



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΘΟΡΑΣ ΣΕ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ
ΜΕ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ**



ΜΠΕΛΗΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Η διατριβή του **Μπελή Ταξιάρχη**, εγκρίνεται:

Αντωνιάδης Αριστομένης
Αναπληρωτής Καθηγητής,
Επιβλέπων

Σταυρουλάκης Γεώργιος
Καθηγητής

Μπιλάλης Νικόλαος
Καθηγητής

Με το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη καθώς και τον φίλο μου Νίκο Ταπόγλου για την προθυμία, την υπομονή και την αμέριστη συμβολή τους κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ	8
2.1 Βασικές έννοιες	8
2.2 Υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών	8
2.3 Κατεργασίες κοπής οδοντώσεων με γένεση	9
2.4 Γενικά για το φραιζάρισμα οδοντώσεων με κύλιση	10
2.5 Κινηματική ανάλυση της κατεργασίας	11
2.5.1 Παραλλαγές του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων	12
2.6 Στάθμη των γνώσεων.....	13
2.7 Προσδιορισμός διατομών απαραμόρφωτου αποβλίπτου κατά τη διείσδυση του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο κομμάτι	13
2.8 Ανάλυση παραγόντων επίδρασης στη φθορά του εργαλείου.....	14
2.9 Απόβλιττα στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων	15
2.9.1 Μήκος και ισοδύναμο πάχος αποβλίπτου.....	15
2.9.2 Ομάδες αποβλίπτων	16
2.10 Προσδιορισμός πλάτους ζώνης φθοράς	17
2.10.1 Υπολογισμός της φθοράς σε διαφορετικές θέσεις κύλισης λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος της οδόντωσης	18
2.10.2 Υπολογισμός του πλάτους ζώνης φθοράς λαμβάνοντας υπόψη τις εφαπτομενικές μετατοπίσεις	20
2.11 Αναλυτική διαδικασία περιγραφής της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς για κάθε θέση κύλισης.....	21
2.11.1 Μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης του αριθμού κοπών από το μήκος και το πάχος του αποβλίπτου.....	22
2.11.2 Μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής 25	
2.11.3 Μαθηματική περιγραφή της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς σε συνάρτηση με τον αριθμό κοπών.....	28
2.11.4 Εξισώσεις περιγραφής της εξέλιξης της φθοράς για κάθε θέση κύλισης.....	30
2.12 Βελτιστοποίηση των συνθηκών εφαπτομενικής μετατόπισης	33
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΙΠΤΩΝ	35
3.2 Υπολογισμός ισοδύναμου μήκους του στερεού απόβλιπτου	35
3.3 Υπολογισμός ισοδύναμου πάχους του στερεού απόβλιπτου.....	36
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ GFW	38
4.2 Το περιβάλλον GUIDE της MATLAB.....	39

4.3	Σχεδιασμός του γραφικού περιβάλλοντος κατά ISO 13407	40
4.4	Προγραμματισμός του γραφικού περιβάλλοντος.....	43
5.	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ	44
5.2	Παράδειγμα βελτιστοποίησης μέσω εφαπτομενικής μετατόπισης	54
6.	ΣΥΝΟΨΗ	55
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	56

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα και απαραίτητα στοιχεία μηχανών, λόγω της ικανότητάς τους να συνθέτουν ευέλικτες, ακριβείς, και αξιόπιστες μεταδόσεις περιστροφικής κίνησης. Με όγκο πωλήσεων που ξεπερνά τα 50 Δις €, είναι προφανές ότι η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής οδοντώσεων δημιουργεί έντονο και πολύπλευρο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, είναι η πλέον αποδοτική μέθοδος παραγωγής οδοντωτών τροχών. Κατά την κατεργασία αυτή, τα δόντια της κοπτικής φραιζας φθείρονται ανομοιόμορφα γιατί το καθένα από αυτά δεισδύει με διαφορετικό τρόπο μέσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Η δημιουργούμενη φθορά, η οποία παρατηρείται κατά κύριο λόγο στην ελεύθερη επιφάνεια των δοντιών, επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί έχουν σχέση με το κοπτικό εργαλείο, τη γεωμετρία του αποβλίπτου, τον κατεργαζόμενο τροχό και το είδος της κατεργασίας. Λόγω της πολλαπλότητας που υπάρχει στο μήκος, το πάχος και την ομάδα του σχηματιζόμενου αποβλίπτου, η κατανομή της φθοράς είναι πολύ διαφορετική στα μεμονωμένα κοπτικά δόντια. Για να εξισορροπηθεί η ανομοιομορφία της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας στα κοπτικά δόντια, γίνεται εφαπτομενική μετατόπιση της φραιζας κατά μία συγκεκριμένη απόσταση και ανά συγκεκριμένο αριθμό κοπών. Έτσι η φθορά κάθε κοπτικού δοντιού εξαρτάται από το συνδυασμό της εφαπτομενικής μετατόπισης με τον αριθμό κοπών ανά εφαπτομενική μετατόπιση.

Ορισμένα δόντια ξεπερνούν πιο γρήγορα το όριο φθοράς, το οποίο είναι συνήθως μερικά δέκατα του χιλιοστού, με αποτέλεσμα η κοπτική φραιζα να είναι αναγκαίο να επανατροχιστεί, ή αν η φθορά έχει προχωρήσει πάρα πολύ, να αντικατασταθεί. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το κοπτικό εργαλείο μπορεί να καταστεί άχρηστο, ακόμα κι αν τα περισσότερα κοπτικά δόντια του είναι σε πολύ καλή κατάσταση. Δεδομένου του υψηλού κόστους των κοπτικών φραιζών που χρησιμοποιούνται στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, η ανάπτυξη κατάλληλης μεθοδολογίας για την κατά το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των κοπτικών εργαλείων καθίσταται ως καθοριστικής σημασίας.

Η εν λόγω ερευνητική εργασία, αναφέρεται ουσιαστικά στη συνέχιση, εμβάθυνση και τυποποίηση διαδικασιών αριθμητικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαδικασίας κοπής οδοντώσεων με φραιζάρισμα κύλισης. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού, μέσω του οποίου είναι δυνατός ο εκ των προτέρων προσδιορισμός της φθοράς για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κοπής καθώς και των βέλτιστων συνθηκών εφαπτομενικής μετατόπισης, έτσι ώστε η φθορά να κατανέμεται σε όσο το δυνατόν περισσότερα κοπτικά δόντια, με αποτέλεσμα τη βέλτιστη εκμετάλλευση της κοπτικής φραιζας. Τέλος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε:

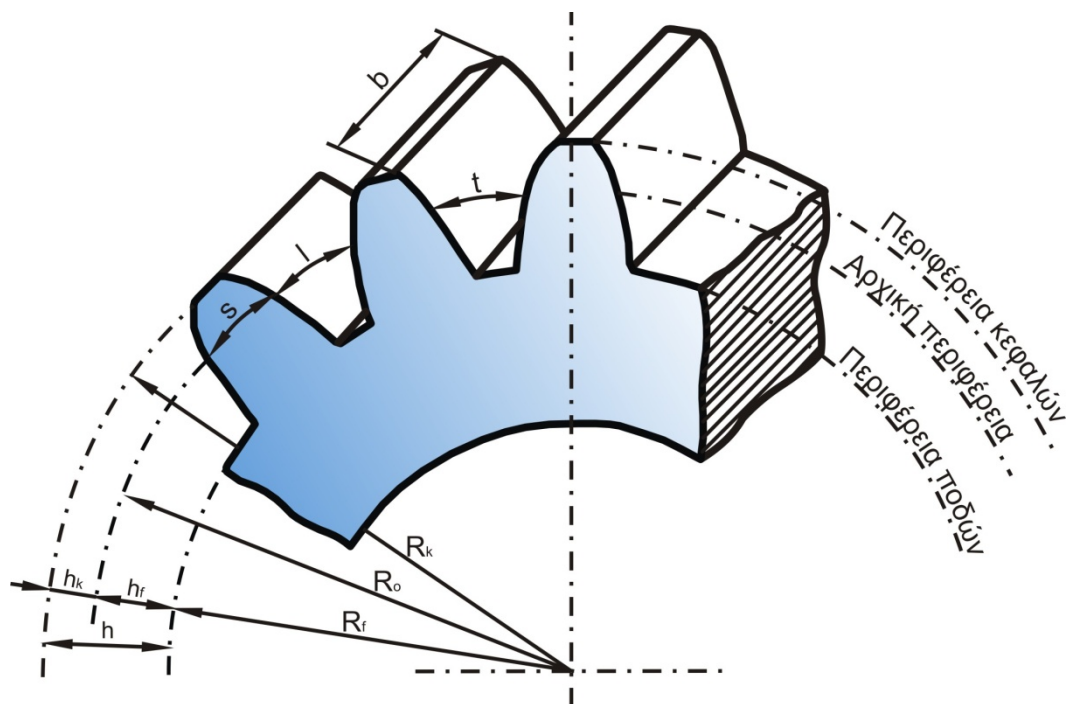
- Υπολογιστικός προσδιορισμός στερεών (3D) αποβλίπτων ως απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό φθοράς.
- Προγραμματισμός μοντέλου φθοράς.
- Επιβεβαίωση του μοντέλου φθοράς με έλεγχο σεναρίων κοπής
- Ανάπτυξη φιλικού προς το χρήστη περιβάλλοντος του λογισμικού υπολογισμού φθοράς εργαλείων
- Επεξεργασία, τυποποίηση και ένταξη των υπολογιστικών ευρημάτων σε ευέλικτη και βιομηχανικά αξιοποιήσιμη σχεσιακή βάση Δεδομένων.

2. ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ

2.1 Βασικές έννοιες

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα στοιχεία μηχανών για μετάδοση της κίνησης. Για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες σχεδιάζονται οι οδοντωτοί τροχοί πρέπει να έχουν εύρωστη κατασκευή, αξιόπιστη και οικονομία λειτουργία, υψηλή απόδοση, και μεγάλη διάρκεια ζωής. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω οι οδοντωτοί τροχοί πρέπει να είναι απαλλαγμένοι από παραμένουσες τάσεις και κόπωση του υλικού. Επίσης πρέπει να είναι κατασκευασμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η αθόρυβη λειτουργία τους, η ικανότητά τους να μεταφέρουν μεγάλα φορτία δυνάμεων και η διατήρηση ενός σταθερού λόγου ταχύτητας.

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω προδιαγραφές, ο τομέας της κατασκευής οδοντώσεων χρειάζεται μεγάλη εξειδίκευση.



Σχήμα 2.1 Γεωμετρικά στοιχεία οδόντωσης

Το Σχήμα 2.1 απεικονίζει γραφικά τα κυριότερα γεωμετρικά στοιχεία των οδοντωτών τροχών. Τα μεγέθη αυτά είναι τυποποιημένα και δίνονται από διάφορους τύπους και πρότυπα.

2.2 Υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών

Η επιλογή του υλικού ενός συγκεκριμένου οδοντωτού τροχού εξαρτάται από τις παρακάτω παραμέτρους:

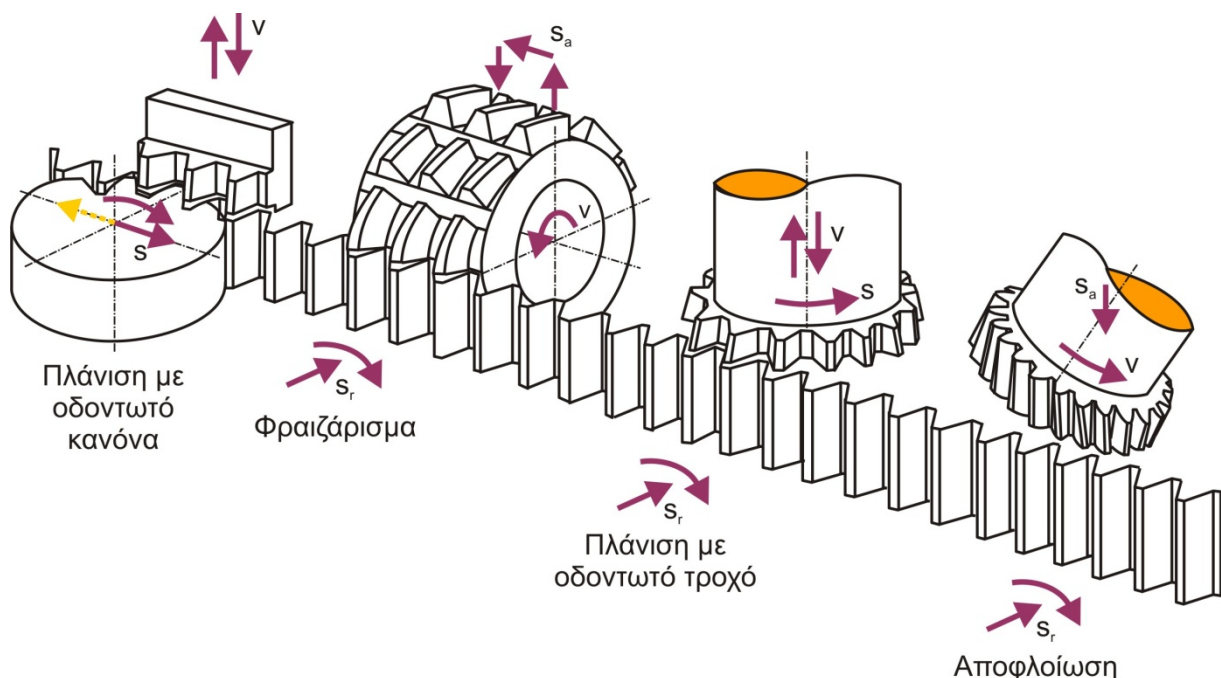
- Τύπος εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθούν
- Περιφερειακή ταχύτητα λειτουργίας
- Βαθμός ακρίβειας που απαιτείται
- Μέθοδος κατεργασίας
- Απαιτούμενες διαστάσεις και βάρος
- Ασκούμενες τάσεις
- Αντοχή σε κρουστικά φορτία
- Αντίσταση στη φθορά

Χαρακτηριστικό παράδειγμα επιλογής υλικού αποτελούν οι οδοντωτοί τροχοί που προορίζονται για επεξεργασία τροφίμων όπου χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα νικελίου λόγω της αυξημένης αντιδιαβρωτικής προστασίας που παρέχουν. Η πλειοψηφία των οδοντωτών τροχών κατασκευάζονται από ανθρακούχους χάλυβες, χάλυβες ενανθρακώσεως και χαλυβοκράματα. Συνήθεις χάλυβες ενανθρακώσεως που χρησιμοποιούνται είναι οι 1018, 1524, 4026, 4118, 4320, 4620, 4820, 8620 και 9310 κατά AISI. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες κατηγορίες υλικών και οι αντίστοιχες χρήσεις τους.

- Χυτοσίδηρος: Πρόκειται για ένα δημοφιλές μηχανουργικό υλικό αφού παρουσιάζει καλή αντίσταση στη φθορά, πολύ καλή κατεργασιμότητα και ευκολία παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων με χύτευση. Ενδείκνυται για εφαρμογές όπου χρειάζονται μεγάλοι οδοντωτοί τροχοί με πολύπλοκα προφίλ.
- Χάλυβας: Ισχυρό μηχανολογικό υλικό με υψηλή αντοχή στη φθορά μετά από λείανση.
- Ανθρακούχοι χάλυβες: Βρίσκουν μεγάλη βιομηχανική εφαρμογή, όπου χρειάζεται ο συνδυασμός υψηλής σκληρότητας με υψηλή δύναμη.
- Χαλυβοκράματα: Βρίσκουν εφαρμογή όπου ασκούνται μεγάλες τάσεις στο δόντι σε συνδυασμό με μεγάλη αντίσταση στη φθορά.
- Αλουμίνιο: Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου χρειάζεται μικρή αδράνεια περιστρεφόμενης μάζας.
- Μη-μεταλλικά υλικά: Χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται αθόρυβη λειτουργία και μεγάλες περιφερειακές ταχύτητες

2.3 Κατεργασίες κοπής οδοντώσεων με γένεση

Το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων (hobbing), η πλάνιση οδοντώσεων με κύλιση με παλιδρομούνται και περιστρεφόμενο κοπτικό οδοντοτροχό (μέθοδος Fellows), καθώς και η πλάνιση οδοντώσεων με κύλιση με παλιδρομούνται και μεταφερόμενο κοπτικό οδοντοτροχό (μέθοδος Magg), αποτελούν τις τρεις βασικές κατηγορίες κοπής οδοντώσεων με γένεση [14]. Οι κατηγορίες αυτές καθώς και η κινηματική τους φαίνονται στο Σχήμα 2.2.

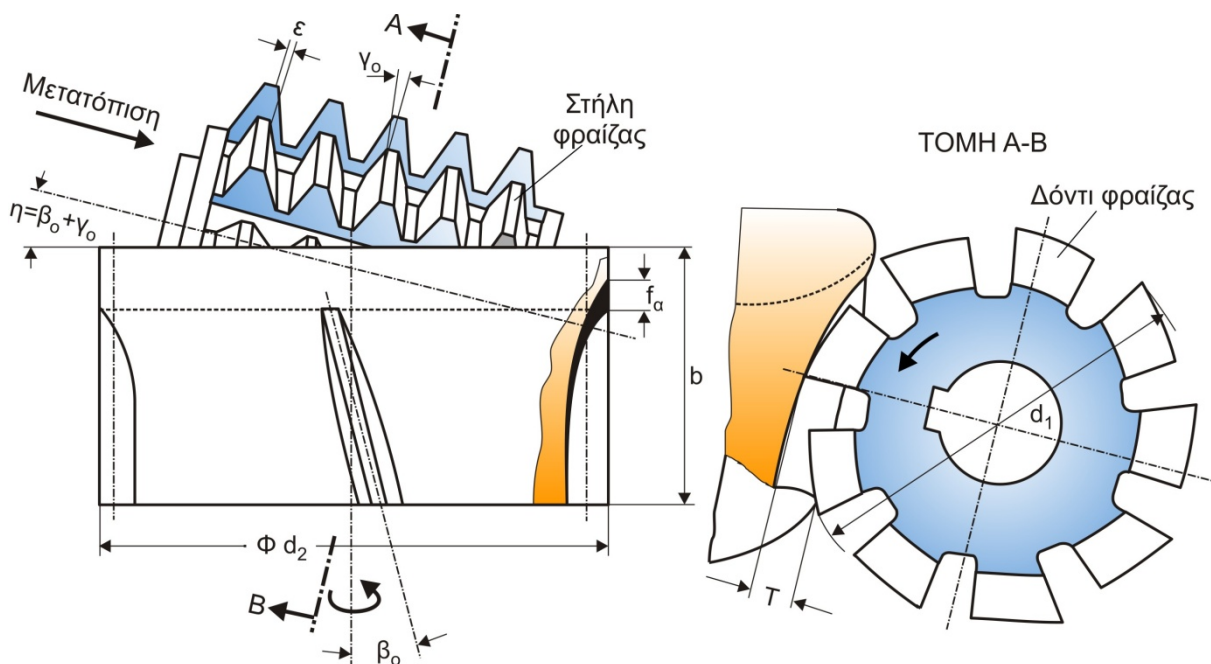


Σχήμα 2.2: Κύριες κατεργασίες κοπής οδοντώσεων με κύλιση (Πηγή: ΕΕΔΜ*)

Η κοπή στις περιπτώσεις αυτές βασίζεται στη συνεργασία ή εμπλοκή του κοπτήρα με την προς μορφοποίηση πλευρά οδόντωσης του κομματιού, έτσι ώστε οι παρειές των δοντιών να

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους κύρια θέση κατέχει το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων (hobbing) που είναι μέθοδος κοπής κυρίως εξωτερικών οδοντώσεων. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογές στη μορφοποίηση μετωπικών ή πλαγίων οδοντοτροχών και οδοντοτροχών που συνεργάζονται με ατέρμονα κοχλία. Κατά την κοπή με φραιζάρισμα με κύλιση, ανάλογα με τη μέθοδο κατεργασίας αλλά και σε συνάρτηση με τα διάφορα δεδομένα της, τα σχηματιζόμενα απόβλιπτα έχουν μορφή και διαστάσεις που ποικίλουν. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται στα αναπτυσσόμενα φορτία κατά την κοπή καθώς και στη φθορά των δοντιών του κοπτήρα. Με την μέθοδο αυτή θα ασχοληθούμε αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

Οι παράμετροι που εμφανίζονται στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, σχετίζονται με το κοπτικό εργαλείο, τον κατεργαζόμενο τροχό καθώς και τις συνθήκες κοπής. Η βασική ορολογία της κατεργασίας παριστάνεται στο Σχήμα 2.3.



d_2 : διάμετρος τροχού
 z_2 : αριθμός δοντιών
 β_0 : γωνία κλίσης οδόντωσης
 b : πλάτος τροχού

d_1 : διάμετρος φραιζας
 z_1 : αριθμός αρχών
 γ_0 : γωνία ελίκωσης
 ε : αξονικό βήμα
 i : αριθμός στηλών

η : γωνία κλίσης
 $\eta = \beta_o \pm \gamma_o$
 f_a : αξονική πρόωση
 f_H : βήμα μετατόπισης
 T : βάθος κοπής

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 υπάρχουν διάφορα είδη κοπτικών φραιζών. Ανάμεσα σε αυτά περιλαμβάνονται φραιζες για κατασκευή οδοντωτών τροχών αλυσίδων (sprocket hobs), φραιζες για την κατασκευή κορόνων, φραιζες λοξότμησης, φραιζες για ειδικά προφίλ οδοντώσεων και φραιζες ευθείας και πλάγιας οδόντωσης.

