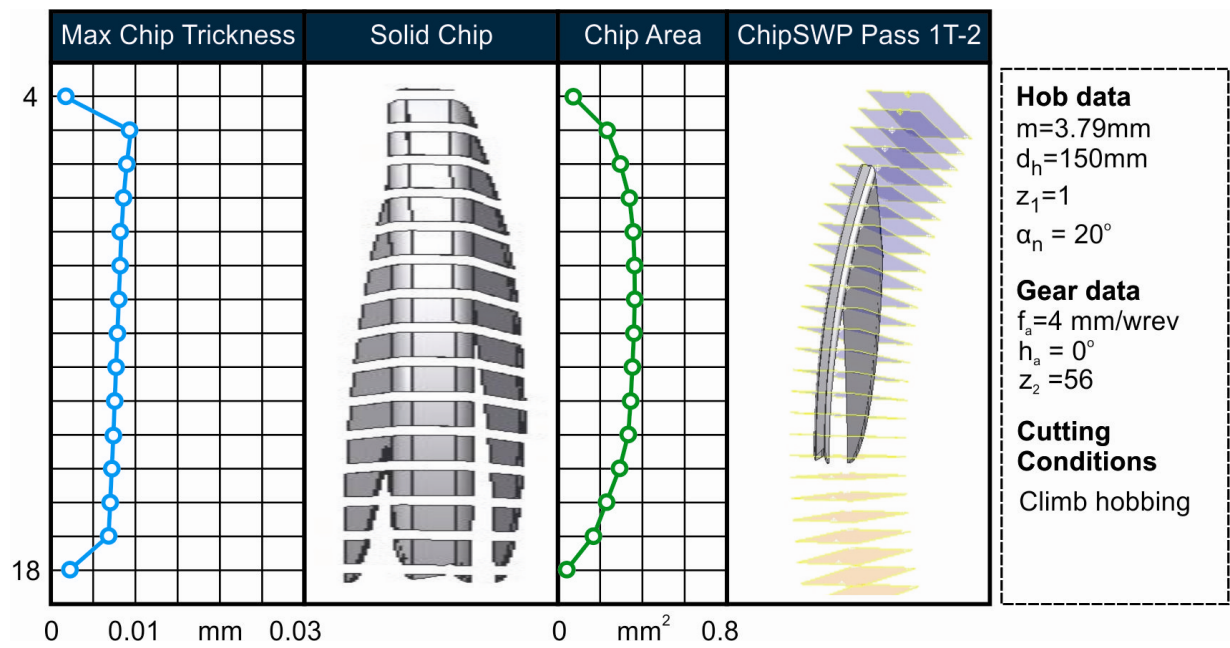


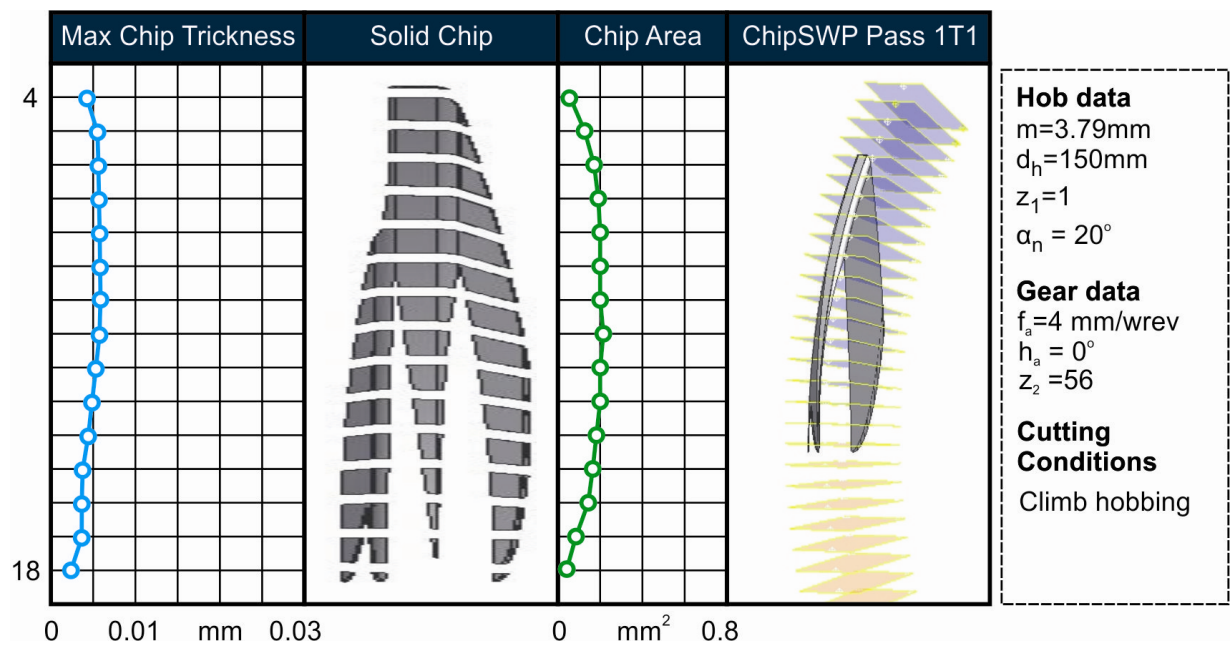
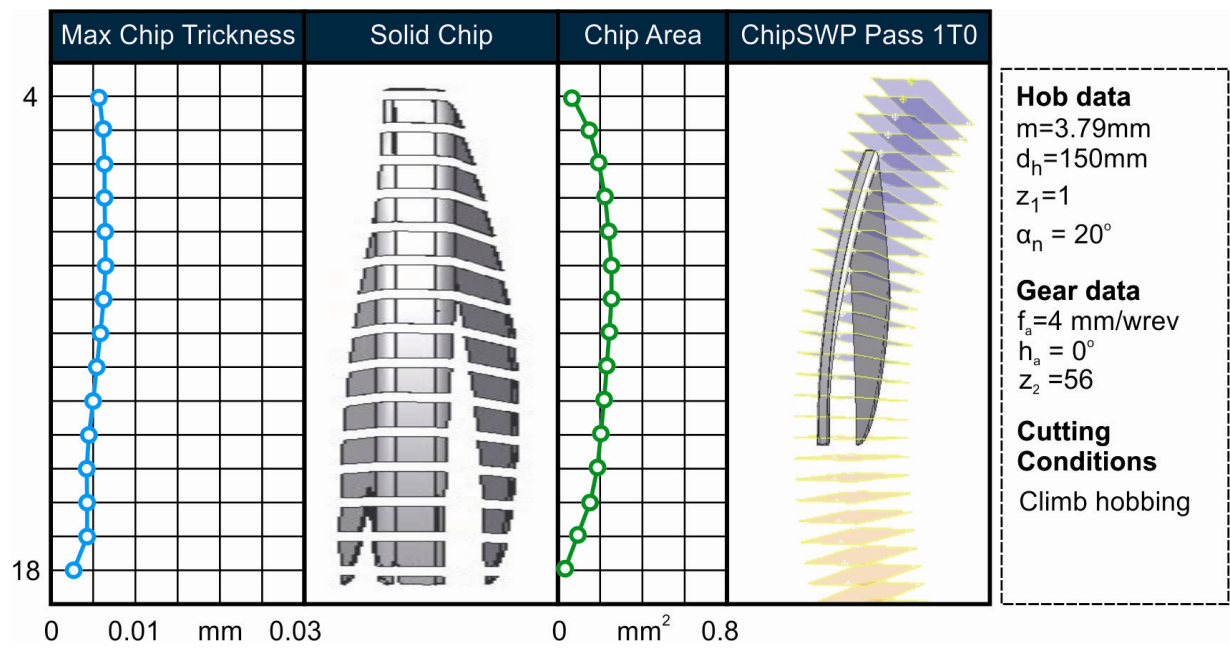


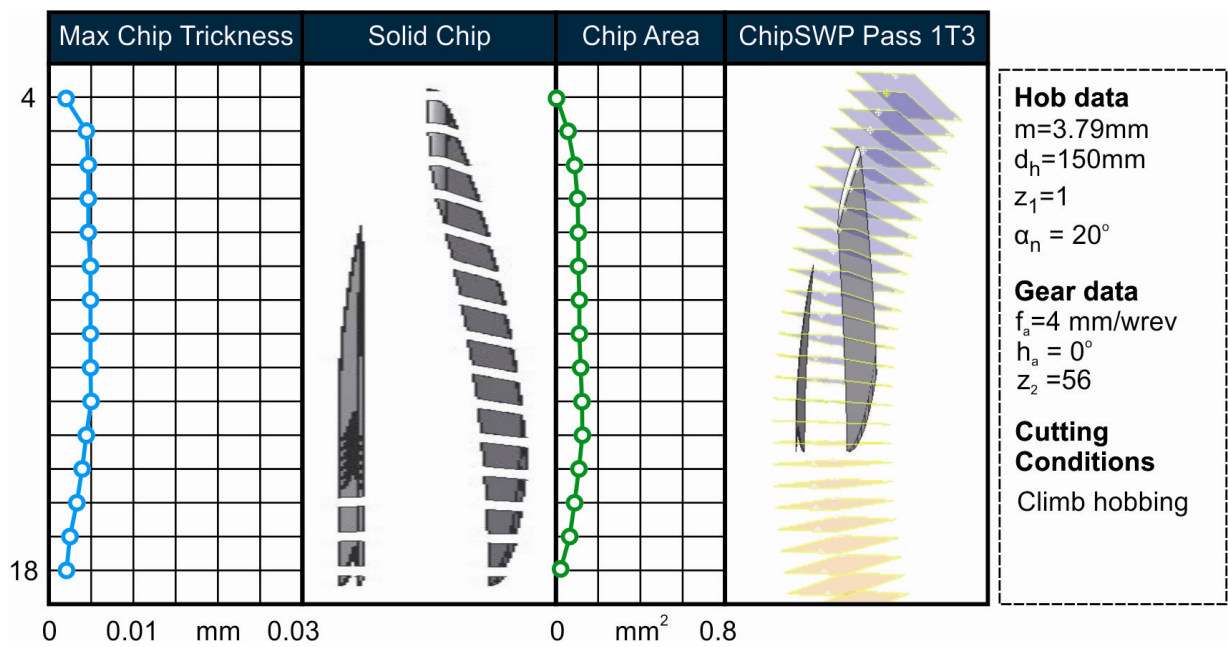
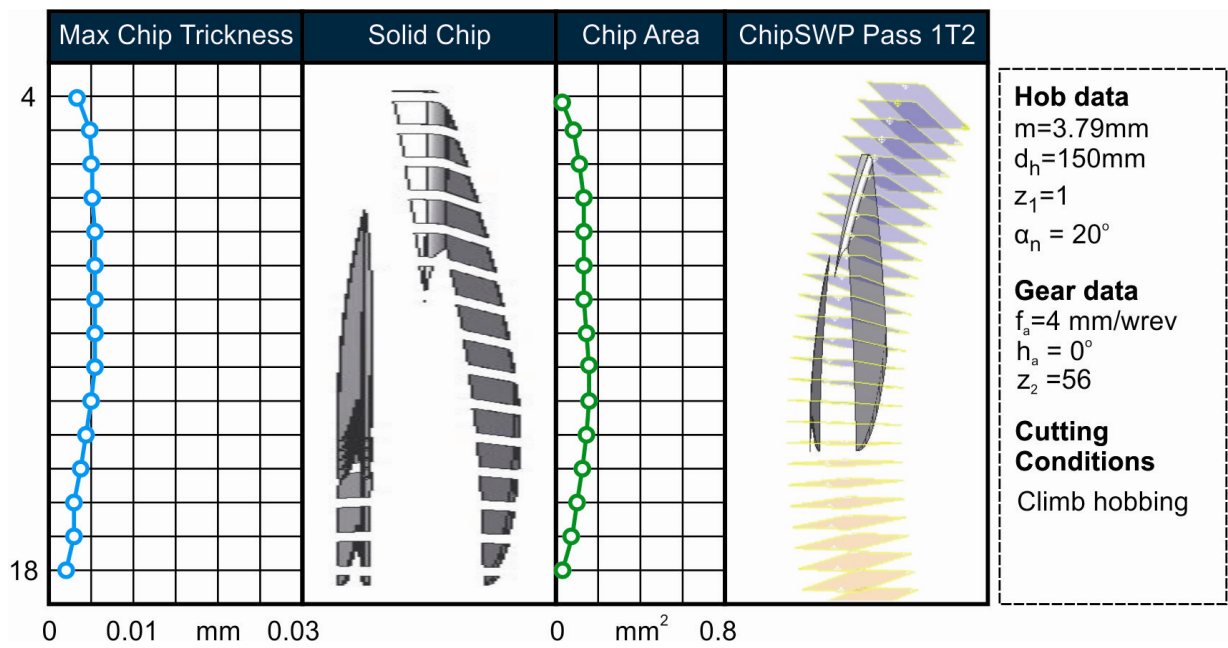


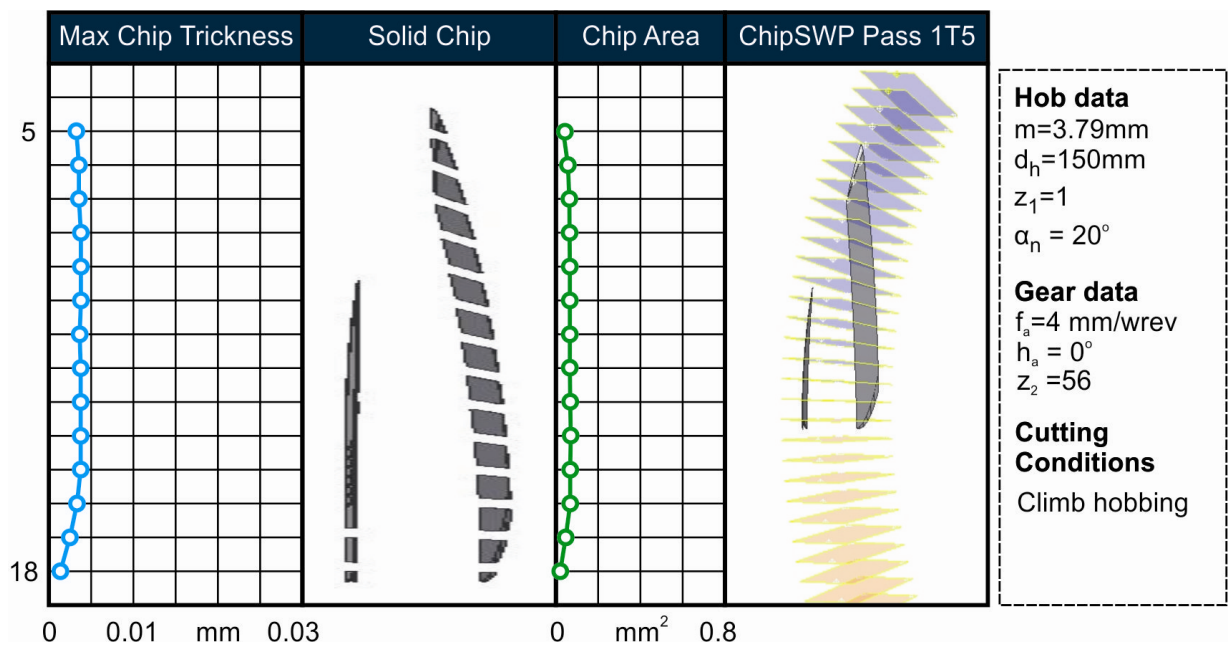
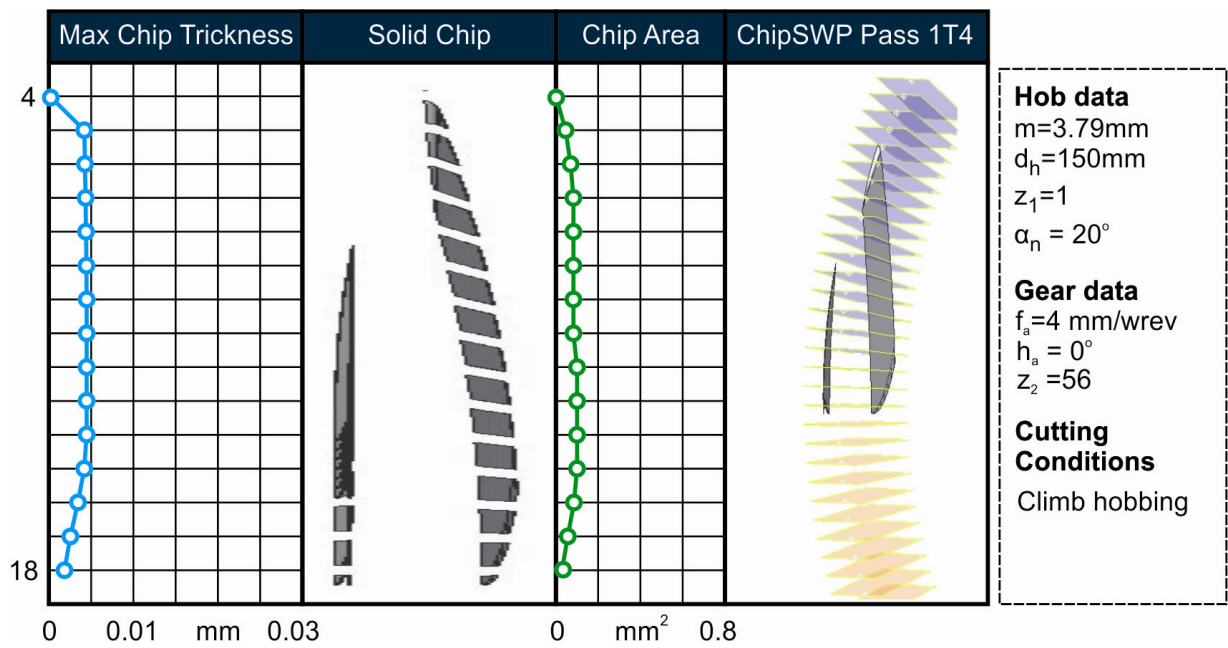


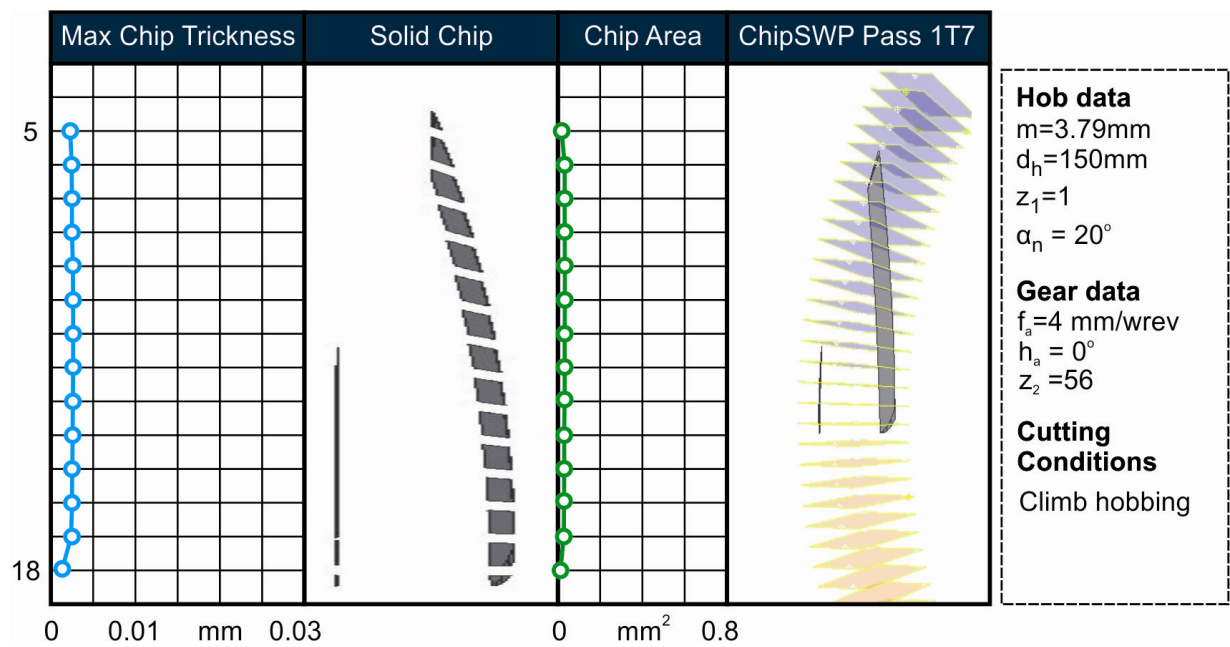
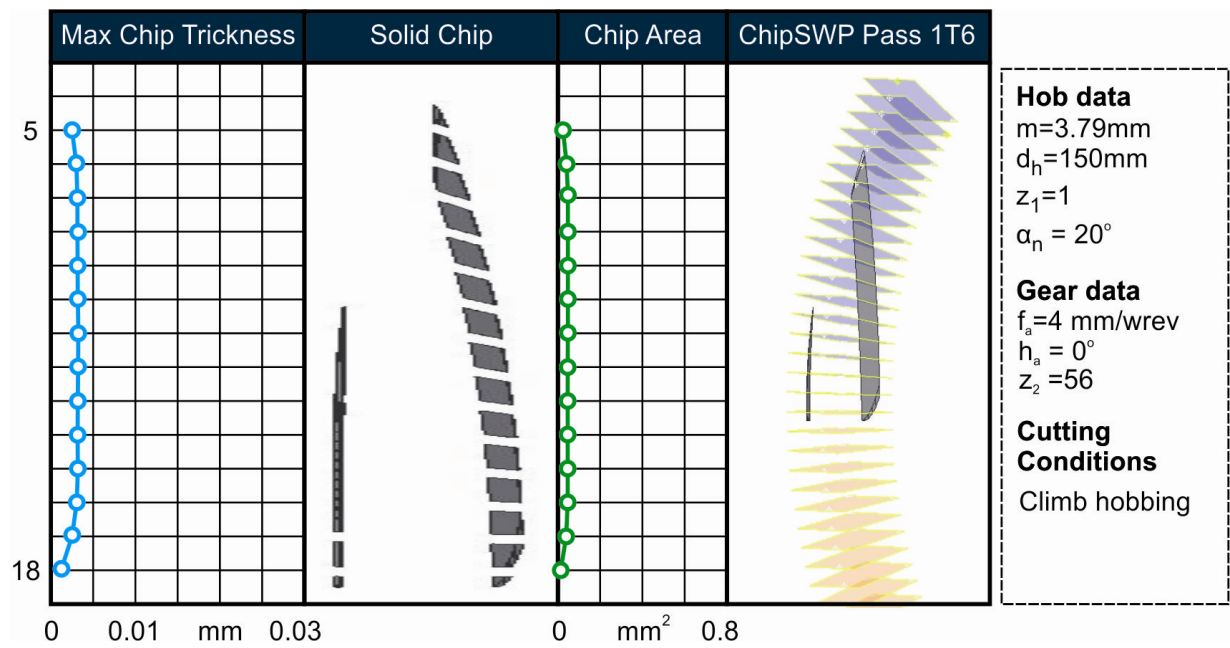


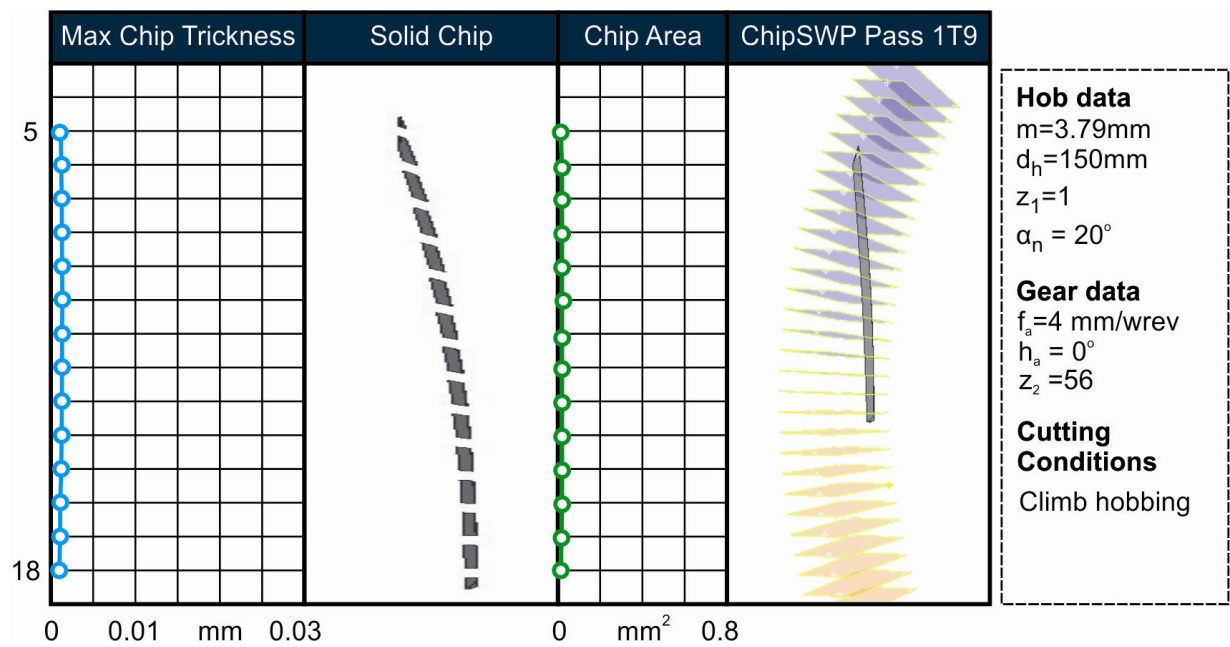
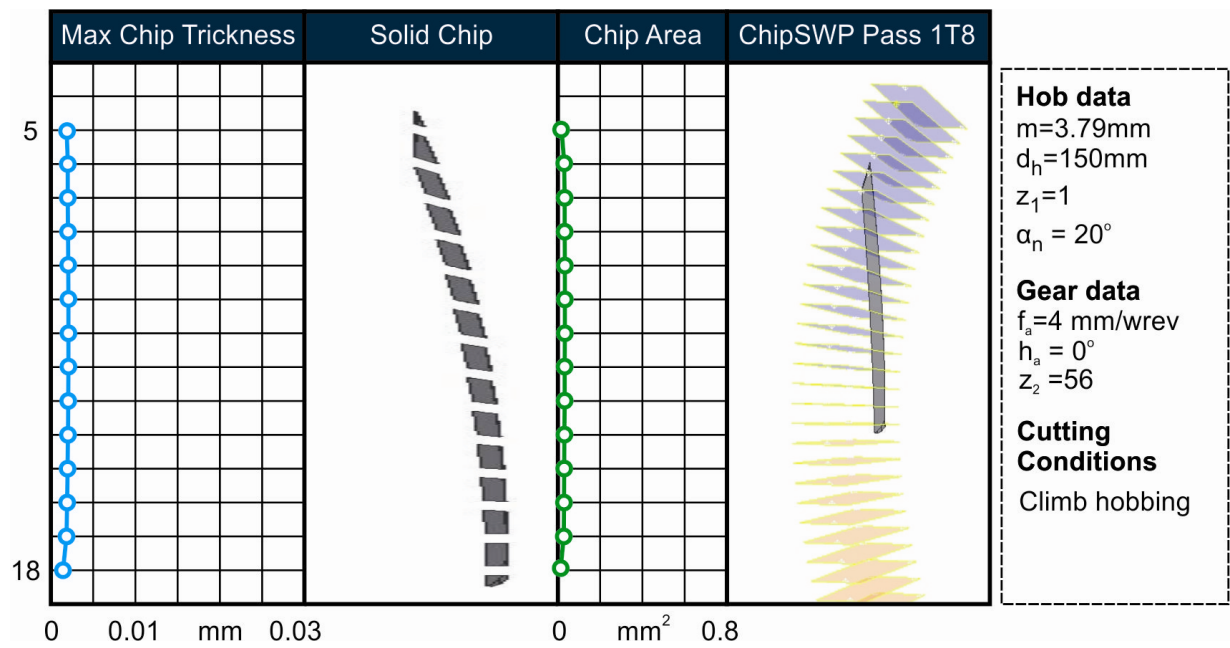


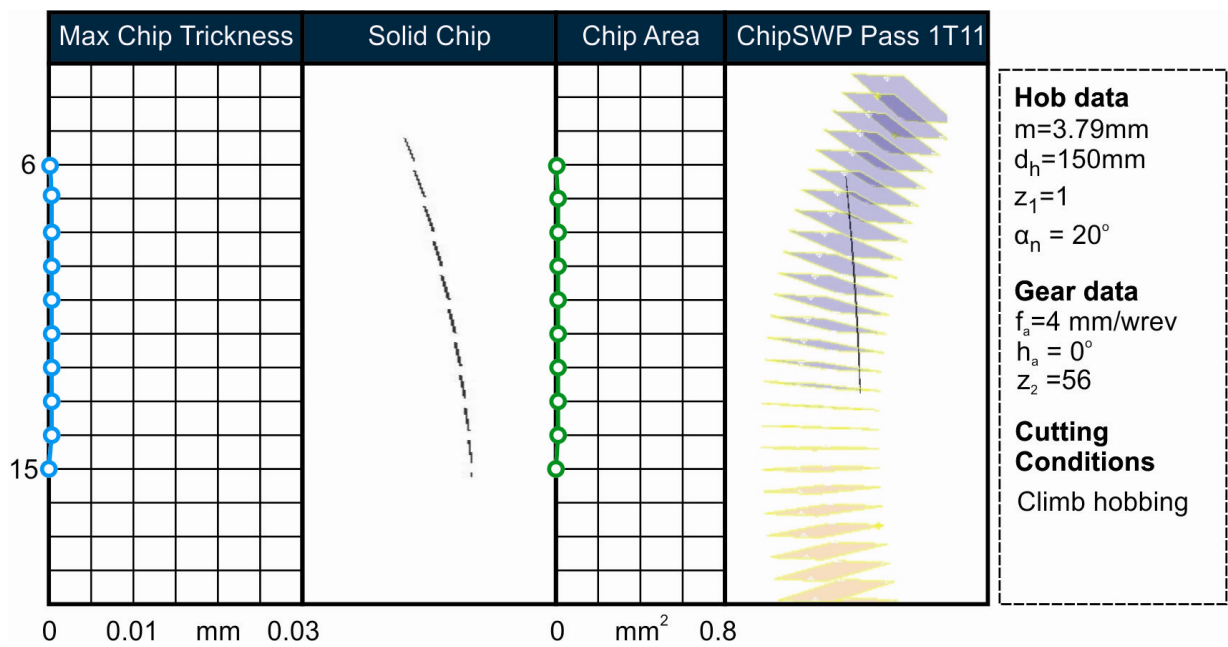