Κοπτικές Φραιζες (Hob Cutters)			
			
Sprocket hob	Worm wheel hobs	Spline hob	Straight side spline hob
			
Spur and helical gear hob	Chamfer hobs	Involute spline hob	Serration hob

Σχήμα 2.4: Είδη κοπτικών φραιζών

2.5 Κινηματική ανάλυση της κατεργασίας



Σχήμα 2.5: Κινηματική στην κατεργασία Gear Hobbing

Η κατεργασία κυλινδρικών οδοντωτών τροχών με φραιζάρισμα με κύλιση διαφέρει από άλλες κατεργασίες (φραιζάρισμα, τρνάρισμα) λόγω της αρχής της κύλισης και της μορφοποίησης του κατεργαζόμενου τροχού, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Οι κινήσεις αυτές μπορούν να προσομοιωθούν από τη λειτουργία ζεύγους οδοντωτού τροχού-ατέρμονα κοχλία. Το κοπτικό εργαλείο εκτελεί μια σύνθετη κίνηση που συνίσταται από μια περιστροφική κίνηση (πρωτεύουσα κίνηση) με προκαθορισμένη ταχύτητα κοπής και μια ευθύγραμμη κίνηση κατά τον άξονα του κατεργαζόμενου τροχού η οποία αποτελεί την αξονική πρόωση (S_a). Το κατεργαζόμενο τεμάχιο εκτελεί περιστροφική κίνηση ακτινικής προώσεως με καθορισμένη ταχύτητα. Η σχέση μετάδοσης ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο, παραμένει σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Η περιστροφή τους συνεχίζεται προς την ίδια κατεύθυνση μέχρι να ολοκληρωθεί η μορφοποίηση της οδόντωσης, στο βάθος κοπής που έχει τεθεί για το συγκεκριμένο πέρασμα (πάσο). Σε περίπτωση που απαιτούνται περισσότερα από ένα περάσματα για τη μορφοποίηση της οδόντωσης, τίθεται στο τέλος κάθε περιστροφής του τεμαχίου το επιλεγόμενο κατά περίπτωση βάθος κοπής με προσεγγιστική κίνηση του κομματιού προς τον κοπτήρα.

Η περιστροφική ταχύτητα της κοχλιοειδούς φραιζας n_1 συνδέεται με την περιστροφική ταχύτητα του τεμαχίου n_2 .

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

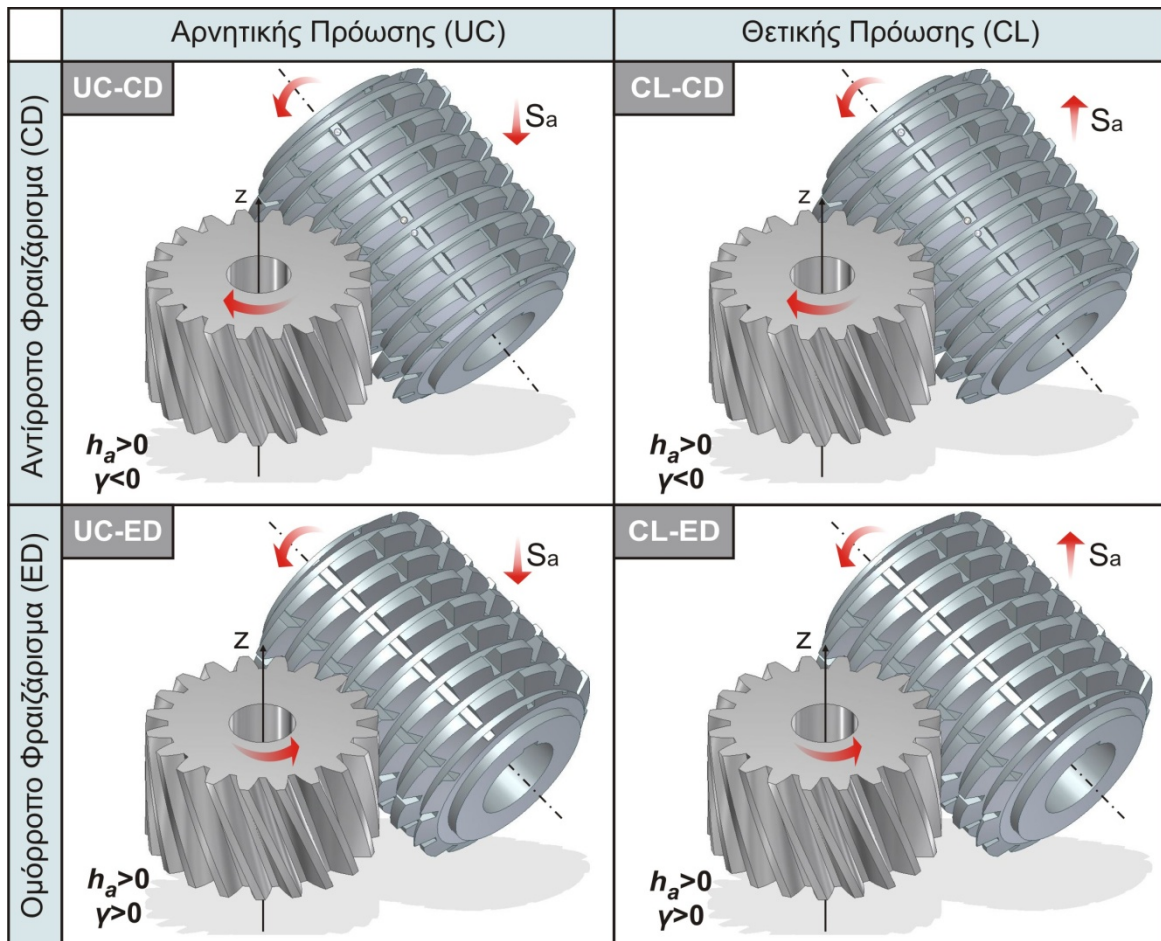
όπου z_2 είναι ο αριθμός δοντιών του υπό κατεργασία οδοντοτροχού και z_1 ο αριθμός των κοπτικών αρχών της φραιζας. Οποιαδήποτε παρέκκλιση από τη σχέση αυτή είναι απαγορευμένη.

2.5.1 Παραλλαγές του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων

Το περιφερικό φραιζάρισμα με κύλιση, συνίσταται με τις παρακάτω παραλλαγές [3,4]:

- αξονικό (ομόρροπο ή αντίρροπο)
- αξονικό ακτινικό
- εφαπτομενικό αξονικό (διαγώνιο)

Στην πράξη εφαρμόζεται συχνότερα το αξονικό φραιζάρισμα με τις επιμέρους μορφές του, ομόρροπο ή αντίρροπο. Το μέγεθος που καθορίζει ποια από τις δυο μορφές φραιζαρίσματος ακολουθείται, είναι η φορά της πρόωσης S_a , όπου πρόωση ορίζεται η αξονική μετατόπιση της φραιζας ανά περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 2.6: Παραλλαγές της κατεργασίας φραιζαρίσματος πλάγιων οδοντώσεων με κύλιση

Έτσι θετική πρόωση ($S_a > 0$) οδηγεί σε ομόρροπο φραιζάρισμα, ενώ αρνητική ($S_a < 0$) σε αντίρροπο. Οι τέσσερις παραλλαγές της κατεργασίας φραιζαρίσματος πλάγιων οδοντώσεων με κύλιση, φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Σε περιπτώσεις όπου επιθυμείται ο κατεργαζόμενος τροχός να αποκτήσει πλάγια οδόντωση, διακρίνονται δύο ακόμη παραλλαγές για κάθε μια

από τις δύο κατηγορίες του αξονικού φραιζαρίσματος. Οι παραλλαγές αυτές, ανάλογα με την κατεύθυνση ελίκωσης του εργαλείου και την κατεύθυνση ελίκωσης του τροχού, είναι το ομοιόστροφο και το αντίστροφο φραιζάρισμα.

2.6 Στάθμη των γνώσεων

Η ανάπτυξη της φθοράς στις ακμές των παρειών του κοπτικού εργαλείου διαφέρει σημαντικά στις διαφορετικές θέσεις κύλισης για την κατεργασία ενός αυλακίου οδόντωσης. Αυτή η ιδιομορφία οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, κάθε κοπτικό δόντι κόβει πάντα μια θέση κύλισης, όπου το απόβλιττο έχει μια σταθερή αλλά σύνθετη γεωμετρία. Η γεωμετρία αυτή του αποβλίττου στις διαδοχικές θέσεις κύλισης είναι πολύ διαφορετική όσον αφορά το πάχος, το μήκος και τη μορφή. Για την επίτευξη ομοιόμορφης φθοράς στα κοπτικά δόντια, το εργαλείο στο αξονικό φραιζάρισμα οδοντώσεων, μετατοπίζεται εφαπτομενικά μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό κατεργασμένων οδοντώσεων. Συνεπώς η φθορά κάθε κοπτικού δοντιού, εξαρτώμενη από την εφαπτομενική μετατόπιση και τον αντίστοιχο αριθμό κοπών, δημιουργείται από τιμές φθοράς όπου το εργαλείο αντιμετωπίζει διαφορετικές θέσεις κύλισης σε επακόλουθες θέσεις εφαπτομενικής μετατόπισης. Η βελτιστοποίηση της εφαπτομενικής μετατόπισης παρουσιάστηκε στο [11,28].

Έχουν ήδη παρουσιαστεί μαθηματικά μοντέλα [8,9] για τον υπολογισμό της εξέλιξης της φθοράς σε διαφορετικές θέσεις κύλισης, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους της κατεργασίας. Σε αυτές τις εργασίες πρωτοπαρουσιάστηκαν, για τον υπολογισμό της φθοράς σε σχέση με το παραγόμενο απόβλιττο, οι ισοδύναμες διαστάσεις του αποβλίττου όπως το μήκος l και το πάχος του αποβλίττου h_s . Επιπλέον, εφόσον το εργαλείο καταπονείται μηχανικά και θερμικά λόγω συγκρούσεων κατά τη ροή του, γεγονός που έχει πρωτεύουσα σημασία για την ανάπτυξη της φθοράς, ορίστηκαν πέντε χαρακτηριστικές μορφές αποβλίττου σε σχέση με τη γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες παραμέτρους σε σχέση με τις προαναφερόμενες ομάδες αποβλίττων, είναι επίσης δυνατή η μαθηματική περιγραφή της επίδρασης των συγκρούσεων του αποβλίττου στην αναπτυσσόμενη φθορά.

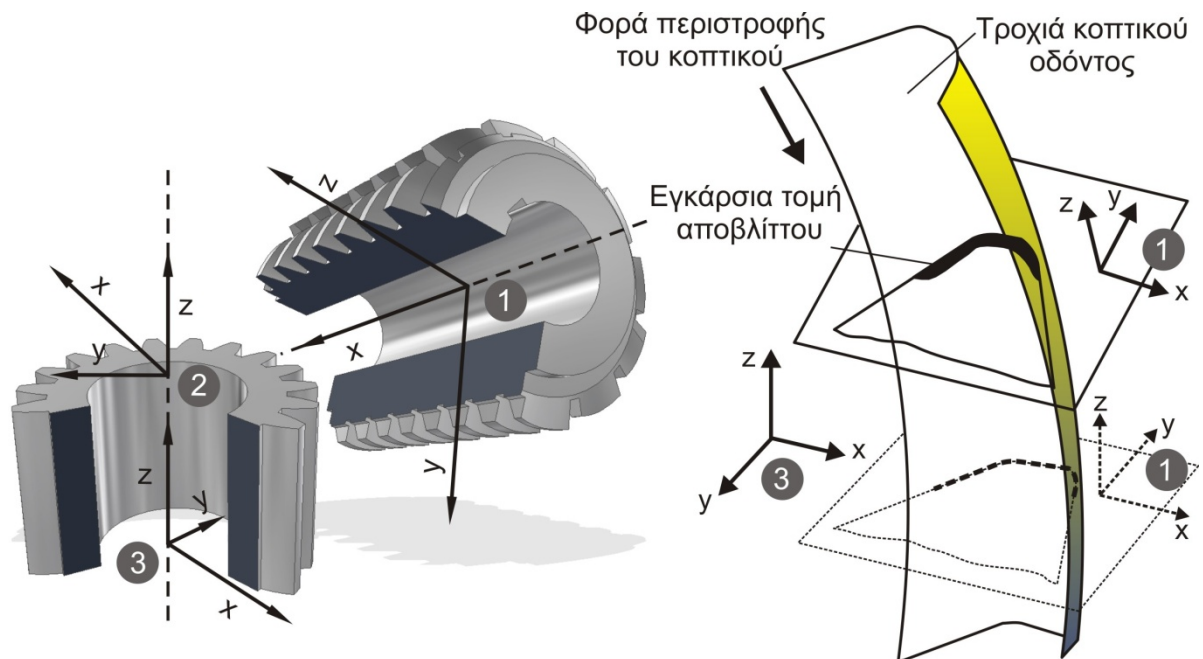
Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος για τον προσδιορισμό της φθοράς των κοπτικών εργαλείων ο οποίος λάμβανε υπ' όψη του τις συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης. Στους υπολογισμούς αυτούς ένας συγκεκριμένος αριθμός κοπών σε μια θέση εφαπτομενικής μετατόπισης, υπολογίζονταν λαμβάνοντας υπόψη πως η οδόντωση έχει άπειρο πλάτος.

Εφόσον όμως η γεωμετρία του αποβλίττου διαφέρει κατά την διάρκεια της κατεργασίας στην ίδια θέση κύλισης και κατά μήκος μιας οδόντωσης, το πλάτος της οδόντωσης αποτελεί σημαντική παράμετρο για την φθορά, η οποία δεν είχε ληφθεί υπ' όψη στην μαθηματική περιγραφή της φθοράς. Ειδικά για οδοντώσεις μικρού πλάτους, μέχρι τώρα η βελτιστοποίηση των συνθηκών εφαπτομενικής μετατόπισης μπορεί να συνδεθεί μόνο ποιοτικά σε σχέση με την διάμετρο του εργαλείου. Η εισαγωγή της παραμέτρου του πλάτους παρουσιάστηκε στο [11].

2.7 Προσδιορισμός διατομών απαραμόρφωτου αποβλίττου κατά τη διείσδυση του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο κομμάτι

Για τον υπολογισμό της γεωμετρίας των αποβλίττων, προσομοιώνεται η κινηματική της κατεργασίας με ένα μαθηματικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό προσδιορίζει τις τομές της στιγμιαίας μορφής του τεμαχίου με παράλληλα επίπεδα σε κάθε θέση κύλισης [5,6]. Δηλαδή σε μια συγκεκριμένη θέση κύλισης το τεμάχιο τέμνεται με παράλληλα επίπεδα πάνω στα οποία "αποτυπώνεται" η τρέχουσα μορφή του τεμαχίου. Η μορφή αυτή της τομής είναι μια πολυγωνική γραμμή που αποτελείται σε κάθε επίπεδο από μεταβλητό αριθμό σημείων.

Σημειώνεται ότι “θέσεις περιστροφής” λέγεται ο αριθμός των επιπέδων με τα οποία τέμνεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στη συνέχεια οι πολυγωνικές γραμμές στα παράλληλα επίπεδα που προσδιορίστηκαν με την προηγούμενη διαδικασία προσεγγίζονται από νέες πολυγωνικές γραμμές που αποτελούνται πλήθος σημείων.



Σχήμα 2.7 Υπολογισμός των εγκάρσιων τομών του αποβλήτου στο φραιζάρισμα οδοντώσεων με κύλιση

Ενώνοντας τα αντίστοιχα σημεία των πολυγωνικών γραμμών δημιουργείται στο χώρο ένα πλέγμα πολυγωνικών γραμμών που αποτελεί την επιφάνεια που καθορίζει τη στιγμιαία μορφή του τεμαχίου. Η διαδικασία προσδιορισμού της στιγμιαίας μορφής του τεμαχίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.

Τέμνοντας την επιφάνεια η οποία προσδιορίστηκε και η οποία περιγράφει το κατεργαζόμενο τεμάχιο με επίπεδα στην κατεύθυνση κίνησης του δοντιού, δηλαδή με επίπεδα που η κατεύθυνσή τους ταυτίζεται με τη θέση του κοπτικού δοντιού σε διάφορες θέσεις της τροχιάς του, προσδιορίζονται οι διατομές απαραμόρφωτου αποβλήτου σε κάθε θέση περιστροφής.

Η ακρίβεια της επιφάνειας που καθορίζει την επιφάνεια του αποβλήτου εξαρτάται από το πλήθος των παράλληλων επιπέδων στα οποία υπολογίζονται αρχικά οι τομές του αποβλήτου, καθώς και από το πλήθος των σημείων διακριτοποίησης των υπολογισμένων τομών στα παράλληλα επίπεδα.

2.8 Ανάλυση παραγόντων επίδρασης στη φθορά του εργαλείου

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη του πλάτους ζώνης φθοράς σε κάθε θέση κύλισης είναι πολλοί, όπως έχει διαπιστωθεί από ερευνητές. Οι παράγοντες αυτοί έχουν σχέση με το υλικό του κατεργαζόμενου τροχού, το υλικό του κοπτικού εργαλείου, το υγρό κοπής που χρησιμοποιείται, τα δεδομένα της κατεργασίας, τη γεωμετρία του κοπτικού του εργαλείου, τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού και το είδος της κατεργασίας.

Όσον αφορά τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται από το μέτρο οδόντωσης, τη γωνία κοπτικής κατατομής, το ύψος κεφαλής, την εξωτερική διάμετρο, τον αριθμό των κοπτικών αρχών, τον αριθμό των σειρών, την πιθανή διόρθωση κατατομής, και την κατεύθυνση της ελίκωσης.

Όσον αφορά τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού το πλάτος ζώνης φθοράς εξαρτάται από το μέτρο οδόντωσης, την γωνία εμπλοκής, την γωνία ελίκωσης, τον αριθμό των δοντιών, τη μετατόπιση κατατομής και τον συντελεστή ύψους κεφαλής.

Τέλος, όσον αφορά το είδος της κατεργασίας το πλάτος ζώνης φθοράς εξαρτάται από το αν το φραιζάρισμα είναι αξονικό, πλάγιο, διαγώνιο, ακτινικό-αξονικό, ομόρροπο/αντίστροφο, αντίρροπο/ομοιόστροφο, ομόρροπο/ομοιόστροφο, αντίρροπο/αντίστροφο.

Η συμπεριφορά του μηχανισμού φθοράς είναι πολύ διαφορετική μεταξύ των δοντιών της φραιζας λόγω της πολλαπλότητας της μορφής του αποβλίττου, του πάχους και του μήκους του και της ομάδας στην οποία ανήκει.

Οι παραπάνω τρεις παράμετροι εξάγονται από το πρόγραμμα “HOB3D” και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της πορείας της φθοράς στις μεμονωμένες θέσεις κύλισης από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι τρεις αυτές παράμετροι.

2.9 Απόβλιττα στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων

Κατά την κοπή με φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων ανάλογα με τα δεδομένα της κατεργασίας, τα σχηματιζόμενα απόβλιττα έχουν μεγάλη ποικιλία σε μορφή και διαστάσεις. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η φθορά των δοντιών του κοπτήρα.

Ο υπολογισμός του αποβλίττου που προκύπτει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, πραγματοποιείται για κάθε πέρασμα του κοπτικού εργαλείου μέσα από το κατεργαζόμενο κομμάτι. Κάθε τέτοιο πέρασμα ονομάζεται “θέση κύλισης”. Ο υπολογισμός των διατομών του αποβλίττου γίνεται μέσω του προγράμματος HOB3D το οποίο προσομοιώνει την κινηματική του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων και στη συνέχεια υπολογίζει τις διεισδύσεις σε κάθε θέση κύλισης του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Από τις διεισδύσεις αυτές και από την εκάστοτε τρέχουσα μορφή του τεμαχίου, υπολογίζονται οι διατομές του αποβλίττου. Τέλος υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια κοπής.

Ο υπολογισμός γίνεται μέσω προσομοίωσης της κατεργασίας σε περιβάλλον CAD. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα του λεπτομερέστερου προσδιορισμού των δυνάμεων κοπής. Μέσω του προγράμματος υπολογίζονται και οι όγκοι των αποβλίττων στις συγκεκριμένες θέσεις κύλισης. Το τελευταίο χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση των διαστάσεων με τα τρισδιάστατα στερεά απόβλιττα ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα διαγράμματα για των προσδιορισμό των συντελεστών του νέου μοντέλου.

2.9.1 Μήκος και ισοδύναμο πάχος αποβλίττου

Το μήκος και το πάχος του αποβλίττου δεν παραμένουν σταθερά σε όλο το μήκος της κοπτικής ακμής κατά τη διάρκεια της κοπής. Μεγαλύτερο πάχος αποβλίττου εμφανίζεται συνήθως στην περιοχή της κεφαλής του δοντιού, ενώ το μικρότερο εμφανίζεται στις παρειές του δοντιού. Οι κρίσιμες περιοχές της κοπτικής ακμής είναι αυτές κοντά στις γωνίες της κεφαλής του δοντιού. Σε αυτές τις περιοχές εμφανίζονται ισχυρές μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μεγαλύτερη φθορά του δοντιού. Επειδή εμφανίζονται διαφορετικά πάχη αποβλίττου στις παρειές και στην κεφαλή του δοντιού με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται διαφορετική κατανομή της φθοράς, για την περιγραφή της φθοράς στην κρίσιμη περιοχή υπολογίζεται το μέγεθος ισοδύναμου πάχους αποβλίττου h_s σύμφωνα με τον τύπο που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Με h_k συμβολίζεται το πάχος του αποβλίττου στη γωνία της κεφαλής του δοντιού και με h_f το πάχος του αποβλίττου σε απόσταση a_f από την κεφαλή. Η απόσταση a_f ορίζει τις κρίσιμες περιοχές στις οποίες εμφανίζεται η μέγιστη φθορά του κοπτικού δοντιού. Οι κρίσιμες

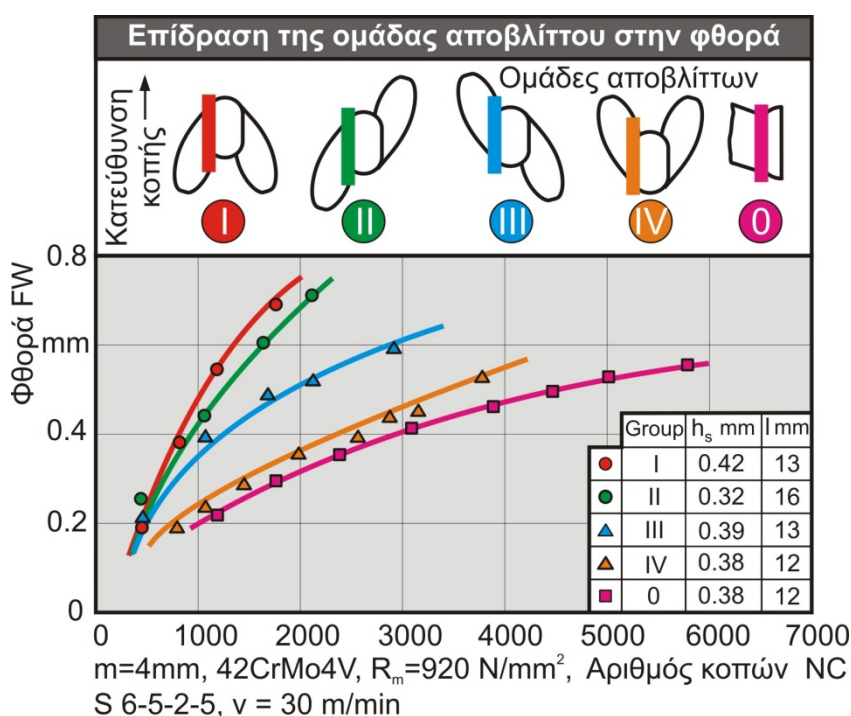
περιοχές οριοθετούνται από τις γωνίες της κεφαλής του δοντιού μέχρι την απόσταση a_f προς τις αντίστοιχες παρειές.