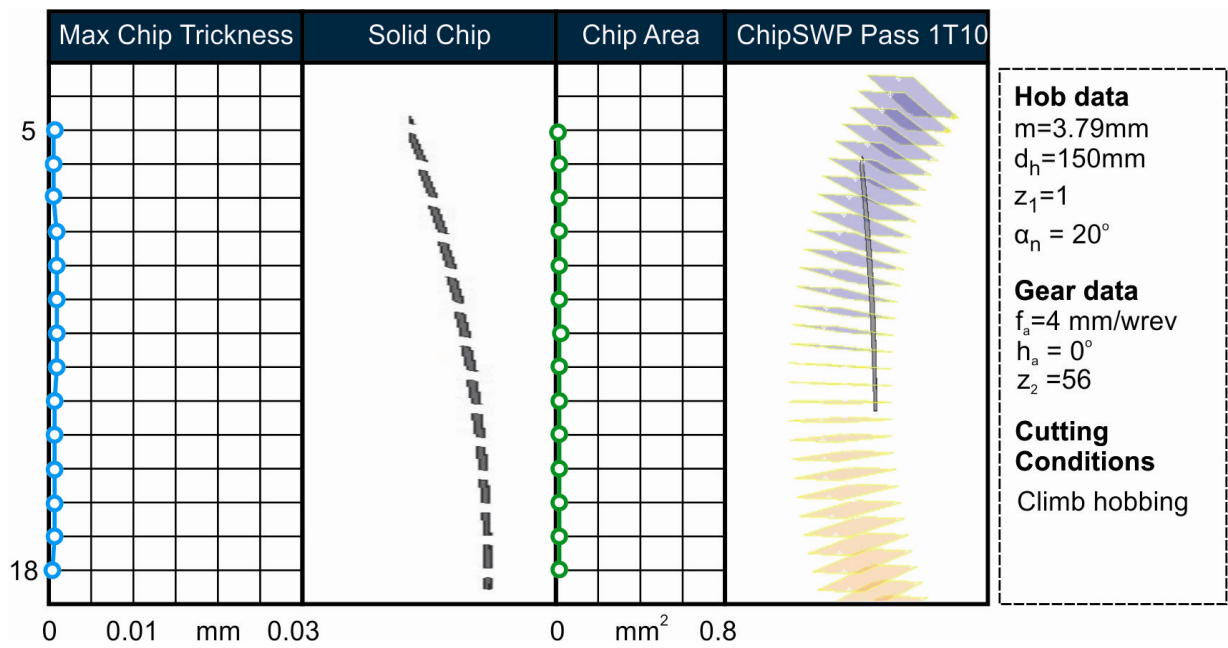






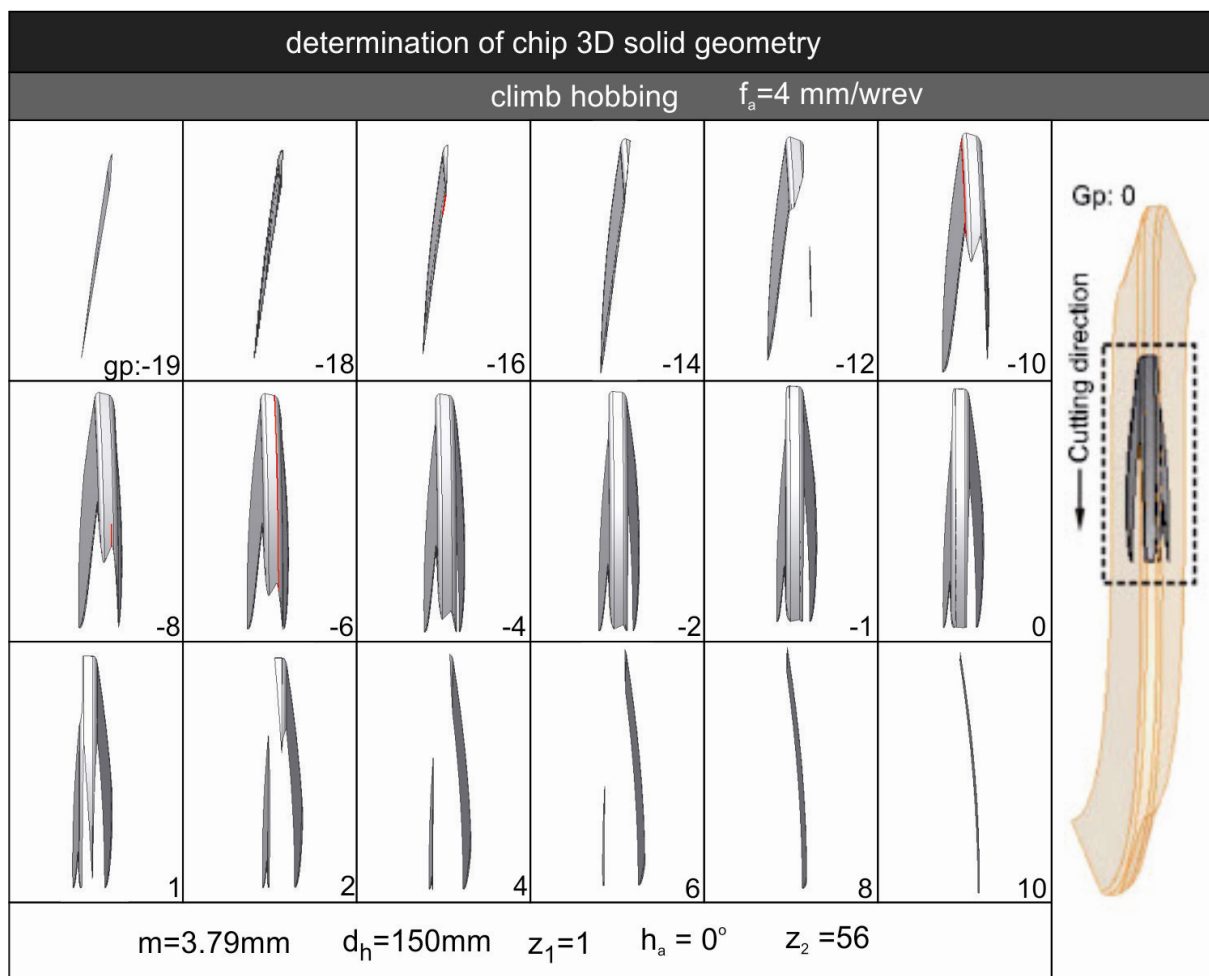






6. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κάτα την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε, είναι φανερό το πόσο μεγάλη είναι η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αποβλίτου για κάθε θέση κύλισης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1 παρακατω.



Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη γεωμετρίας αποβλίτου