Μετρήσεις έχουν δείξει ότι αυτή η απόσταση μπορεί να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια από τον τύπο που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Σ' αυτόν τον τύπο λ_H είναι ο συντελεστής συμπίεσας του υλικού του κατεργαζόμενου τροχού, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου καθώς και από τις συνθήκες κατεργασίας. Με l συμβολίζεται το μήκος του αποβλίττου σε απόσταση a_f από τη γωνία κεφαλής. Τέλος συμβολίζεται με l_k το μήκος του αποβλίττου που αντιστοιχεί στη γωνία της κεφαλής του δοντιού.

Αυτή η υπολογιστική διαδικασία που αναφέρθηκε εκτελείται από το πρόγραμμα "HOB3D" το οποίο εξάγει σαν μερικά αποτελέσματα του, το μήκος και το ισοδύναμο πάχος του αποβλίττου.

2.9.2 Ομάδες αποβλίττων

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στη φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι και η ομάδα στην οποία ανήκει το απόβλιττο. Με τον όρο ομάδα αποβλίττου εννοείται μια από τις πέντε μορφές αποβλίττου που φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Η ομαδοποίηση αυτή στηρίχτηκε σε πειραματικά αποτελέσματα και μετρήσεις [8]. Για παράδειγμα, φαίνεται στο σχήμα 2.9 ότι το απόβλιττο που ανήκει στην ομάδα 1 προήλθε από την κοπή που ξεκινάει από τις παρειές του κοπτικού δοντιού και κατέληξε στην κεφαλή του. Για κάθε ομάδα αποβλίττου, η παρεμπόδιση που δέχεται το απόβλιττο κατά τη ροή του είναι διαφορετική με συνέπεια να υπάρχει διαφορετική επίδραση στη φθορά του κοπτικού δοντιού. Η παρεμπόδιση του αποβλίττου δημιουργείται όταν δυο ή περισσότερα υποαπόβλιττα (π.χ απόβλιττα από τις δυο παρειές του δοντιού) συγκρούονται κατά τη ροή τους πάνω στην επιφάνεια του αποβλίττου με αποτέλεσμα την παραμόρφωσή τους.



Σχήμα 2.8: Ομάδες αποβλίττων κατά το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων

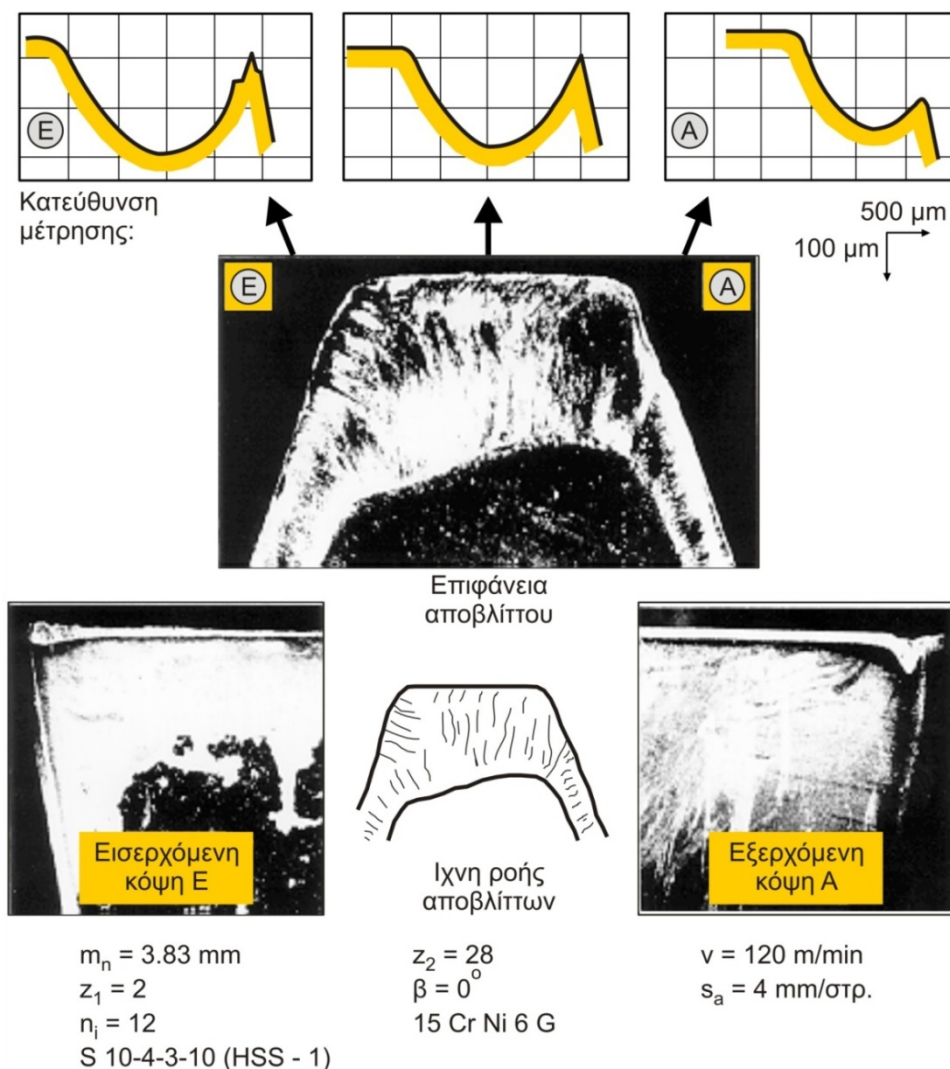
Η παραμόρφωση του αποβλίττου στη γωνία της κεφαλής Α επηρεάζεται κυρίως από τη παρεμπόδιση στη ροή του αποβλίττου που γίνεται εκεί και δευτερευόντως από τη παρεμπόδιση στο Β. Η δυσμενέστερη περίπτωση σχετικά με την ένταση παρεμπόδισης είναι αυτή της ομάδας αποβλίττου 1, ενώ η ευμενέστερη αυτή της ομάδας 0 όπου δεν υπάρχει παρεμπόδιση στη ροή του αποβλίττου. Το απόβλιττο που σχηματίζεται στην πέμπτη

περίπτωση είναι μόνο ένα που ρέει ανεμπόδιο στην παρειά χωρίς να συγκρούεται με άλλο υποαπόβλιττο, με αποτέλεσμα να συνάγεται μηδενική ένταση παρεμπόδισης. Αυτό το είδος του αποβλίττου ονομάζεται μη παρεμποδιζόμενο απόβλιττο, ενώ όλα τα άλλα παρεμποδιζόμενα.

Από τα γεωμετρικά και τεχνολογικά δεδομένα της κατεργασίας εξάγονται επίσης πειραματικά, ορισμένες σταθερές οι οποίες μαζί με το μήκος αποβλίττου, το ισοδύναμο πάχος του, την ομάδα του, καθώς και την ταχύτητα κοπής προωθούνται στο μαθηματικό προσομοιωτικό μοντέλο της φθοράς, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η πορεία της φθοράς κατά τη διάρκεια της κοπής.

2.10 Προσδιορισμός πλάτους ζώνης φθοράς

Με τον όρο φθορά εννοούμε τη φθορά στην ελεύθερη επιφάνεια του δοντιού που ορίζεται σαν πλάτος ζώνης φθοράς. Η μέγιστη τιμή του πλάτους ζώνης φθοράς επιδρά στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, αφού πάνω από μια επιτρεπτή τιμή της το εργαλείο αστοχεί [22,23,29].

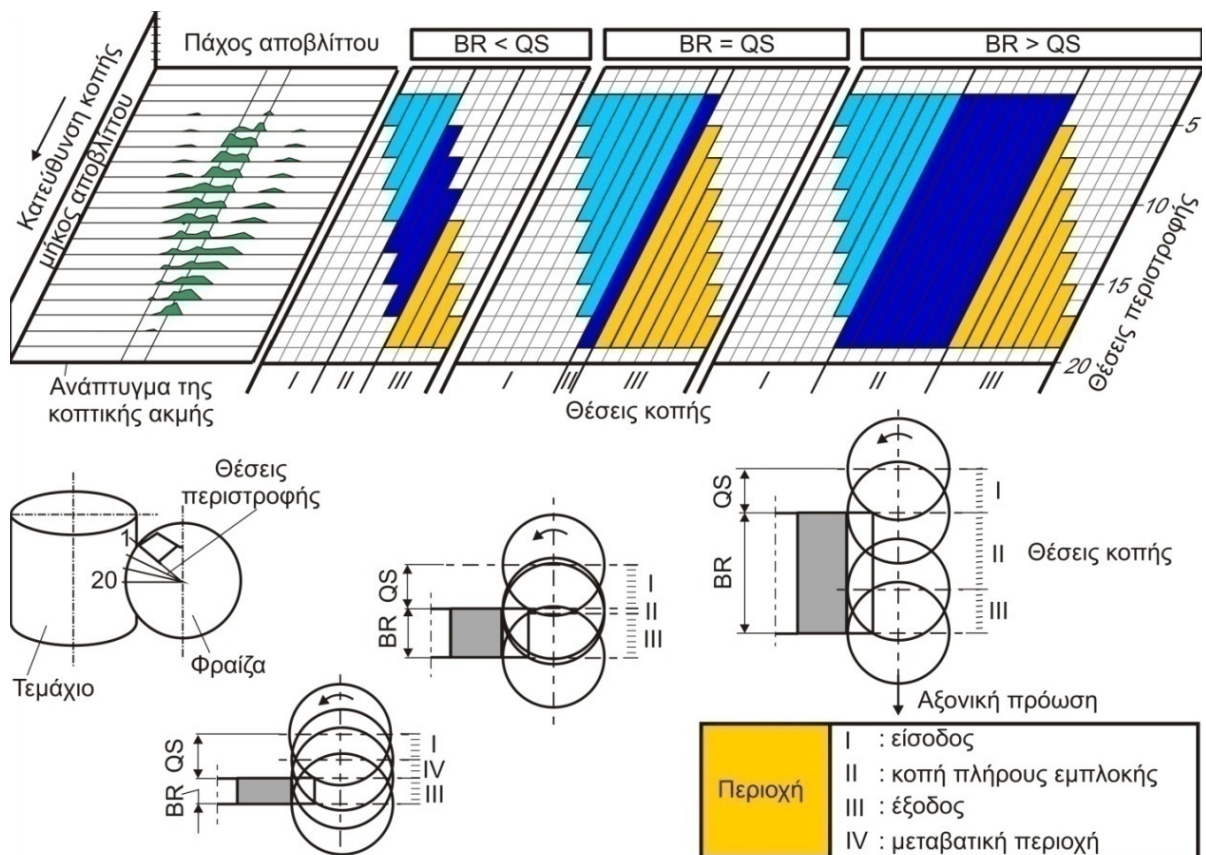


Σχήμα 2.9: Ανάπτυξη πλάτους ζώνης φθοράς στο κοπτικό δόντι (Πηγή: ΕΕΔΜ*)

Στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων αναπτύσσεται φθορά στα μεμονωμένα κοπτικά δόντια, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων και υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή της κοπής.

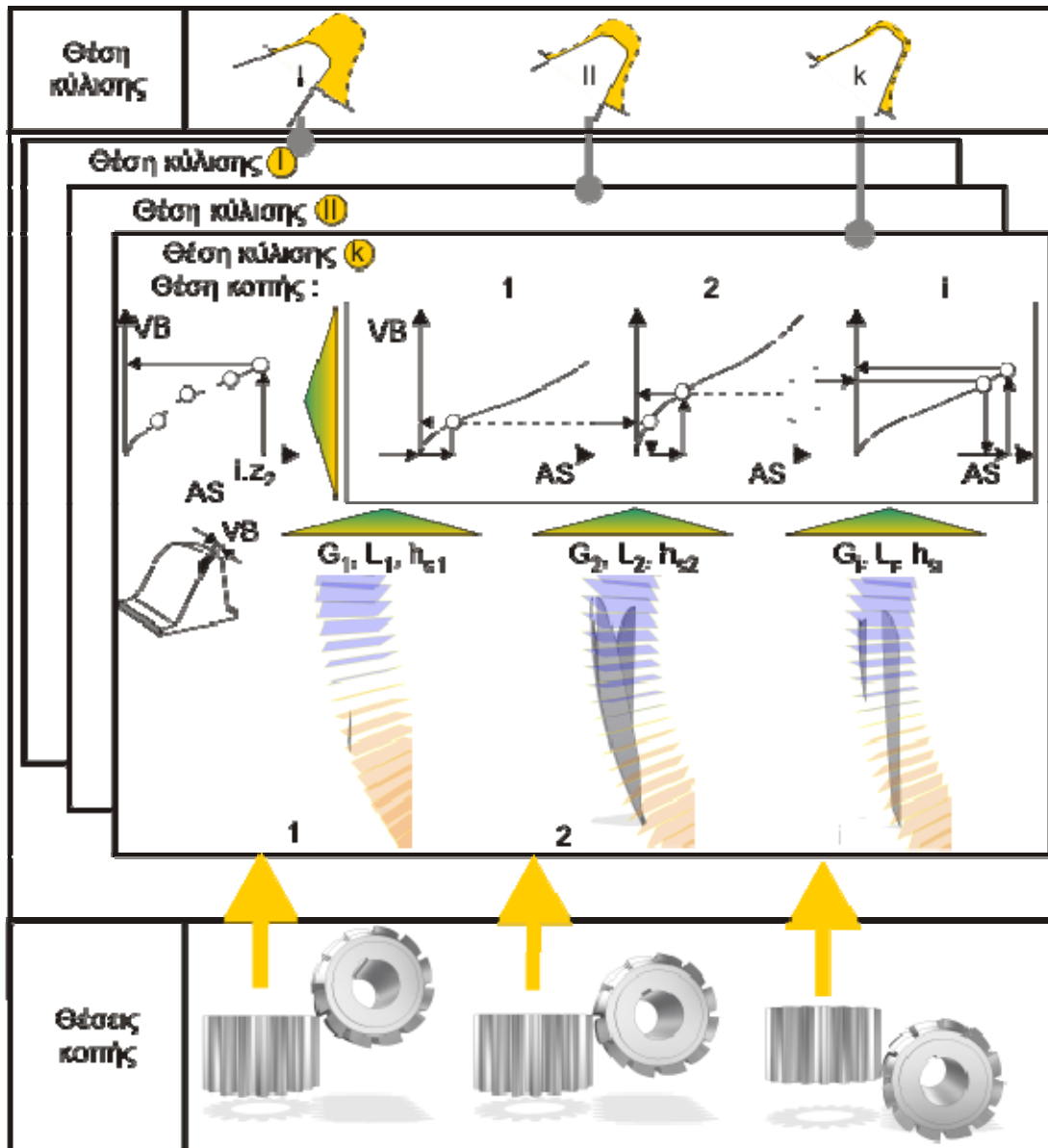
2.10.1 Υπολογισμός της φθοράς σε διαφορετικές θέσεις κύλισης λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος της οδόντωσης

Η γεωμετρία του αποβλήτου στις περιοχές εισόδου και εξόδου είναι τμήμα της αντίστοιχης γεωμετρίας αποβλήτου στην περιοχή πλήρους βάθους κοπής της εξεταζόμενης θέσης κύλισης, όπως φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος. Οι τομές του απαραμόρφωτου αποβλήτου σε διαδοχικές θέσεις περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, παρουσιάζονται πάνω στο ανάπτυσμα της κοπτικής ακμής.



Τα διαγράμματα στο πάνω μέρος του σχήματος παρουσιάζουν τις θέσεις περιστροφής κατά τη διάρκεια των οποίων σε κάθε θέση κοπής δημιουργείται ένα απόβλιττο. Αν το πλάτος της οδόντωσης BR είναι μικρότερο από την απόσταση QS, το απόβλιττο είναι πάντα ένα τμήμα από το αντίστοιχο απόβλιττο πλήρους βάθους κοπής και μια μεταβατική περιοχή είναι

ανάμεσα στις περιοχές εισόδου και εξόδου. Ένα παράδειγμα υπολογισμού της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλίπτου σε διαδοχικές θέσεις κοπής μιας συγκεκριμένης θέσης κύλισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11. Στις θέσεις κοπής 11 και 12, το κοπτικό δόντι κόβει σε περιοχή πλήρους βάθους κοπής και το απόβλιπτο επιτυγχάνει τις μέγιστες διαστάσεις του. Η γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίπτου, αναφορικά με την κατεύθυνση της κοπής στις περιοχές εισόδου και εξόδου, είναι ένα αρχικό τμήμα της γεωμετρίας του αποβλίπτου πλήρους βάθους κοπής. Ο προσδιορισμός αυτός της γεωμετρίας του αποβλίπτου στις διάφορες θέσεις κοπής, διεξάγεται με τη βοήθεια προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων, το οποίο αναπτύχθηκε περαιτέρω για τις ανάγκες της έρευνας που περιγράφεται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2.11: Καθορισμός της ζώνης φθοράς στην παρειά του κοπτικού δοντιού σε διαδοχικές θέσεις κοπής μιας θέσης κύλισης

Για τη μαθηματική περιγραφή της φθοράς είναι αναγκαίος ο υπολογισμός παραμέτρων όπως το μήκος, το πάχος και η ομάδα όλων των αποβλίπτων στις διάφορες θέσεις κοπής και στις αντίστοιχες θέσεις κύλισης. Βάσει της πρόσφατα εξελιγμένης διαδικασίας, μπορεί να καταταχθεί η γεωμετρία κάθε απαραμόρφωτου αποβλίπτου σε μια από πέντε χαρακτηριστικές

ομάδες (0 έως V), για κάθε παρειά του κοπτικού δοντιού (εισόδου ή εξόδου) και αντίστοιχα να προσδιοριστούν το ισοδύναμο πάχος αποβλίπτου h_s και το μήκος του l . Ο νέος τρόπος υπολογισμού των ισοδύναμων μεγεθών Οι αντίστοιχες τιμές για την παρειά εξόδου υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο.

Με τη βοήθεια αυτών των παραμέτρων μπορεί να προσδιοριστεί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11, η εξέλιξη της φθοράς σε κάθε κοπτικό δόντι κατά τη διάρκεια της κοπής σε μια θέση κύλισης και για κάθε θέση κοπής κατά μήκος του πλάτους της οδόντωσης. Για παράδειγμα στη θέση κύλισης k, θεωρείται ότι ένα κοπτικό δόντι χωρίς φθορά εισέρχεται στην κοπή. Η φθορά μετά από την κοπή όλων των αυλακίων οδόντωσης στην πρώτη θέση κοπής κατά μήκος του πλάτους της οδόντωσης, μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις υπολογισμένες τιμές για την ομάδα, το μήκος και το πάχος του αποβλίπτου και με τη βοήθεια των εξισώσεων που έχουν ήδη παρουσιαστεί. Η περαιτέρω εξέλιξη της φθοράς στις επόμενες θέσεις κοπής μπορεί επίσης να προσδιοριστεί εξαρτώμενη από την αντίστοιχη γεωμετρία του αποβλίπτου.

Για τον καθορισμό του πλάτους ζώνης φθοράς έπεται από το φραιζάρισμα με κύλιση σε μια νέα θέση κοπής, ο αριθμός των ήδη πραγματοποιημένων κοπών προστίθεται στον αριθμό κοπών της νέας θέσης κοπής και το πλάτος ζώνης φθοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη της φθοράς σε αυτή τη θέση κοπής.

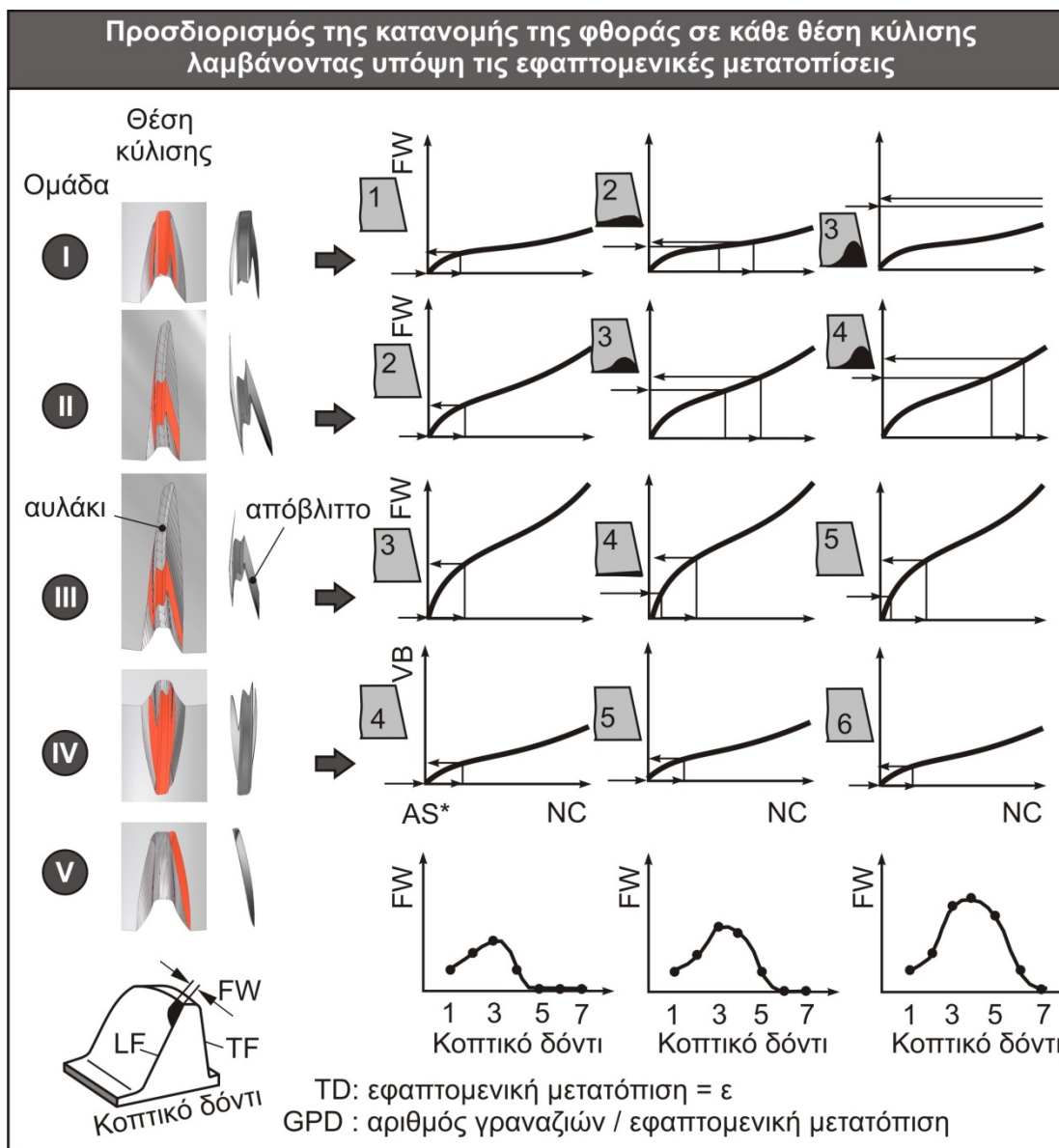
2.10.2 Υπολογισμός του πλάτους ζώνης φθοράς λαμβάνοντας υπόψη τις εφαπτομενικές μετατοπίσεις

Η διαδικασία υπολογισμού της εξέλιξης της φθοράς σε όλα τα κοπτικά δόντια, λαμβάνοντας υπόψη τις εφαπτομενικές μετατοπίσεις, επεξηγείται στο Σχήμα 2.12 για την πιο συνηθισμένη περίπτωση που είναι το αξονικό φραιζάρισμα. Για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι η κατεργασία ενός αυλακιού οδόντωσης πραγματοποιείται σε τέσσερις θέσεις κύλισης (I έως IV). Οι αντίστοιχες επιφάνειες κοπής του υλικού και τα απόβλιντα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο αριστερό μέρος του σχήματος. Κατά την κοπή του αυλακιού οδόντωσης τα τέσσερα (1 έως 4) από τα επτά δόντια μιας φράιζας χωρίς φθορά, παίρνουν μέρος στη διαδικασία του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων για πρώτη φορά. Ο νόμος εξέλιξης της φθοράς στις αντίστοιχες θέσεις κύλισης, λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις κοπής, καθορίζεται όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Εξαιτίας των διάφορων νόμων εξέλιξης της φθοράς σε κάθε θέση κύλισης, το κοπτικό δόντι παρουσιάζει διάφορες τιμές φθοράς έπεται από την κοπή ενός αριθμού οδοντωτών τροχών, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα αριθμό κοπών AS^* , γενικά διαφορετικό για κάθε θέση κύλισης. Η πορεία του μέγιστου πλάτους ζώνης φθοράς πάνω σε κάθε κοπτικό δόντι παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη κατανομή της φθοράς πάνω στα κοπτικά δόντια μιας φράιζας, η φράιζα μετατοπίζεται εφαπτομενικά. Το κοπτικό δόντι μετατοπιζόμενο κατά μια απόσταση, στο απλοποιημένο παράδειγμα κατά ένα αξονικό βήμα ($SHW=\varepsilon$), τοποθετείται σε μια επόμενη θέση κύλισης. Σαν αποτέλεσμα αυτής της μετατόπισης, το δόντι 5 εισέρχεται στην κοπή κόβοντας στη θέση κύλισης IV, ενώ το δόντι 1 εγκαταλείπει τη διαδικασία κοπής. Περαιτέρω εξέλιξη της φθοράς στα υπόλοιπα κοπτικά δόντια, έπεται από κάθε εφαπτομενική μετατόπιση, εξαρτάται από τον νόμο εξέλιξης της φθοράς στη θέση κύλισης στην οποία κόβει κάθε κοπτικό δόντι.

Η προαναφερθείσα μεθοδολογία παρέχει τη δυνατότητα του καθορισμού της συμπεριφοράς της φθοράς στα κοπτικά δόντια, λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της κοπτικής φράιζας, τα δεδομένα του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της κατεργασίας, όπως επίσης και τις συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης. Προκειμένου να ελεγχθούν οι τιμές της φθοράς, οι οποίες προέκυψαν από αυτή την υπολογιστική διαδικασία, πραγματοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός πειραμάτων φθοράς. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η παρουσιαζόμενη υπολογιστική διαδικασία επιτρέπει με ικανοποιητικό τρόπο μια ακριβή περιγραφή της

εξέλιξης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπιση.



Σχήμα 2.12: Προσδιορισμός της κατανομής της φθοράς σε κάθε θέση κύλισης λαμβάνοντας υπόψη τις εφαπτομενικές μετατοπίσεις.

2.11 Αναλυτική διαδικασία περιγραφής της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς για κάθε θέση κύλισης

Για τον προσδιορισμό της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς του κοπτικού δοντιού σε κάθε θέση κύλισης, τα δεδομένα που απαιτούνται είναι:

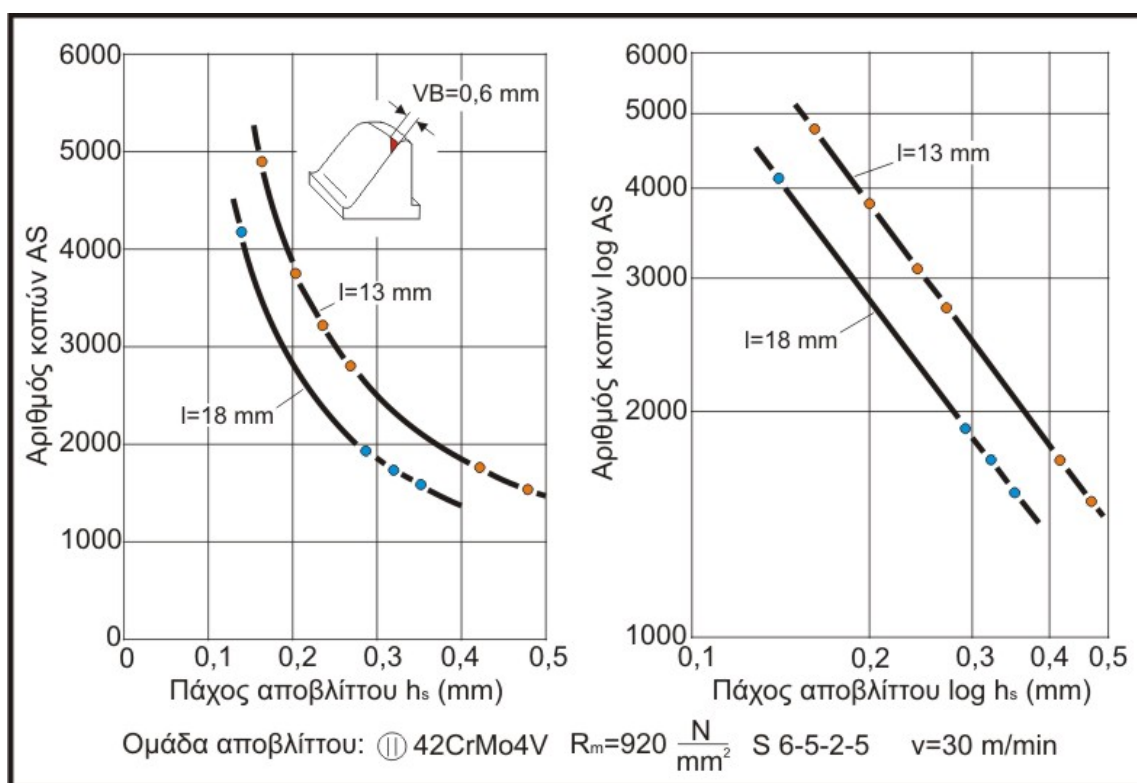
- ο αριθμός κοπών
- το ισοδύναμο πάχος του αποβλίττου
- το μήκος του αποβλίττου
- η ομάδα του αποβλίττου καθώς και
- η ταχύτητα κοπής

Η επίδραση αυτών των παραμέτρων στην εξέλιξη της φθοράς σε κάθε θέση κύλισης θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. μέσω εκτεταμένης διερεύνησης της φθοράς με διάφορα δεδομένα κατεργασίας [8,39]. Το υλικό κατεργασίας και το υλικό του κοπτικού εργαλείου, καθώς και οι συνθήκες κοπής, παραμένουν σταθερά σε όλες τις περιπτώσεις διερεύνησης της εξέλιξης της φθοράς. Επίσης όλη η πειραματική διαδικασία που παρουσιάζεται στη συνέχεια πραγματοποιείται στην ίδια μηχανή κοπής με κύλιση οδοντώσεων.

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα προσδιορισμού φθοράς. Με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διατομής του απαραμόρφωτου αποβλίττου και στη συνέχεια ο καθορισμός της ομάδας του αποβλίττου, καθώς και ο καθορισμός του πάχους και του μήκους του αποβλίττου.

2.11.1 Μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης του αριθμού κοπών από το μήκος και το πάχος του αποβλίττου.

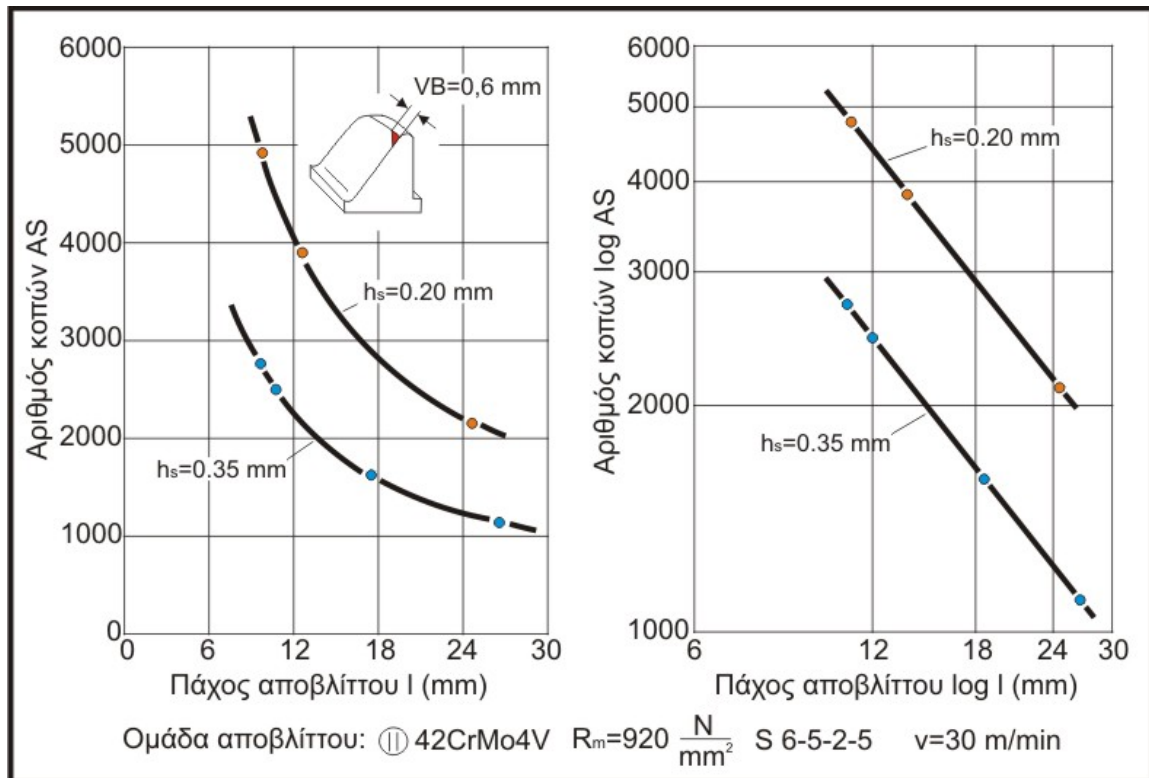
Η επίδραση του πάχους του αποβλίττου στον αριθμό κοπών μπορεί να παρασταθεί, με ικανοποιητική ακρίβεια, με ευθεία γραμμή σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα για σταθερό μήκος αποβλίττου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Η κλίση των ευθειών αυτών είναι η ίδια για όλα τα μήκη αποβλίττου όπως προέκυψε από εκτεταμένα πειράματα. Η προαναφερθείσα εξάρτηση εκφράζεται από την γνωστή επίδραση της πρόωσης στη διάρκεια ζωής του κοπτικού κατά το τορνάρισμα. Το πάχος του αποβλίττου κατά το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων αντιστοιχεί αναλογικά στην πρόωση, ενώ ο αριθμός κοπών αντιστοιχεί στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 2.13 Εξάρτηση του αριθμού κοπών από το ισοδύναμο πάχος του αποβλίττου

Η εξάρτηση του αριθμού κοπών από το μήκος του αποβλίττου, μπορεί να παρασταθεί με ευθεία γραμμή σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.14. Εκτεταμένα πειράματα έδειξαν ότι η επίδραση του πάχους του αποβλίττου στην κλίση αυτών των ευθειών είναι αμελητέα. Ο αριθμός των κοπών που προκύπτει για μεγαλύτερα μήκη

αποβλίπτου είναι μικρότερος, ενώ μειώνεται ταυτόχρονα και το συνολικό μήκος κοπής που επιτυγχάνεται για τιμή του πλάτους ζώνης φθοράς $VB=0,6\text{mm}$.



Σχήμα 2.14 Εξάρτηση του αριθμού κοπών από το ισοδύναμο μήκος του αποβλίπτου

Το συνολικό μήκος κοπής προκύπτει από το γινόμενο του μήκους του αποβλίπτου με τον αριθμό κοπών. Για σταθερό μήκος κοπής, οι ευθείες στο δεξιό τμήμα του σχήματος θα είχαν κλίση 45 μοίρες. Αυτή η τάση διαπιστώνεται για απόβλιττα διαφορετικών ομάδων και οφείλεται κυρίως στις υψηλές θερμικές καταπονήσεις των κοπτικών δοντιών. Για μεγαλύτερο μήκος αποβλίπτου, αυξάνει συγχρόνως ο χρόνος κοπής ανά διείσδυση του κοπτικού δοντιού, και κατά συνέπεια η θερμοκρασία κοπής. Η θερμότητα που εκλύεται κατά την κοπή στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, δεν δύναται να απαχθεί από τη θέση κοπής λόγω κακών συνθηκών ψύξης. Ως εκ τούτου υφίσταται κίνδυνος να ανοπτηθεί ο ταχυχάλυβας του κοπτικού εργαλείου με αποτέλεσμα την αύξηση της φθοράς της κοπτικής του επιφάνειας. Αυτός ο κίνδυνος είναι δυνατό να μειωθεί με ελάττωση της ταχύτητας κοπής. Η επίδραση του μήκους του αποβλίπτου στον αριθμό κοπών κατά το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, έχει ανάλογη συμπεριφορά με την επίδραση της ταχύτητας κοπής στη διάρκεια ζωής του εργαλείου κατά το τορνάρισμα.

Συνοψίζοντας είναι δυνατόν να διαπιστωθεί, όσον αφορά την εξάρτηση του αριθμού κοπών από το μήκος και το πάχος του αποβλίπτου, ότι η εξάρτηση αυτή και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να παρασταθεί σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα με τη βοήθεια ευθειών. Η κλίση των ευθειών αυτών καθορίζεται από τις τεχνολογικές παραμέτρους και την ομάδα του αποβλίπτου, όχι όμως από το μήκος ή το πάχος του αποβλίπτου.

Οι διαπιστώσεις αυτές περιγράφονται με τη βοήθεια των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \log AS}{\partial \log h_s} &= -k_{hs} & \frac{\partial \log AS}{\partial \log I} &= -k_I \\
 \frac{\partial \left(\frac{\partial \log AS}{\partial \log I} \right)}{\partial \log h_s} &= 0 & \frac{\partial \left(\frac{\partial \log AS}{\partial \log h_s} \right)}{\partial \log I} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}
 \tag{2}$$

όπου $-k_{hs}$ και $-k_I$ είναι οι κλίσεις των ευθειών των σχημάτων 2.13 και 2.14 αντίστοιχα. Το άθροισμα των διαφορικών ως προς $\log I$ και $\log h_s$, δηλαδή:

$$d \log AS = \left(\frac{\partial \log AS}{\partial \log h_s} \right) d \log h_s + \left(\frac{\partial \log AS}{\partial \log I} \right) d \log I \tag{3}$$

Αντικαθιστώντας έχουμε:

$$d \log AS = -k_{hs} d \log h_s - k_I d \log I \tag{4}$$

Θεωρείται το συνολικό διαφορικό της συνάρτησης $\log AS = f(\log h_s, \log I)$. Το γεγονός ότι οι μερικές παράγωγοι αυτής της συνάρτησης είναι ίσες με το μηδέν προκύπτει:

$$\int d \log AS = -k_{hs} \int d \log h_s - k_I \int d \log I \tag{5}$$

Και μετά την ολοκλήρωση της εξίσωσης, προκύπτει:

$$\frac{\log AS}{k} + \frac{k_{hs} \log h_s}{k} + \frac{k_I \log I}{k} = 1 \tag{6}$$

Από αυτή τη σχέση ορίζονται και οι εξής συντελεστές του μοντέλου της φθοράς.

$$C_{AS} = k \quad C_{hs} = \frac{k}{k_{hs}} \quad C_I = \frac{k}{k_I} \tag{7}$$

οπότε προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\log AS}{C_{AS}} + \frac{\log h_s}{C_{hs}} + \frac{\log I}{C_I} = 1 \tag{8}$$

Αυτή η εξίσωση των μεταβλητών $\log AS$, $\log h_s$ και $\log I$ μπορεί να παρασταθεί σε ένα τριγωνικό σύστημα συντεταγμένων σαν ένα επίπεδο όπως παρουσιάζεται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Αυτό το επίπεδο τέμνει τους άξονες στα σημεία με συντεταγμένες C_{AS} , C_{hs} και C_I κι εξαρτάται από τεχνολογικά δεδομένα για μια δεδομένη τιμή του πλάτους ζώνης φθοράς και για ταχύτητα κοπής.

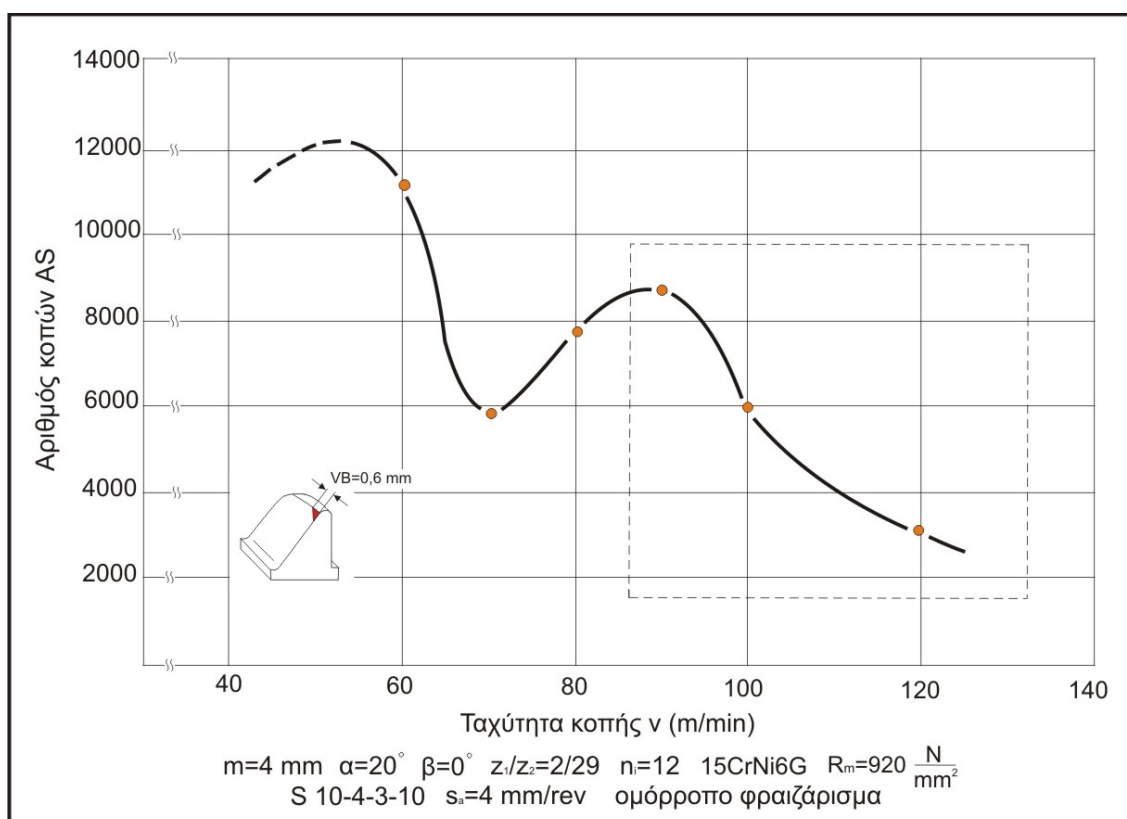
Με τη βοήθεια της εξίσωσης και με δεδομένη ταχύτητα κοπής είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο αριθμός κοπών σε κάθε θέση κύλισης μέχρις ότου επιτευχθεί ένα ορισμένο πλάτος ζώνης φθοράς, σε σχέση πάντα με τη γεωμετρία του αποβλήτου.

Η ομάδα του αποβλήτου, όπως επίσης το πάχος h_s και το μήκος l του αποβλήτου υπολογίζονται αυτόματα για κάθε θέση κύλισης από το πρόγραμμα που προσομοιώνει την κινηματική του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων και προσδιορίζει τη γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλήτου. Στη συνέχεια με γνωστές πλέον τις τιμές των σταθερών C_{AS} , C_{h_s} και C_l και με τη βοήθεια της εξίσωσης είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο αριθμός κοπών μέχρις ότου επιτευχθεί ένα δεδομένο πλάτος ζώνης φθοράς.