Ο ακριβής υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατά την διαδικασία κοπής οδοντωτών τροχών, είναι απαραίτητος για την αξιολόγηση των κατεργασιών δημιουργίας οδοντώσεων και συνεπώς για την βελτίωση των συνθηκών κοπής, της ποιότητας και την ευνοϊκότερη δημιουργία αποβλίτου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια υπολογιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό του βάθους κοπής καθώς και της επιφάνειας αποβλίτων κατά την κατεργασία κατασκευής οδοντωτών τροχών σε φραιζα με κύλιση οδοντώσεων, κάνοντας χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic μέσα από περιβάλλον προγραμματισμού API (Application Programming Interface) του συστήματος CAD Autodesk Inventor 9. Δημιουργήθηκε λοιπόν μια φόρμα επιλογών ώστε να διευκολύνει τον χρήστη στην εισαγωγή δεδομένων, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και να περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό οι ενέργειες που απαιτούνται μέσα από το γραφικό περιβάλλον του Autodesk Inventor. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε κάνει χρήση σε στερεά μοντέλα που προκύπτουν από λογισμικό προσομοίωσης.

Η αξιολόγηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών εκτελείται με τον προσδιορισμό αρχικά του εμβαδού των επιφανειών, με την δημιουργία τομών καθέτων στο απόβλιπτο και με την εύρεση μεγίστου και ελαχίστου βάθους κοπής σε κάθε θέση περιστροφής του αποβλίπτου. Τα αρχεία εξόδου περιλαμβάνουν τις