Οι σταθερές C_{AS} , C_{h_s} και C_l εξαρτώνται από τα τεχνολογικά δεδομένα της κατεργασίας και σχετίζονται με μια ταχύτητα κοπής αναφοράς v και μια τιμή πλάτους ζώνης φθοράς αναφοράς VB . Οι σταθερές αυτές μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς με πειράματα φθοράς σε κάθε θέση κύλισης.

2.11.2 Μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής

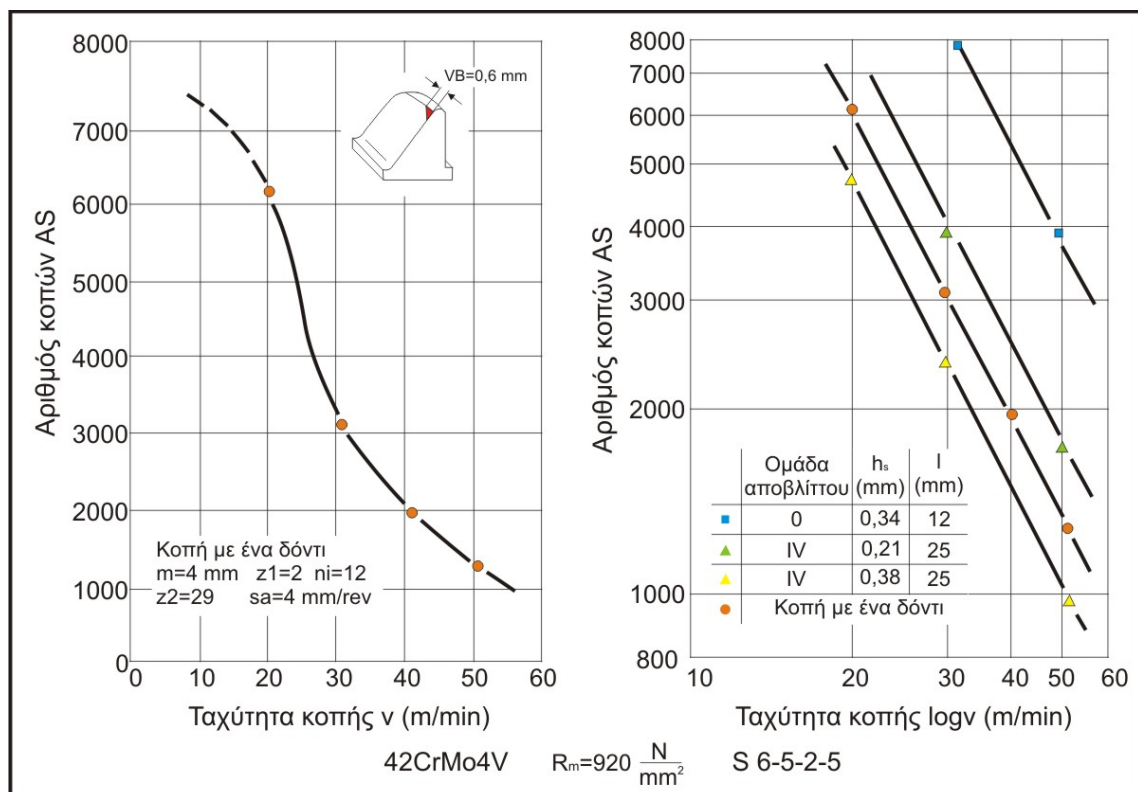
Η σχέση μεταξύ του αριθμού κοπών και της ταχύτητας κοπής είναι μη γραμμική όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.15. Έτσι ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας και με ταχύτητα κοπής μεγαλύτερη από 80 m/min εμφανίζεται μέγιστο στην καμπύλη. Ταυτόχρονα μέγιστο εμφανίζεται και στην περιοχή ταχύτητας κοπής των 60 m/min. Κατ' αναλογία με κατεργασίες торναρίσματος, αυτές οι υψηλές τιμές αριθμού κοπών οφείλονται στην δημιουργία ψευδόκοπης στο κοπτικό εργαλείο. Με ταχύτητα κοπής μικρότερης των 60 m/min δημιουργείται μια σταθερή ψευδόκοψη, η οποία προφυλάσσει τόσο την επιφάνεια ελευθερίας όσο και την επιφάνεια του αποβλήτου. Η όλη αυτή διαδικασία οδηγεί σε ένα μεγαλύτερο αριθμό κοπών. Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής, έχει σαν αποτέλεσμα το να γίνει η ψευδόκοψη ασταθής και να αυξηθεί η φθορά ελεύθερης επιφάνειας. Ένας ελάχιστος αριθμός κοπών επιτυγχάνεται με μια ταχύτητα κοπής μεταξύ 60 και 80 m/min.



Σχήμα 2.15 Εξάρτηση του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής

Πάνω από αυτό το ελάχιστο μειώνεται η φθορά της ελεύθερης επιφάνειας λόγω μιας θερμικά επαγόμενης συστολής της ψευδόκοψης κι επομένως παρατηρείται ένα μέγιστο στον αριθμό κοπών.

Το δεύτερο μέγιστο του αριθμού κοπών επιτυγχάνεται με μία ταχύτητα κοπής στην περιοχή μεταξύ 80 και 100 m/min όπου δεν λαμβάνει χώρα καθόλου ψευδόκοψη. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων από ταχυχάλυβα που χρησιμοποιούνται στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων ελαττώνεται λόγω της ταχύτατης αύξησης της φθοράς. Αυτό συμβαίνει γιατί πάνω από μια ορισμένη ταχύτητα κοπής, η άνοδος της θερμοκρασίας κατά την κοπή προκαλεί ελάττωση της σκληρότητας του ταχυχάλυβα των κοπτικών εργαλείων.



Σχήμα 2.16 Εξάρτηση του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής στην κρίσιμη περιοχή μελέτης της φθοράς

Η εξάρτηση του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής, ενώ σε κανονικό διάγραμμα με δεκαδικούς άξονες παρίσταται με μία καμπύλη, σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα παριστάνεται με μία ευθεία. Η κλίση αυτής της ευθείας δεν επηρεάζεται από τη γεωμετρία του αποβλήτου.

Έτσι τόσο στο φραιζάρισμα με ένα δόντι, όσο και στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, σε κάθε θέση κύλισης με δημιουργία διακεκριμένων τύπων αποβλήτου, οι ευθείες που προκύπτουν (αριθμός κοπών σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής), είναι παράλληλες μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.

Αυτή η κλίση εξαρτάται από τα δεδομένα της κατεργασίας και περιγράφεται από τη σταθερά C_v . Με τη βοήθεια αυτής της σταθεράς C_v είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης PP , στη διεύθυνση του άξονα $\log AS$, ενός σημείου P , για μια ταχύτητα κοπής από ένα σημείο μιας ταχύτητας κοπής αναφοράς, μέσω της εξίσωσης:

$$PP_i = \frac{\log v_i - \log v}{\lg \omega_v} = \frac{\log v_i - \log v}{C_v} \quad (9)$$

Η απόσταση PP_i για σταθερή ταχύτητα κοπής v και για δεδομένα χαρακτηριστικά της κατεργασίας δεν επηρεάζεται από την γεωμετρία του αποβλήτου. Όλα τα σημεία P_i που αντιστοιχούν σε ταχύτητα κοπής v και για διάφορες τιμές των h_s και l , βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, παράλληλο στο επίπεδο που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κοπής αναφοράς. Η απόσταση PP_i ανάμεσα σε αυτά τα επίπεδα στην κατεύθυνση του άξονα $\log AS$ υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (9). Το επίπεδο που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κοπής v , τέμνει τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων, στα σημεία με συντεταγμένες C_{AS_i} , C_{hs_i} , C_l , και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\frac{\log AS}{C_{AS_i}} + \frac{\log h_s}{C h_{s_i}} + \frac{\log l}{C_{l_i}} = 1 \quad (10)$$

Εξ' αιτίας της παραλληλότητας αυτού του επιπέδου με το επίπεδο της ταχύτητας κοπής αναφοράς ισχύει:

$$\frac{C_{AS_i}}{C_{AS}} = \frac{C_{h_{s_i}}}{C_{h_s}} = \frac{C_{l_i}}{C_l} = f_v \quad (11)$$

Με τη βοήθεια της σχέσης αυτής προκύπτει από τη σχέση (15)

$$\frac{\log AS}{C_{AS}} + \frac{\log h_s}{C_{h_s}} + \frac{\log l}{C_l} = f_v \quad (12)$$

Ο συντελεστής f_v προκύπτει βάσει του σχήματος 2.19 ως εξής:

$$f_v = \frac{C_{AS_i}}{C_{AS}} = \frac{C_{AS} - PP_i}{C_{AS}} \quad (13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (14) ισχύει:

$$f_v = \frac{-\log v_i}{C_v C_{AS}} + 1 + \log v(C_v C_{AS}) \quad (14)$$

και με αντικατάσταση στην εξίσωση (17)

$$\frac{\log AS}{C_{AS}} + \frac{\log h_s}{C h_s} + \frac{\log l}{C_l} = \frac{-\log v_i}{C_v C_{AS}} + 1 + \frac{\log v}{C_v C_{AS}} \quad (15)$$

Η σχέση (15) αποτελεί επέκταση της σχέσης (8). Με τη βοήθεια της εξίσωσης (15) είναι δυνατός ο υπολογισμός του αριθμού κοπών σε κάθε θέση κύλισης μέχρι την επίτευξη ενός ορισμένου πλάτους ζώνης φθοράς, σε σχέση πάντα με τη γεωμετρία του αποβλήτου και επιπλέον της ταχύτητας κοπής. Το μέγεθος της σταθεράς C_v προκύπτει από την κλίση της ευθείας, η οποία σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα περιγράφει την εξάρτηση του αριθμού κοπών από την ταχύτητα κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16. Το πλάτος ζώνης φθοράς που έχει τεθεί σαν βάση για τον προσδιορισμό της σταθεράς C_v , επηρεάζει το μέγεθος αυτής της σταθεράς ασήμαντα. Αυτή η τάση έρχεται σε συμφωνία με τα ήδη γνωστά από το

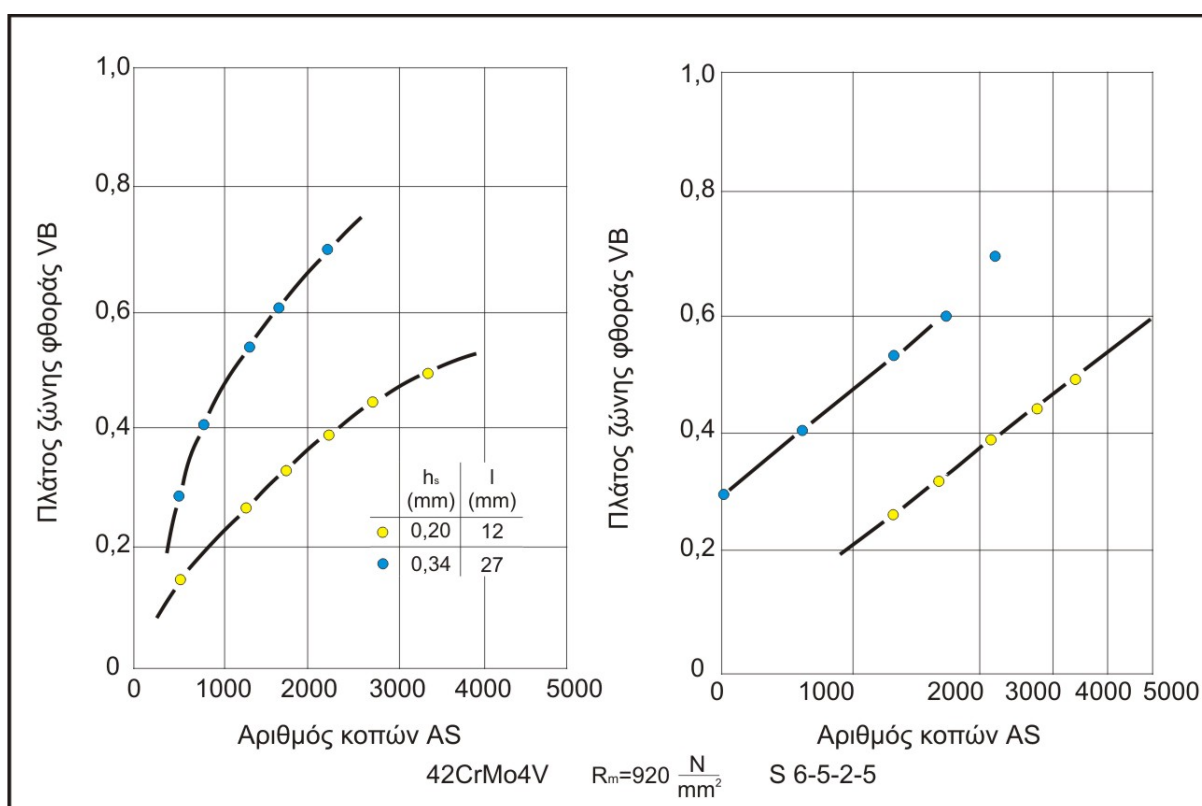
τορνάρισμα. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δεν προκύπτει μια μονοσήμαντη εξάρτηση. Η σταθερά C_v μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ανεξάρτητη από το πλάτος ζώνης φθοράς.

2.11.3 Μαθηματική περιγραφή της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς σε συνάρτηση με τον αριθμό κοπών.

Οι καμπύλες εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς παρουσιάζουν γενικά ένα τμήμα στο οποίο η φθορά αυξάνει με φθίνοντα ρυθμό, ένα αναλογικό τμήμα και τέλος ένα τμήμα στο οποίο η καμπύλη αυξάνει με προοδευτικό ρυθμό όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.17.

Οι τιμές του αριθμού κοπών, για τις οποίες εμφανίζονται τα αντίστοιχα τμήματα των καμπυλών εξέλιξης της φθοράς, εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται κατά την κοπή. Οι μεταβατικές περιοχές από το ένα τμήμα της καμπύλης στο άλλο, παριστάνονται με σημεία ασυνέχειας στην περίπτωση που η καμπύλη της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς παρασταθεί σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα. Σε κάθε τμήμα ξεχωριστά η εξάρτηση του πλάτους ζώνης φθοράς από τον αριθμό κοπών, περιγράφεται με μία ευθεία. Σε μη ευνοϊκές συνθήκες κοπής μετατοπίζονται τα σημεία αλλαγής της κλίσης της καμπύλης σε χαμηλότερες τιμές του πλάτους ζώνης φθοράς VB . Δεξιά στο σχήμα 2.17, παρουσιάζονται δύο τυπικές καμπύλες εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς σε σχέση με τον αριθμό κοπών κατά το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων σε δύο θέσεις κύλισης. Αυτές οι καμπύλες εξέλιξης φθοράς αντιστοιχούν σε δύο κοπτικά δόντια τα οποία κόβουν απόβλιπτα τα οποία ανήκουν σε δύο διαφορετικές ομάδες αποβλίπτων με διαφορετικό μήκος και πάχος αποβλίπτου για την κάθε περίπτωση.

Η παράσταση των καμπυλών εξέλιξης της φθοράς σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα επιτρέπει εκτός των άλλων να γίνει εμφανές ότι τιμές του πλάτους ζώνης φθοράς μικρότερες από 0,6 mm εμφανίζονται πριν από το πρώτο σημείο ασυνέχειας της καμπύλης εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς.



Σχήμα 2.17 Εξάρτηση του αριθμού κοπών από το πλάτος ζώνης φθοράς

Η περιγραφή της εξέλιξης της φθοράς σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα με ευθεία γραμμή αποδεικνύεται όχι απόλυτα ικανοποιητική. Ανάλογα με το εάν το κομμάτι της καμπύλης

περιγραφής της εξέλιξης της φθοράς μετά το σημείο ασυνέχειας ληφθεί υπόψη ή όχι, μπορεί να προκύψουν σημαντικά λάθη κατά τον προσδιορισμό της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς.

Αντίθετα σε ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα δεξιά στο σχήμα 2.17, είναι δυνατόν η αύξηση του πλάτους ζώνης φθοράς να περιγραφεί πολύ καλά με μία ευθεία, σε μια πολύ ενδιαφέρουσα για την κατασκευή οδοντωτών τροχών περιοχή πλάτους ζώνης φθοράς από 0,2 έως 0,6 mm.

Για ένα πλάτος ζώνης φθοράς μικρότερο από 0,2 mm, όπως φαίνεται στο δεκαδικό σύστημα συντεταγμένων εμφανίζεται μια γραμμική αύξηση του πλάτους ζώνης φθοράς. Το όριο του πλάτους ζώνης φθοράς ίσο με 0,6 mm θα ληφθεί στη συνέχεια σαν το ανώτατο όριο πλάτους ζώνης φθοράς κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων. Παρόμοιες επιστημονικές εργασίες στη μελέτη του πλάτους ζώνης φθοράς έχουν δείξει ότι το τέλος του γραμμικού τμήματος της καμπύλης περιγραφής της εξέλιξης του πλάτους ζώνης φθοράς σταματά στην τιμή 0,6 mm. Το υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης που εμφανίζει αύξουσα τάση, προσθέτει πολύ λίγο στη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων.

Οι παραπάνω καμπύλες αντιστοιχούν σε διεισδύσεις κοπτικών δοντιών τα οποία κόβουν απόβλιπτα της ίδια ομάδας, με διαφορετικές τιμές όμως πάχους και μήκους αποβλίπτου. Όπως προκύπτει από το δεξί τμήμα του σχήματος 2.17, σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, η εξέλιξη της φθοράς μεταξύ των τιμών πλάτους ζώνης φθοράς 0,2 και 0,6 mm, είναι δυνατό να παρασταθεί με ευθείες, οι οποίες μπορούν να ληφθούν παράλληλες μεταξύ τους. Αυτή η θεώρηση έχει επαληθευτεί από τη μελέτη της φθοράς μέσω εκτεταμένων πειραμάτων.

Έτσι λοιπόν για τις ευθείες που περιγράφουν το πλάτος ζώνης φθοράς για κάθε ομάδα αποβλίπτου, σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα, υπάρχει μια χαρακτηριστική τιμή για την κλίση της ευθείας. Η τιμή αυτή περιγράφεται από τη σταθερά C_{VB} και αναφέρεται σε μια ορισμένη ταχύτητα κοπής. Με τη βοήθεια της σταθεράς C_{VB} είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση PP_i στην κατεύθυνση του άξονα $\log AS$, ενός σημείου P_i που αντιστοιχεί σε ένα πλάτος ζώνης φθοράς VB_i , από ένα σημείο το οποίο αντιστοιχεί σε ένα πλάτος φθοράς αναφοράς VB , μέσω της ακόλουθης εξίσωσης.

$$PP_i = \frac{VB - VB_i}{\tan \omega_{VB}} = \frac{VB - VB_i}{C_{VB}} \quad (16)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή για σταθερό πλάτος ζώνης φθοράς VB_i το διάστημα PP_i δεν εξαρτάται από το μήκος και το πλάτος αποβλίπτου. Τα παραπάνω εκφράζουν ότι όλα τα σημεία P_i ενός πλάτους ζώνης φθοράς για διάφορες τιμές πάχους h_s και μήκους l αποβλίπτου βρίσκονται σε ένα επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο που αντιστοιχεί σε μια τιμή φθοράς αναφοράς VB . Το επίπεδο που αντιστοιχεί σε ένα πλάτος ζώνης φθοράς VB_i τέμνει τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων στις τιμές C_{AS_i} , C_{hs_i} , C_{l_i} και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\log AS}{C_{AS_i}} + \frac{\log h_s}{C_{hs_i}} + \frac{\log l}{C_{l_i}} = 1 \quad (17)$$

Επειδή το επίπεδο αυτό είναι παράλληλο στο επίπεδο αναφοράς της φθοράς ισχύει:

$$\frac{C_{AS_i}}{C_{AS}} = \frac{C_{hs_i}}{C_{hs}} = \frac{C_{l_i}}{C_l} = f_{VB} \quad (18)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης αυτής στην εξίσωση (22) προκύπτει:

$$\frac{\log AS}{C_{AS}} + \frac{\log h_s}{C_{h_s}} + \frac{\log I}{C_I} = f_v \quad (19)$$

Εξ' αιτίας των γεωμετρικών συνθηκών προσδιορίζεται ο συντελεστής f_{VB} , ο οποίος ορίζεται ως ακολούθως:

$$f_{VB} = \frac{C_{AS_i}}{C_{AS}} = \frac{C_{AS} - PP_i}{C_{AS}} \quad (20)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (21) προκύπτει:

$$f_{VB} = \frac{VB_i}{C_{VB} C_{AS}} + 1 + \frac{VB}{C_V C_{AS}} \quad (21)$$

και με αντικατάσταση στην εξίσωση (24) λαμβάνεται:

$$\frac{\log AS}{C_{AS}} + \frac{\log h_s}{C_{h_s}} + \frac{\log I}{C_I} = \frac{VB_i}{C_{VB} C_{AS}} + 1 - \frac{VB}{C_{VB} C_{AS}} \quad (22)$$

Η εξίσωση (22) αποτελεί όπως και η εξίσωση (15) εξέλιξη της σχέσης (8). Μέσω της εξίσωσης (22) είναι δυνατός ο υπολογισμός του αριθμού κοπών για πλάτος ζώνης φθοράς μεταξύ 0,2 και 0,6 mm, σε συνάρτηση με τη γεωμετρία του αποβλίπτου και για δεδομένη ταχύτητα κοπής. Οι τιμές της σταθερής C_{VB} για την οποία οι ομάδες του αποβλίπτου υπεισέρχονται στην όλη υπολογιστική διαδικασία, προσδιορίζονται με αντίστοιχα πειράματα φθοράς για κάθε θέση κύλισης.

2.11.4 Εξισώσεις περιγραφής της εξέλιξης της φθοράς για κάθε θέση κύλισης

Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα εξάρτηση που υπάρχει σε κάθε θέση κύλισης ανάμεσα στον αριθμό των κοπών, το πάχος του αποβλίπτου και το μήκος του αποβλίπτου, για μια ταχύτητα κοπής v , και μέχρι ενός πλάτους ζώνης φθοράς VB_i , προκύπτει η ακόλουθη σχέση (σύγκρ. με εξίσωση (8)):

$$\frac{\log AS_i}{C_{AS(v_i, VB_i)}} + \frac{\log h_{s_i}}{C_{h_s(v_i, VB_i)}} + \frac{\log I_i}{C_{I(v_i, VB_i)}} = 1 \quad (23)$$

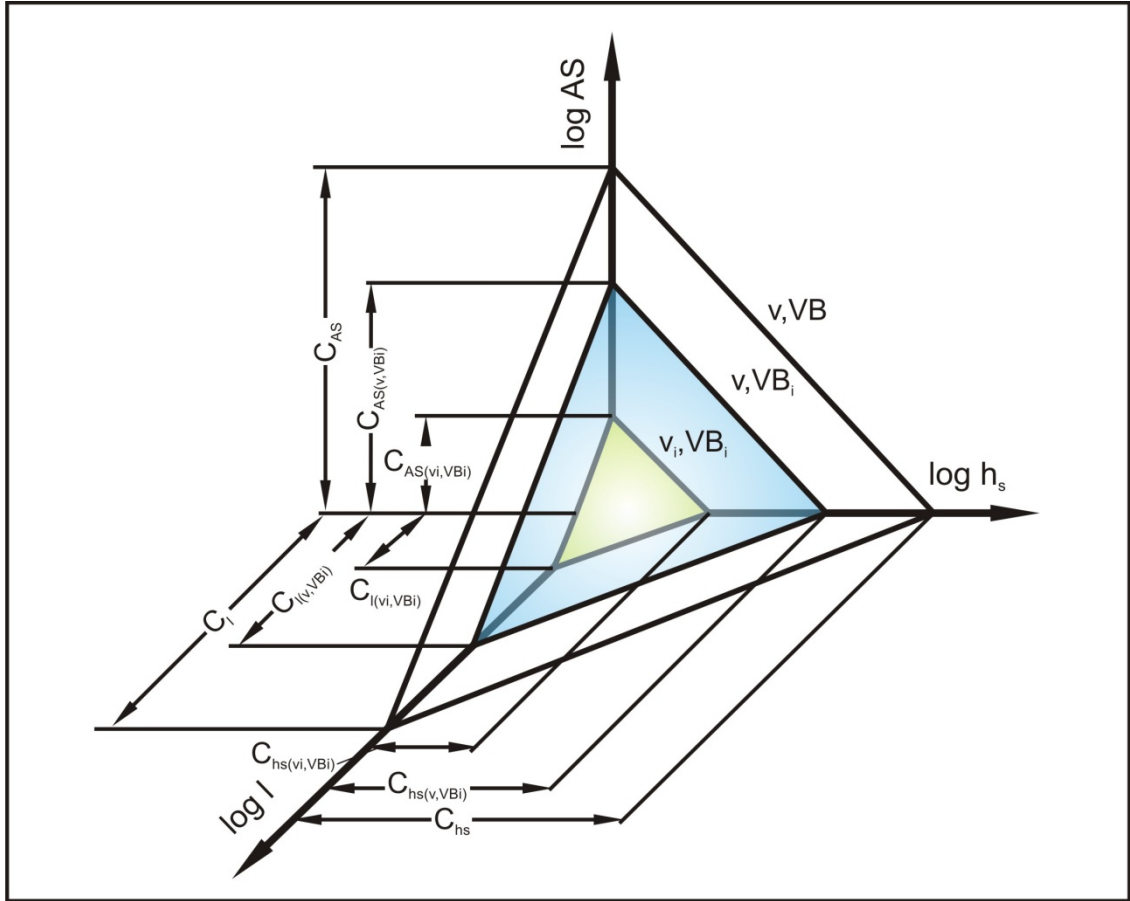
Το επίπεδο που περιγράφεται με τη σχέση αυτή είναι, όπως έχει αναφερθεί ήδη, παράλληλο σε ένα αντίστοιχο επίπεδο που αντιστοιχεί σε μια ταχύτητα κοπής αναφοράς v και μια τιμή φθοράς αναφοράς VB Σχήμα 2.18.

Ως εκ τούτου ισχύει:

$$\frac{C_{AS(v_i, VB_i)}}{C_{AS(v, VB_i)}} = \frac{C_{h_s(v_i, VB_i)}}{C_{h_s(v, VB_i)}} = \frac{C_{I(v_i, VB_i)}}{C_{I(v, VB_i)}} = f'_v \quad (24)$$

Ο παράγοντας f'_v υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (19) ως ακολούθως:

$$f'_v = \frac{-\log v_i}{C_V C_{AS(v, VB_i)}} + 1 + \frac{\log v}{C_V C_{AS(v_i, VB_i)}} \quad (25)$$



Σχήμα 2.18 Αριθμός κοπών για διαφορετικά πάχη και μήκη αποβλίπτων και για διαφορετικές ταχύτητες κοπής και τιμές φθοράς

Από το γεγονός ότι το επίπεδο που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κοπής v και στην τιμή πλάτους ζώνης φθοράς VB είναι παράλληλο στο αντίστοιχο επίπεδο για ταχύτητα κοπής αναφοράς v και τιμή φθοράς αναφοράς VB , ισχύει:

$$\frac{C_{AS(v,VB_i)}}{C_{AS}} = \frac{C_{h_s(v,VB_i)}}{C_{h_s}} = \frac{C_{I(v,VB_i)}}{C_I} = f_{VB} \quad (26)$$

Με πολλαπλασιασμό των εξισώσεων (29) και (31) προκύπτει:

$$\frac{C_{AS(v_i,VB_i)}}{C_{AS}} = \frac{C_{h_s(v_i,VB_i)}}{C_{h_s}} = \frac{C_{I(v_i,VB_i)}}{C_I} = f'_v f_{VB} \quad (27)$$

Αντικαθιστώντας τελικά την παραπάνω σχέση στη σχέση (28) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{\log AS_i}{C_{AS}} + \frac{\log h_{s_i}}{C_{h_s}} + \frac{\log I_i}{C_{I_i}} = f'_v f_{VB} = \frac{-\log v_i}{C_v C_{AS} \left(\frac{VB_i}{C_{AS} C_{VB}} + 1 - \frac{VB}{C_{VB} C_{AS}} \right)} + 1 + \\ \frac{\log v}{C_v C_{AS} \left(\frac{VB_i}{C_{AS} C_{VB}} + 1 - \frac{VB}{C_{VB} C_{AS}} \right)} \left(\frac{VB_i}{C_{AS} C_{VB}} + 1 - \frac{VB}{C_{VB} C_{AS}} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Μέσω της εξίσωσης αυτής συνδέονται με μαθηματικό τρόπο οι ακόλουθες παράμετροι:

- Αριθμός Κοπών AS
- Πάχος αποβλίπτου h_s
- Μήκος αποβλίπτου l
- Πλάτος ζώνης φθοράς VB μεταξύ 0,2 και 0,6 mm και
- Ταχύτητα κοπής v

όπως επίσης και οι αντίστοιχες σταθερές C_{AS} , C_{h_s} , C_l , C_{VB} , C_v

Όλες αυτές οι σταθερές για κάθε ομάδα αποβλίπτου προκύπτουν για ένα συνδυασμό υλικού κατεργασίας - υλικού κοπτικού εργαλείου και το συγκεκριμένο λάδι κοπής. Οι σταθερές C_{AS} , C_{h_s} και o , εξαρτώνται από μια ταχύτητα κοπής αναφοράς v και μια τιμή φθοράς αναφοράς VB . Η σταθερά C_{VB} εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα κοπής αναφοράς v . Η σταθερά C_v μπορεί να ληφθεί με ικανοποιητική ακρίβεια σταθερή για όλες τις τιμές του πλάτους ζώνης φθοράς μεταξύ 0,2 και 0,6 mm. Για τιμή πλάτους ζώνης φθοράς μικρότερης από 0,2 mm, ο αντίστοιχος αριθμός κοπών υπολογίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής ανάμεσα στην τιμή 0 και τον αριθμό κοπών που αντιστοιχεί για πλάτος ζώνης φθοράς ίσο με 0,2 mm.

Ισχύει λοιπόν:

$$VB_i = 0,2 \frac{AS_i}{AS_{0,2}} \quad (29)$$

Στο αναλυτικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια δίνονται οι πειραματικά προσδιορισμένες τιμές των σταθερών για διαφορετικές ομάδες αποβλήτων. Οι τιμές αυτές ισχύουν για το συγκεκριμένο συνδυασμό κατεργαζόμενου υλικού, υλικού κοπτικού εργαλείου, φραιζομηχανής και λαδιού κοπής, όπως αυτά αναγράφονται στο σχήμα. Η επίδραση της εργαλειομηχανής στις τιμές αυτές μπορεί να θεωρηθεί δευτερευούσης σημασίας. Το πλάτος ζώνης φθοράς λαμβάνεται ίσο με 0,6 mm και η ταχύτητα κοπής αναφοράς $v=30$ m/min. Για το δεδομένο συνδυασμό κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου υλικού δεν υπάρχει ουσιαστικά διαφορά στις τιμές των σταθερών για τις ομάδες αποβλήτων I και II. Οι τιμές των αντίστοιχων σταθερών αυτών των ομάδων αποβλήτων είναι ταυτόσημες. Η τιμή της σταθεράς C_v είναι σταθερή για όλες τις ομάδες αποβλίπτου.

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (28) και των τιμών των συντελεστών, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο αριθμός κοπών κατά το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων για απόβλιττα διαφορετικού πάχους και μήκους αποβλίπτου. Ο μέγιστος αριθμός κοπών για όλα τα μήκη και πάχη αποβλήτων επιτυγχάνεται για απόβλιττα της ομάδας 0. Η μείωση του αριθμού κοπών για κάθε ομάδα αποβλίπτου με αύξηση του μήκους αποβλίπτου (ή του πάχους αποβλίπτου) είναι διαφορετική. Η πιο έντονη μείωση του αριθμού κοπών προκύπτει για απόβλιττα των ομάδων I και II με αύξηση του μήκους ή του πάχους των αποβλήτων. Σε αυτές τις ομάδες αποβλίπτου εμφανίζεται εκτός τούτου και η εντονότερη αύξηση του πλάτους ζώνης φθοράς σε σχέση με τον αριθμό κοπών, όπως μπορεί να παρασταθεί σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα και όπως προκύπτει και από τις τιμές του συντελεστή C_{VB} .

Το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα "SIVEFR" το οποίο προσομοιώνει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου λαμβάνοντας υπόψη και την αξονική μετατόπιση της φραιζας ανά συγκεκριμένο αριθμό κοπών. Η αξονική μετατόπιση δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\varepsilon = \frac{m \pi z_1}{n_i \cos \gamma} \quad (30)$$

ενώ ο αριθμός κοπών ανά αξονική μετατόπιση δίνεται από τον τύπο:

$$n_s = \frac{z_2 n_a b}{S_a} \quad (31)$$

όπου ε : αξονική μετατόπιση [mm]

n_s : αριθμός κοπών ανά αξονική μετατόπιση

m_n : μέτρο οδόντωσης [mm]

z_1 : αριθμός κοπτικών αρχών της φραίζας

z_2 : αριθμός δοντιών του κατεργαζόμενου τροχού

n_i : αριθμός κοπτικών στηλών φραίζας

b : πλάτος οδοντοτροχού [mm]

γ : γωνία ελίκωσης του κατεργαζόμενου τροχού

S_a : αξονική πρόωση σε mm ανά περιστροφή του κατεργαζόμενου τροχού

2.12 Βελτιστοποίηση των συνθηκών εφαπτομενικής μετατόπισης

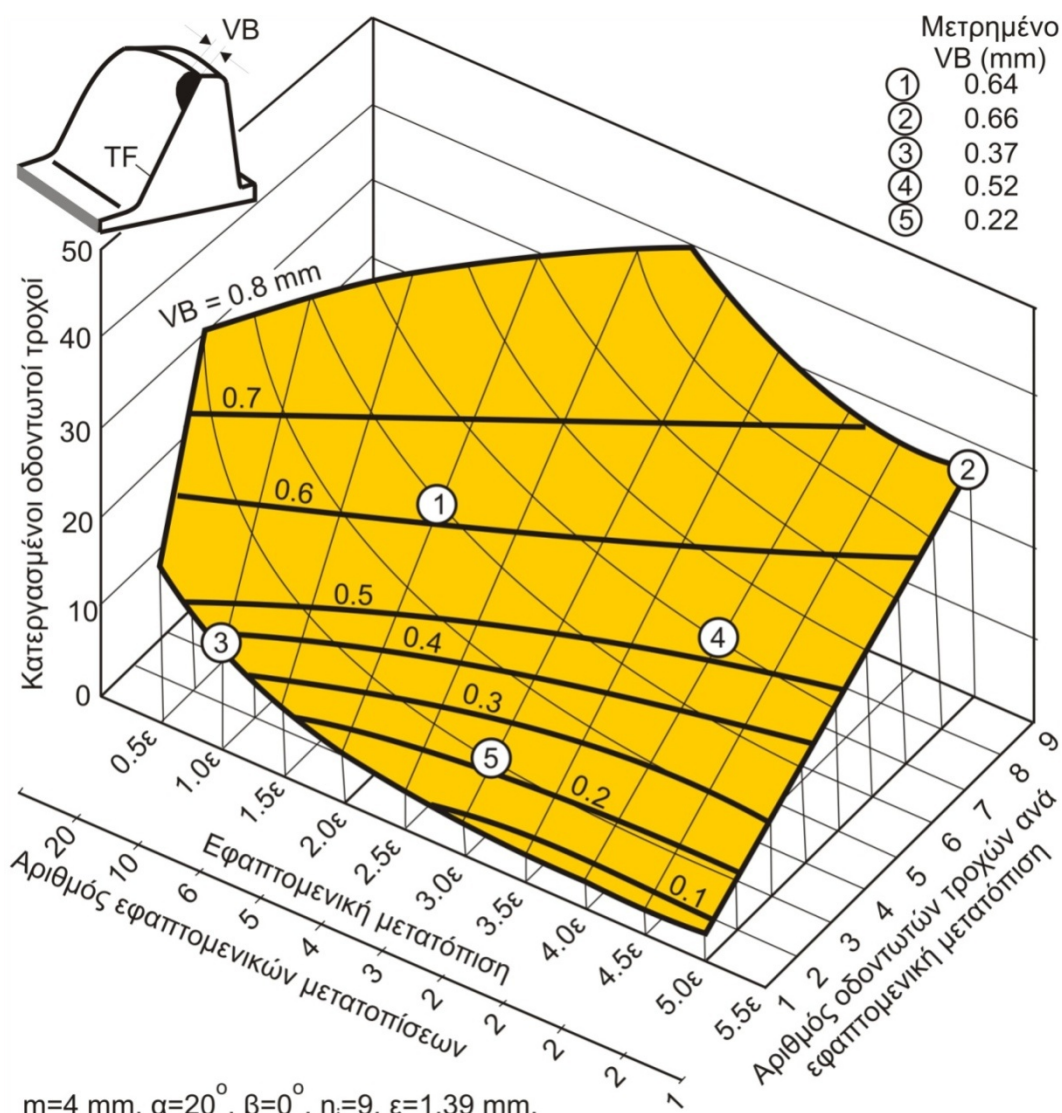
Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται τα γεωμετρικά και τα τεχνολογικά δεδομένα της κατεργασίας, με σκοπό να καθοριστεί η γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλήττου όπως επίσης και το πάχος, το μήκος και η ομάδα του αποβλήττου, για κάθε θέση κοπής όλων των θέσεων κύλισης.

Εξαιτίας της περιοχής εισόδου, η απαραίτητη αξονική μετατόπιση της φραίζας για την κατεργασία όλου του μήκους του αυλακίου, είναι πάντα μεγαλύτερη από το πλάτος του οδοντωτού τροχού. Εάν η γεωμετρία του οδοντωτού τροχού σε συνάρτηση με την υπάρχουσα εργαλειομηχανή, επιτρέπει ώστε δύο ή περισσότεροι οδοντωτοί τροχοί να κατεργαστούν μαζί, όλα τα δεδομένα παραμένουν σταθερά εκτός από τον αριθμό των θέσεων κοπής στην περιοχή πλήρους βάθους κοπής.

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης υπολογίζεται για κάθε θέση κύλισης, με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων των ισοδύναμων μεγεθών, η πορεία της φθοράς σε σχέση με τον αριθμό των κατεργαζόμενων οδοντωτών τροχών, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης. Ο υπολογισμένος αριθμός κατεργαζόμενων οδοντωτών τροχών και το πλάτος της παρατηρούμενης ζώνης φθοράς που παρατηρείται, για διάφορες συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19.

Η εφαπτομενική μετατόπιση εκφράζεται σαν πολλαπλάσιο του αξονικού βήματος ε της φραίζας. Με σκοπό την επαλήθευση των υπολογισμένων τιμών φθοράς της κοπτικής φραίζας, διεξήχθη κατάλληλος αριθμός πειραμάτων φθοράς με διάφορες συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, επιβεβαιώνουν την ακρίβεια της υπολογιστικής διαδικασίας που αναπτύχθηκε.

Οι καμπύλες ίσης φθοράς αντιστοιχούν σε σχεδόν ίσους αριθμούς κατεργαζόμενων οδοντωτών τροχών ανά θέση εφαπτομενικής μετατόπισης. Το γεγονός αυτό μπορεί να ερμηνευτεί λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά την κατεργασία οδοντωτών τροχών σε πακέτα, ο συνολικός αριθμός θέσεων κοπής ανά οδοντωτό τροχό ελαττώνεται, όμως ο αριθμός αποβλήτων πλήρους βάθους κοπής αυξάνεται.



$m=4 \text{ mm}$, $\alpha=20^\circ$, $\beta=0^\circ$, $\eta_i=9$, $\varepsilon=1.39 \text{ mm}$,
 $z_1/z_2=1/23$, $d_{a1}=80 \text{ mm}$, $b=25 \text{ mm}$, $s_a=2 \text{ mm/rev}$, $v=20 \text{ m/min}$,
 42CrMo4 V, $R_m = 920 \text{ N/mm}^2$, S6-5-2-5, αντίρροπο, παρειά εξόδου

Σχήμα 2.19 Εξέλιξη της φθοράς για διάφορες συνθήκες επαπτομενικής μετατόπισης

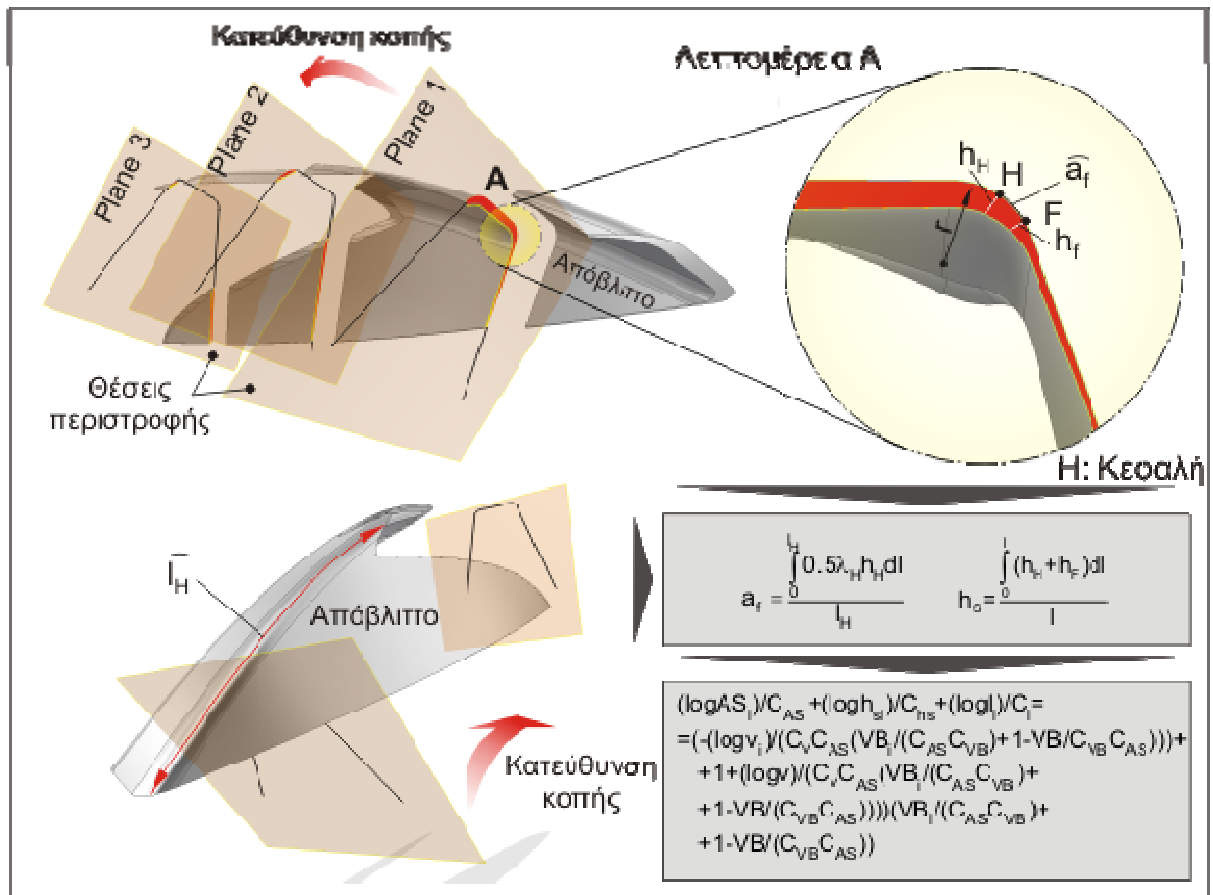
Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα σχέση και ότι κατά την κατεργασία οδοντωτών τροχών σε πακέτα, ο χρόνος κατεργασίας ανά κατεργαζόμενο οδοντωτό τροχό ελαττώνεται, η βέλτιστη τιμή των επαπτομενικών μετατοπίσεων είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη από την γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού και την εργαλειομηχανή. Για τέτοιες τιμές, χρησιμοποιώντας διαγράμματα όπως αυτά που δείχνονται στο σχήμα 2.19, μπορεί να καθοριστεί η επαπτομενική μετατόπιση η οποία θα αντιστοιχεί σε μια προδιαγεγραμμένη μέγιστη τιμή φθορά.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΙΤΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η νέα μεθοδολογία στερεού υπολογισμού των τρισδιάστατων στερεών αποβλίττων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Η μέθοδος αυτή δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα, ενώ απαιτεί χαμηλότερη επεξεργαστική ισχύ.