πληροφορίες των παραμέτρων αυτών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία σε προγράμματα όπως EXCEL, GRAPHER κ.τ.λ.

Το λογισμικό που κατασκευάστηκε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε οδοντωτούς τροχούς για διαφορετικές γωνίες ελίκωσης.

Εξετάζοντας σε βάθος τις πιθανές ανάγκες του χρήστη του λογισμικού, σχετικά με τις δυνατότητες που αυτό παρέχει, εντοπίστηκαν κάποιες εγγενείς αδυναμίες οι οποίες οφείλονται στην μη επαρκή συνεργασία των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Συνεπώς, ίσως σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη μια ελαφριά αναπροσαρμογή σε ορισμένα κομμάτια του κώδικα, περισσότερο για λόγους ευχρηστίας και ακρίβειας. Αυτές, χωρίς να είναι πρωτίστης σημασίας αφήνουν σημαντικό χώρο για βελτιώσεις αλλά και αναβαθμίσεις στο πρόγραμμα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Micromachining and Manufacturing Modeling Lab (www.m3.tuc.gr)
- V. Dimitriou, A. Antoniadis, N. Vidakis, "Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means off Three-Dimensional Kinematics Modeling"
- V. Dimitriou, A. Antoniadis. "Cad Based Simulation of the Hobbing Process for the Manufacturing of Spur and Helical Gears"
- V. Dimitriou, A. Antoniadis, "Advanced 3-Dimentional CAD Modeling of the Gear Hobbing Process"
- Εγχειρίδιο γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic 4
- Εγχειρίδιο του προγράμματος CAD Autodesk Inventor
- Εγχειρίδιο του προγράμματος CorelDraw X5