3.1 Υπολογισμός ισοδύναμου μήκους του στερεού αποβλίττου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 ο υπολογισμός του ισοδύναμου μήκους του αποβλίττου γίνεται πάνω στο τρισδιάστατο απόβλιττο μέσω του CAD συστήματος Inventor της Autodesk. Μεγάλο πλεονέκτημα για την εξοικονόμηση επεξεργαστικής ισχύος αποτελεί η χρήση παραμετρικού σχεδιασμού που προσφέρει το εν λόγω πακέτο. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα.



Σχήμα 3.1: Προσδιορισμός ισοδύναμου πάχους και μήκους

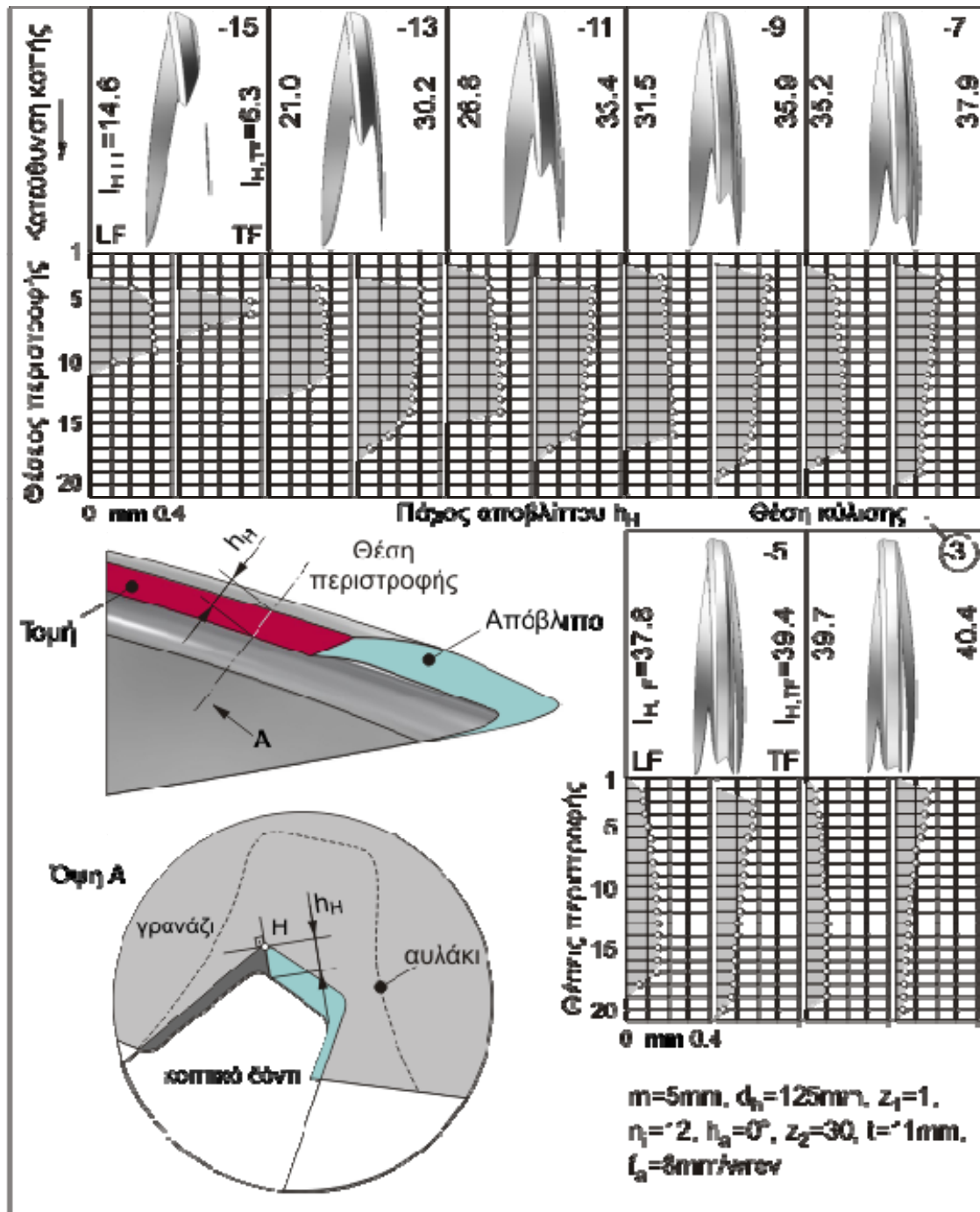
Σε πρώτη φάση επιλέγεται τυχαία μια απόσταση a_f από το κέντρο της κεφαλής της κατατομής. Ως κέντρο της κεφαλής λαμβάνεται η μέση του κυκλικού τόξου. Η απόσταση αυτή ορίζεται αυτόματα ως παράμετρος. Έτσι δημιουργείται η διατομή που φαίνεται στο πάνω δεξιό σχήμα του σχήματος 3.1. Η διατομή αποτελείται από τις πλευρές που ορίζουν το πάχος του αποβλίττου στην κεφαλή h_h , το πάχος του αποβλίττου σε απόσταση a_f το οποίο ορίζεται ως h_f , το μήκος του τόξου a_f καθώς και το τόξο του κάτω μέρους.

Η διατομή αυτή προεκτείνεται με την εντολή loft του Inventor ώστε να ακολουθήσει την καμπυλότητα του αποβλίττου. Στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται η λειτουργία της λογικής επικάλυψης των στερεών μοντέλων (intersection). Κατά τη λειτουργία αυτή η παραπάνω διατομή κινούμενη στο χώρο σαρώνει έναν όγκο, ο οποίος και αφαιρείται από το αρχικό

στερεό. Από τον όγκο αυτό η πάνω πλευρά που δημιουργήθηκε από τη σάρωση της πλευράς h_h αποτελεί το μήκος του αποβλήτου στην κεφαλή l_h .

3.2 Υπολογισμός ισοδύναμου πάχους του στερεού απόβλιτου

Ο υπολογισμός του ισοδύναμου πάχους αποτελεί συνέχεια της παραπάνω διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα τα επίπεδα τα οποία ορίζονται από τον χρήστη τέμνουν τον όγκο που προήλθε από τη λογική επικάλυψη στερεών (intersection) δίνοντας ως αποτέλεσμα ισόποσες διατομές. Μια τέτοια διατομή φαίνεται στο πάνω δεξιό τμήμα του σχήματος 3.1. Από τις διατομές αυτές μπορεί να εξαχθεί απευθείας το μήκος του αποβλήτου στην κεφαλή σε κάθε επίπεδο.



Σχήμα 3.2 Υπολογισμός ισοδύναμου πάχους και μήκους

Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας για το πάχος που σαρώνει η κεφαλή τόσο στην παρειά εισόδου (Leading Flank LF) τόσο και στην παρειά εξόδου (Trailing Flank TF). Έχοντας λοιπόν τόσο τα πάχη στην κεφαλή σε κάθε θέση κύλισης και θέση περιστροφής καθώς και το μήκος του αποβλίπτου το οποίο σαρώνεται από την κεφαλή μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική απόσταση a_f από τον τύπο που φαίνεται κάτω αριστερά στο σχήμα 3.1.

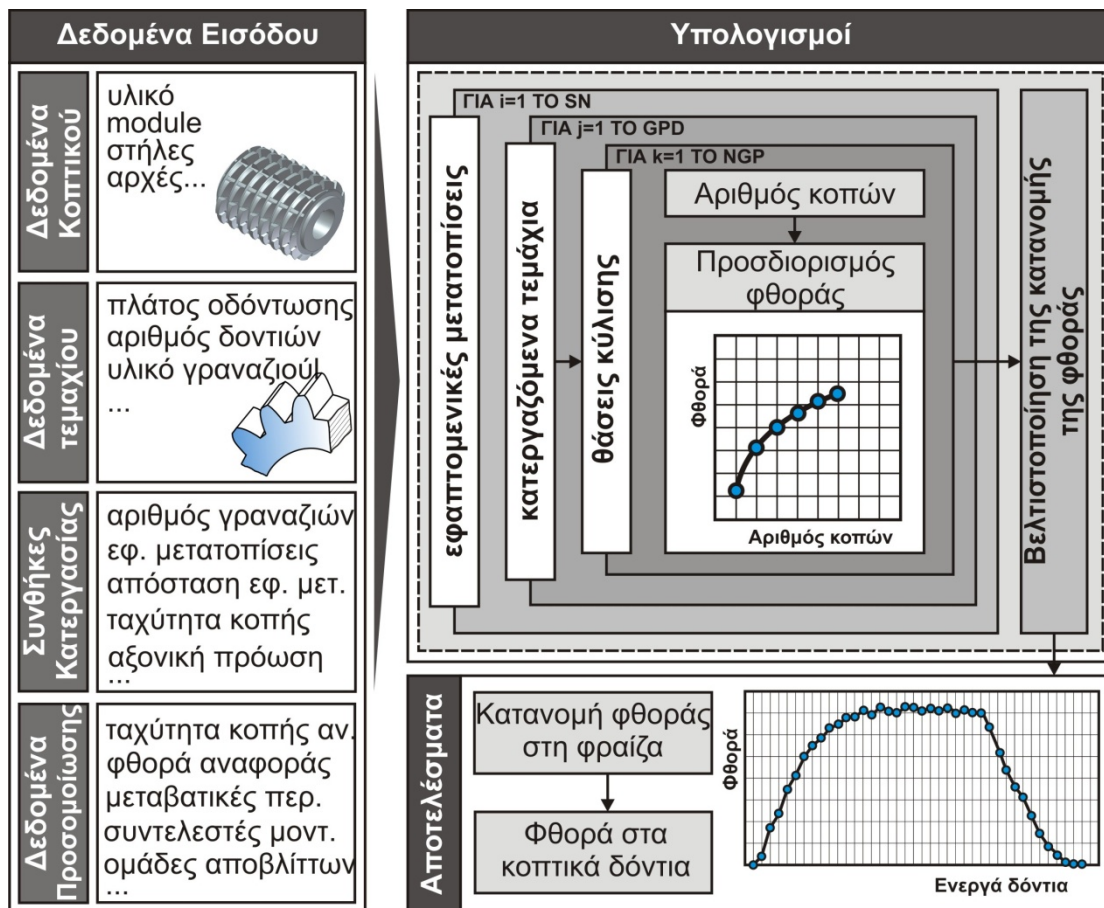
Στη συνέχεια η τιμή του a_f που θα προκύψει για κάθε θέση κύλισης αντικαθίσταται αυτόματα αφού έγινε χρήση παραμετρικού σχεδιασμού σε όλα τα απόβλιττα και οι διατομές επαναπροσδιορίζονται σε λιγοστό χρόνο. Η δεξιά πλευρά των αποβλίπτων (πλευρά h_f) που θα προκύψουν μετά την αυτόματη ανανέωση, αντιστοιχεί στο πάχος του αποβλίπτου σε απόσταση a_f από την κεφαλή για κάθε θέση κύλισης και θέση περιστροφής. Τέλος το ολικό μήκος του αποβλίπτου μπορεί να βρεθεί εύκολα με μια απλή μέτρηση του μέγιστου μήκους σε περιβάλλον CAD.

Έχοντας λοιπόν όλα τα απαραίτητα δεδομένα μπορεί να υπολογισθεί το ισοδύναμο πάχος αντικαθιστώντας στην εξίσωση του σχήματος 3.1. Οι εξισώσεις αυτές παρουσιάστηκαν στο [8].

Στο κάτω αριστερό μέρος του σχήματος 3.2 φαίνονται οι αναγκαίες τομές που χρησιμοποιούνται για την παραπάνω διαδικασία. Η εγκάρσια τομή (γαλάζια) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους ενώ η διαμήκης (κόκκινη) για τον υπολογισμό του ισοδύναμου μήκους. Οι τομές αυτές φαίνονται και εποπτικά στην κάτω όψη.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ HOBWEAR

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του προγράμματος υπολογισμού της φθοράς όπως αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Λόγω της πολυπλοκότητας της κατεργασίας το πλήθος των δεδομένων που απαιτείται να εισαχθούν από τον χρήστη είναι μεγάλο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η κατασκευή ενός εύχρηστου περιβάλλοντος για την εισαγωγή των δεδομένων. Το λογικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Λογικό διάγραμμα του προγράμματος που αναπτύχθηκε

Πολλά από τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος προέρχονται από την προσομοίωση της κατεργασίας σε περιβάλλον CAD μέσω του προγράμματος HOB3D. Το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνει την κινηματική της κατεργασίας και εξάγει τα τρισδιάστατα απόβλιπτα που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της φθοράς. Στη συνέχεια γίνεται περαιτέρω επεξεργασία τους ώστε να εξαχθούν οι απαραίτητες τομές και τα ισοδύναμα μεγέθη με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα HOB3D δεν έχει μέχρι στιγμής την δυνατότητα αυτόματου προσδιορισμού της ομάδας των αποβλίπτων. Έτσι για την εξαγωγή των δεδομένων των ομάδων των αποβλίπτων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα FRS.

Έτσι λοιπόν το πρόγραμμα HOBWEAR λαμβάνει σαν είσοδο ένα αρχείο το οποίο συγκεντρώνει τις ομάδες των αποβλίπτων και τα ισοδύναμα μήκη και πάχη για όλες τις θέσεις κύλισης. Τα υπόλοιπα δεδομένα της κατεργασίας δίνονται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος που αναπτύχθηκε.

Η εισαγωγή των δεδομένων χωρίζεται σε υποκατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές αναφέρονται στα δεδομένα που αφορούν τον κατεργαζόμενο οδοντωτό τροχό, τα δεδομένα της

προσομοίωσης και τα δεδομένα της κατεργασίας. Τα γεωμετρικά δεδομένα καθώς και τα δεδομένα της κατεργασίας έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναλυθούν εκτενέστερα τα δεδομένα που αφορούν την εφαπτομενική μετατόπιση.

Σε πραγματικές συνθήκες η εφαπτομενική μετατόπιση λαμβάνει χώρα μόνο όταν έχει κατεργασθεί ολόκληρο το πλάτος της οδόντωσης για συγκεκριμένο βάθος κοπής. Έτσι λοιπόν πριν λάβει χώρα μια κατεργασία κοπής οδοντώσεων πρέπει να απαντηθούν τα εξής ερωτήματα.

- Πόσες εφαπτομενικές μετατοπίσεις θα λάβουν χώρα;
- Ποιο θα είναι το ποσό της εφαπτομενικής μετατόπισης;
- Αν πόσα γρανάζια θα λάβει χώρα εφαπτομενική μετατόπιση;

Τα παραπάνω μεγέθη λοιπόν εκφράζονται μέσω των μεταβλητών SN, TDS και GPD. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το ποσό της εφαπτομενικής μετατόπισης εκφράζεται ως πολλαπλάσιο του αξονικού βήματος e της κοπτικής φραιζας όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα του δεύτερου κεφαλαίου.

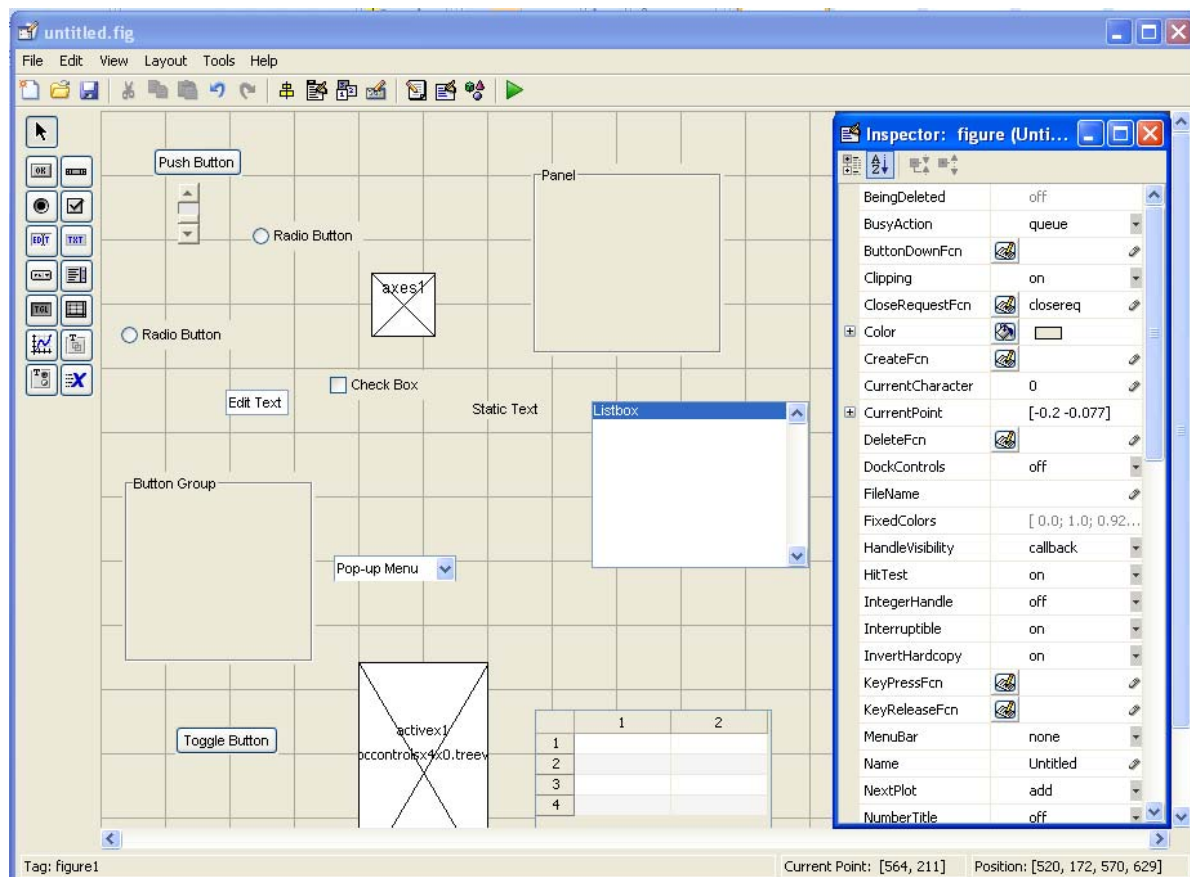
Οι υπολογισμοί που γίνονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της φθοράς σε όλα τα δόντια σε συνάρτηση του αριθμού κοπών. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση τριών επαναληπτικών δομών για όλες τις εφαπτομενικές μετατοπίσεις, για όλα τα κατεργαζόμενα τεμάχια και για όλες τις θέσεις κοπής και εξάγονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στη συνέχεια κρατώντας σταθερό τον αριθμό κοπών εξάγονται τα διαγράμματα εξέλιξης της φθοράς για κάθε εφαπτομενική μετατόπιση για όλα τα δόντια. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η εξέλιξη της κατανομής της φθοράς σε όλα τα κοπτικά δόντια και να διαλέξουμε το βέλτιστο ποσό και αριθμό εφαπτομενικών μετατοπίσεων.

4.1 Το περιβάλλον GUIDE της MATLAB

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται εν συντομία τα κύρια λειτουργικά γραφικά στοιχεία που το GUIDE παρέχει στον σχεδιαστή της περιβάλλοντος. Δίνεται κυρίως βάση στη λειτουργικότητα του κάθε στοιχείου, ώστε ο αναγνώστης να μπορέσει να εξοικειωθεί με τις δυνατότητες του περιβάλλοντος και να αξιολογήσει τις επιλογές που έγιναν κατά την ανάπτυξη των προγραμμάτων.

Για το σχεδιασμό ενός διαδραστικού περιβάλλοντος χρήστη επιλέξαμε το περιβάλλον GUIDE της MATLAB. Το εργαλείο αυτό τηρεί όλες τις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού αλλά έχει πολύ περιορισμένες δυνατότητες εισαγωγής γραφικών στοιχείων και διαχείρισης πολλαπλών γραφικών περιβαλλόντων, ενώ ο προγραμματισμός του είναι αρκετά πολύπλοκος και χρονοβόρος. Βασικό πλεονέκτημα όμως αποτελεί η εύκολη εισαγωγή και διαχείριση διάφορων εργαλείων και συναρτήσεων της MATLAB. Τα εργαλεία αυτά περιλαμβάνονται στο MCR (Matlab Component Runtime) το οποίο είναι απαραίτητο για να λειτουργήσει και το τελικό εκτελέσιμο αρχείο σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι οποίοι δεν διαθέτουν εξυπηρετητή MATLAB.

Ανοίγοντας το εργαλείο αυτό της MATLAB βλέπουμε μια κενή φόρμα. Στη φόρμα αυτή θα τοποθετηθούν όλα τα επιθυμητά στοιχεία, τα οποία αποτελούν διαμεσολαβητές χρήστη και κώδικα. Μπορούν λοιπόν να προστεθούν στοιχεία όπως άξονες γραφημάτων (axes), πλαίσια (panel), στατικό κείμενο (static text), επεξεργάσιμο κείμενο (edit text), κυλίστρες (sliders), πλήκτρα (push buttons), πλήκτρα εναλλαγής (toggle buttons), πλήκτρα επιλογής (radio buttons), πλήκτρα επιλογής κατάστασης (check boxes), μενού πολλαπλών επιλογών (popup menu), λίστα πολλαπλών επιλογών (list box). Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται πάνω αριστερά το παράθυρο επιλογής των διαφόρων στοιχείων που είναι διαθέσιμα σε ένα υπολογιστικό σύστημα.



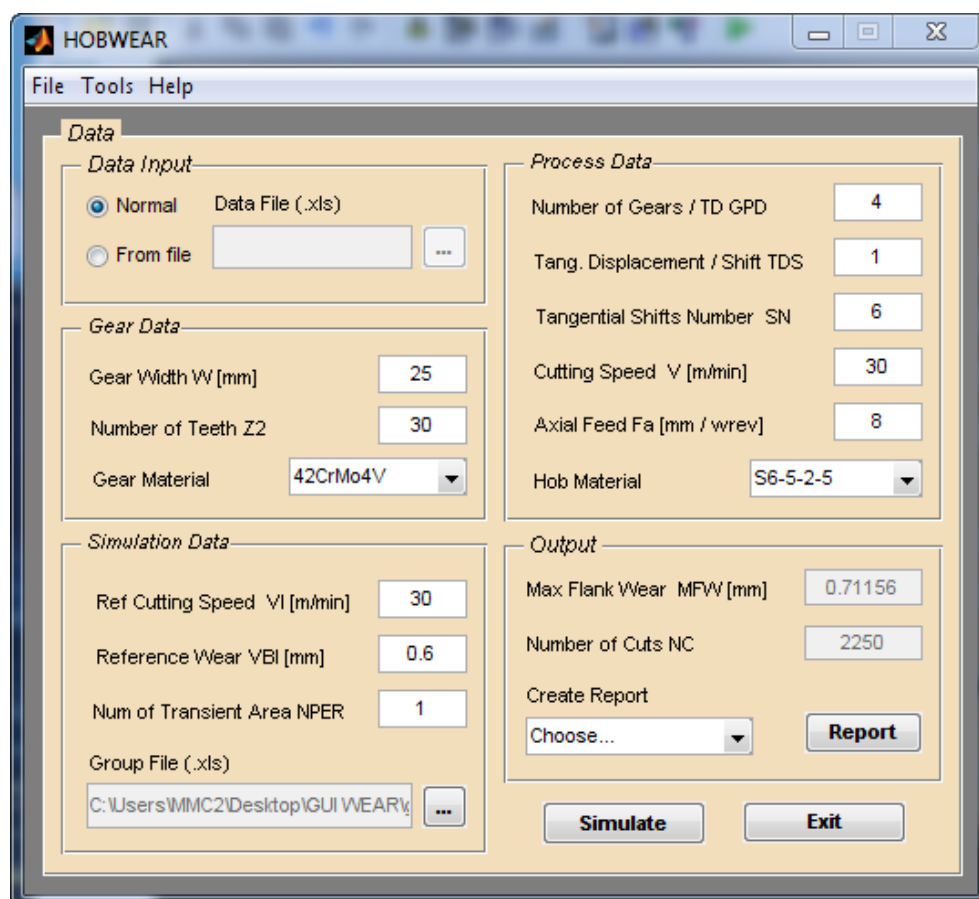
Σχήμα 4.2 Γραφικό περιβάλλον GUIDE

Στους άξονες γραφημάτων μπορεί να προβληθούν γραφήματα διαφόρων συναρτήσεων και εικόνες. Τα πλαίσια δίνουν τη δυνατότητα ομαδοποίησης των διάφορων στοιχείων. Το στατικό κείμενο χρησιμοποιείται συνήθως για την επεξήγηση εισαγωγής δεδομένων από κάποιο επεξεργάσιμο κουτί ή από κάποιο μενού ή λίστα πολλαπλών επιλογών. Η κυλιόμενη μπάρα, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να μεταβάλλει ένα μέγεθος από μια χαμηλή σε μια υψηλή τιμή. Χρησιμοποιείται όταν δεν έχει σημασία ο χρήστης να γνωρίζει την ακριβή τιμή που μεταβάλλει. Για την επιλογή μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κουμπιών εναλλαγής, κουμπιών επιλογής καθώς και κουμπιών επιλογής κατάστασης. Επίσης υπάρχει δυνατότητα χρήσης μενού και λιστών πολλαπλών επιλογών. Το στοιχείο το οποίο εκπυρσοκροτεί την εκτέλεση του προγράμματος συνήθως είναι το κουμπί πίεσης.

Τέλος ένα ιδιαίτερο στοιχείο που έχει ο χρήστης στη διάθεση του είναι τα Active-X controls. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ενσωματώσει στην εφαρμογή του διάφορα συστατικά στοιχεία (components) τα οποία του δίνουν τη δυνατότητα για παράδειγμα να αναπαράγει πολυμέσα ή να ενσωματώσει κάποιο ημερολόγιο κλπ.

4.2 Σχεδιασμός του γραφικού περιβάλλοντος κατά ISO 13407

Ο σχεδιασμός του προγράμματος ακολούθησε την χρηστο-κεντρική φιλοσοφία κατά ISO 13407, ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο εργονομικό. Κατά τη φιλοσοφία αυτή, οι μελλοντικοί χρήστες του συστήματος, τα καθήκοντα και το περιβάλλον χρήσης τίθενται στο κέντρο του ενδιαφέροντος και καθοδηγούν τις σχεδιαστικές επιλογές. Η φόρμα που αναπτύχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

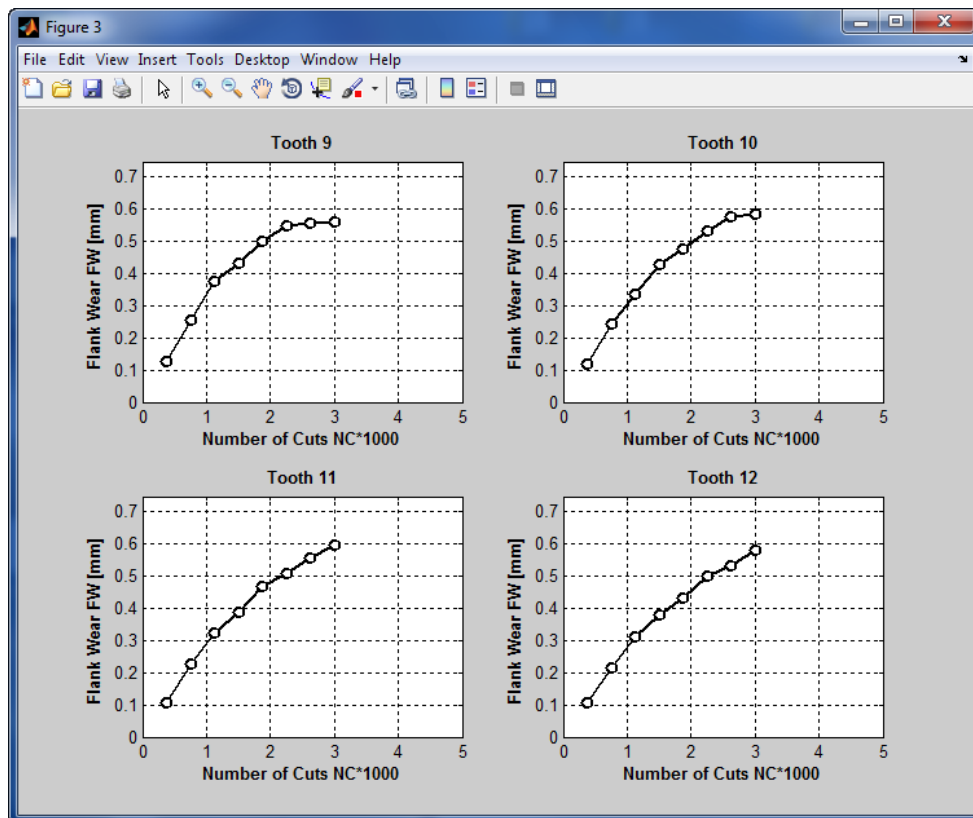


Σχήμα 4.3 Κύριο παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων

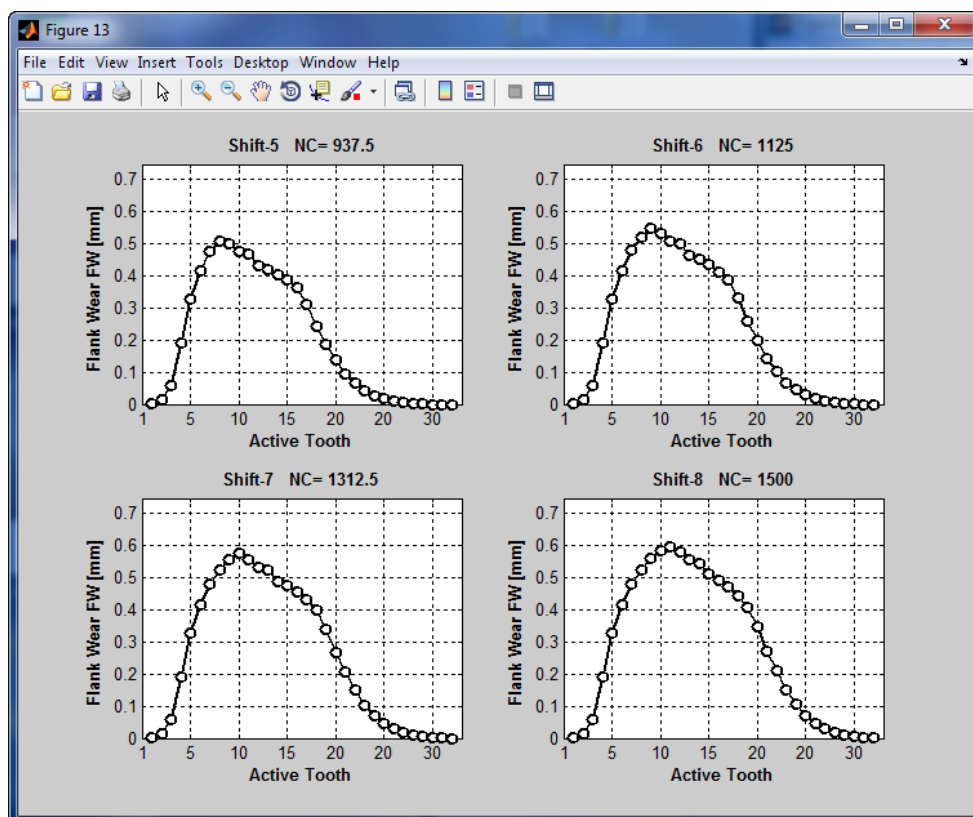
Βασικό στοιχείο είναι η εκτενής ανάλυση των καθηκόντων των χρηστών καθώς και του τρόπου που αυτοί τα εκτελούν. Επιπλέον ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι ο “από έξω προς τα μέσα σχεδιασμός” του προγράμματος, δηλαδή ο σχεδιασμός του τρόπου με τον οποίο οι χρήστες εκτελούν τις εργασίες τους σε επίπεδο διαμεσολαβητή χρήστη – λογισμικού και των σχετικών οθόνων πριν απ’ την ανάπτυξη του κώδικα του προγράμματος. Επίσης ακολουθήθηκαν τα εργονομικά κριτήρια που προβλέπονται για την ανάπτυξη διαμεσολαβητών ανθρώπου – ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το περιβάλλον που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα υποβολής των δεδομένων τόσο απευθείας μέσω της παραπάνω φόρμας αλλά και από αρχείο τύπου Excel. Αυτό διασφαλίζει την φορητότητα των δεδομένων προσομοίωσης σε περίπτωση που τρέχουν παραπάνω από μία προσομοιώσεις σε διαφορετικούς υπολογιστές.

Επίσης στο σύστημα έχει ενσωματωθεί ένα αυτόματο σύστημα δημιουργίας αναφορών (report generator). Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να εξάγει αναφορές που περιέχουν τόσο τα αποτελέσματα όσο και τα δεδομένα που προέρχονται από κάθε εκτέλεση του προγράμματος. Οι τύποι αρχείων που μπορούν να εξαχθούν περιλαμβάνουν αρχεία τύπου .pdf, .doc, .rtf καθώς και σε html μορφή. Η τελευταία μορφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημοσίευση των αποτελεσμάτων στο διαδίκτυο. Το [Σχήμα 4.4](#) και το [Σχήμα 4.5](#) παρουσιάζουν την έξοδο των γραφημάτων του προγράμματος.



Σχήμα 4.4 Εξέλιξη της φθοράς για κάθε κοπτικό δόντι



Σχήμα 4.5 Εξέλιξη της φθοράς όλων των δοντιών για σταθερό αριθμό κοπών και για κάθε επαπτομενική μετατόπιση.

4.3 Προγραμματισμός του γραφικού περιβάλλοντος

Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του γραφικού περιβάλλοντος σειρά έχει ο προγραμματισμός του. Κάθε στοιχείο από τα παραπάνω έχει ιδιότητες που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα, αλλά και την εμφάνισή του. Οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να μεταβληθούν είτε χειροκίνητα μέσω του Property Inspector σε περίπτωση που αυτές είναι στατικές, δηλαδή δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος, είτε προγραμματιστικά.

Το γραφικό περιβάλλον σε MATLAB αποτελείται από δύο κυρίως αρχεία. Το πρώτο αρχείο .fig περιλαμβάνει τη σχεδίαση των επιμέρους στοιχείων, ενώ το δεύτερο .m περιλαμβάνει τον προγραμματισμό των στοιχείων ώστε να επιτελούν τον σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκαν. Κάθε φορά που προσθέτουμε ένα στοιχείο στη φόρμα, προστίθεται αυτόματα και μια συνάρτηση στο M-file. Η συνάρτηση αυτή στην ουσία αρχικοποιεί το συγκεκριμένο στοιχείο ώστε να είναι σε θέση να προγραμματιστεί. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται Callbacks.

Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του περιβάλλοντος και ο προγραμματισμός του η εφαρμογή είναι έτοιμη να μεταγλωττιστεί (compile). Έτσι επιλέγουμε τον κατάλληλο compiler μέσα από το περιβάλλον εντολών της MATLAB, ο οποίος μεταγλωττίζει αρχικά τον πηγαίο κώδικα MATLAB σε C και στη συνέχεια παράγει το εκτελέσιμο αρχείο του προγράμματος (.exe) καθώς και ένα ακόμα αρχείο το οποίο περιέχει όλα τα υπόλοιπα αρχεία και συναρτήσεις τα οποία είναι απαραίτητα για να λειτουργήσει το πρόγραμμα. Όλα τα παραπάνω αρχεία μπορούν να πακεταριστούν με τη διαδικασία του (packaging) για διανομή σε άλλους υπολογιστές. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο εξής. Αν η εφαρμογή μας κάνει χρήση ειδικών συναρτήσεων και εργαλειαθικών του MATLAB τότε πρέπει να συμπεριληφθεί στο πακέτο και το Matlab Component Runtime προκειμένου να είναι εκτελέσιμη σε άλλους υπολογιστές οι οποίοι δεν διαθέτουν MATLAB. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για τη χρήση του πακέτου γραφικών παραστάσεων.

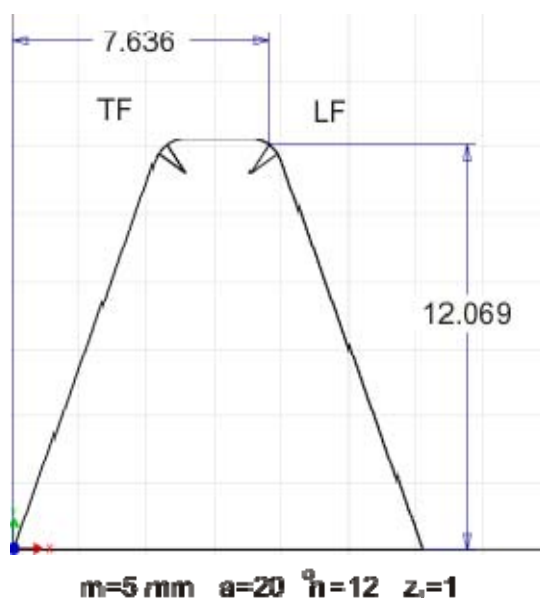
5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ

Η προσομοίωση της κατεργασίας μέσω του προγράμματος HOB3D μας δίνει τα τρισδιάστατα απόβλιντα, καθώς και τις τομές των αποβλίντων σε διαδοχικά επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά λαμβάνονται διαδοχικά παίρνοντας υπόψη την τροχιά του κοπτικού δοντιού.

5.1 Υπολογισμός των ισοδύναμων μεγεθών

Το πρώτο βήμα για την εξαγωγή των ισοδύναμων μεγεθών είναι ο προσδιορισμός του σημείου της κεφαλής σε κάθε παρειά. Στο περιβάλλον του Autodesk Inventor εισάγουμε την κατατομή η οποία σχεδιάζεται σύμφωνα με το DIN 3972 και ανάλογα με τα δεδομένα της κατεργασίας.

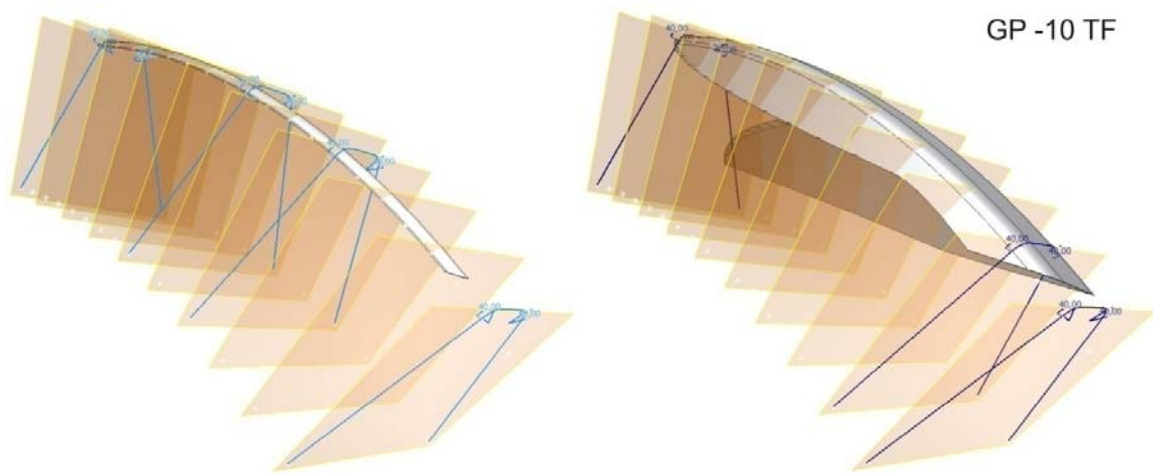
Στη συνέχεια παίρνουμε το κέντρο του κυκλικού τόξου ως το κέντρο της κεφαλής σε κάθε παρειά και εξάγουμε τις συντεταγμένες των δύο σημείων. Τέλος μέσω αναζήτησης στα αρχεία των διατομών του αποβλίντου βρίσκουμε το πάχος στη κεφαλή σε κάθε παρειά και σε κάθε θέση κύλισης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι συντεταγμένες της κεφαλής παρειάς εισόδου (Leading Flank) είναι $X=7.636$ mm και $Y=12.069$ mm ενώ οι αντίστοιχες συντεταγμένες στην παρειά εξόδου (Trailing Flank) είναι $X=4.585$ mm και $Y=12.069$ mm.



Σχήμα 5.1 Κατασκευή διατομής αναφοράς

Επίσης παίρνουμε ένα τυχαίο τόξο πάνω στο ημικύκλιο ξεκινώντας από το κέντρο της κεφαλής, στο οποίο αναπαριστά την απόσταση a_f την οποία θα υπολογίσουμε στη συνέχεια. Κατασκευάζουμε τη διατομή που φαίνεται και στο Σχήμα 5.1 κλείνοντας τη γεωμετρία που σχηματίστηκε. Η ίδια διαδικασία γίνεται και για τις δύο παρειές.

Στη συνέχεια οι διατομές αυτές αντιγράφονται μαζί με την κατατομή σε κάθε επίπεδο σε κάθε θέση περιστροφής. Αφού γίνει επιλογή των διατομών που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη παρειά και με τη βοήθεια της επιλογής loft σε λειτουργία intersection εξάγουμε το απόβλιντο που συμπιέζεται πάνω στη κατατομή. Το απόβλιντο αυτό δεν είναι σωστό αφού η απόσταση a_f στην οποία παρατηρείται και η μέγιστη φθορά δεν έχει ακόμα ορισθεί. Παρόλα αυτά η αριστερή πλευρά του αποβλίντου αντιστοιχεί στο πραγματικό μήκος που συμπιέζεται στο κέντρο της κεφαλής. Έχοντας αυτά τα μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η απόσταση a_f για κάθε θέση κύλισης. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



$m=5 \text{ mm}$ $a=20$ $\beta=0$ $\eta_1=12$ $z_1=1$ $z_2=30$ $f_a=8 \text{ mm/wrev}$

Σχήμα 5.2 Εξαγωγή του αποβλίπτου αναφοράς

Αφού αντικατασταθεί η πραγματική απόσταση a_f στο μενού των παραμέτρων το μοντέλο αναδημιουργείται αυτόματα (regeneration). Τα απόβλιπτα που προκύπτουν αντιστοιχούν στα πραγματικά απόβλιπτα που συμπίεζονται πάνω στην κατατομή. Το [Σχήμα 5.3](#) παρουσιάζει τα υπολογισμένα ισοδύναμα μεγέθη για όλα τα απόβλιπτα της παρείά εξόδου.

Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -16 TF	Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -11 TF
$a_f= 0.131$		$a_f= 0.223$	
$h_s= 0.157$		$h_s= 0.427$	
$I_H= 27.641$		$I_H= 33.446$	
Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -15 TF	Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -10 TF
$a_f= 0.206$		$a_f= 0.215$	
$h_s= 0.367$		$h_s= 0.404$	
$I_H= 37.012$		$I_H= 34.701$	
Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -14 TF	Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -9 TF
$a_f= 0.131$		$a_f= 0.211$	
$h_s= 0.157$		$h_s= 0.391$	
$I_H= 27.641$		$I_H= 35.901$	
Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -13 TF	Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -8 TF
$a_f= 0.220$		$a_f= 0.206$	
$h_s= 0.406$		$h_s= 0.367$	
$I_H= 30.279$		$I_H= 37.012$	
Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -12 TF	Ισοδύναμα μεγέθη (mm)	Θέση κύλισης -7 TF
$a_f= 0.234$		$a_f= 0.192$	
$h_s= 0.421$		$h_s= 0.352$	
$I_H= 32.002$		$I_H= 37.907$	

Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.180$ $h_s = 0.325$ $l_H = 38.758$	Θέση κύλισης -6 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.047$ $h_s = 0.086$ $l_H = 19.542$	Θέση κύλισης 2 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.163$ $h_s = 0.296$ $l_H = 39.434$	Θέση κύλισης -5 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.042$ $h_s = 0.075$ $l_H = 13.641$	Θέση κύλισης 3 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.146$ $h_s = 0.265$ $l_H = 40.011$	Θέση κύλισης -4 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.042$ $h_s = 0.072$ $l_H = 10.854$	Θέση κύλισης 4 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.124$ $h_s = 0.233$ $l_H = 40.415$	Θέση κύλισης -3 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.042$ $h_s = 0.069$ $l_H = 7.514$	Θέση κύλισης 5 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.110$ $h_s = 0.120$ $l_H = 40.728$	Θέση κύλισης -2 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.046$ $h_s = 0.076$ $l_H = 5.553$	Θέση κύλισης 6 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.091$ $h_s = 0.157$ $l_H = 32.880$	Θέση κύλισης -1 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.036$ $h_s = 0.044$ $l_H = 3.628$	Θέση κύλισης 7 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.078$ $h_s = 0.118$ $l_H = 38.813$	Θέση κύλισης 0 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.029$ $h_s = 0.046$ $l_H = 2.141$	Θέση κύλισης 8 TF 
Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.054$ $h_s = 0.099$ $l_H = 20.012$	Θέση κύλισης 1 TF 	Ισοδύναμα μεγέθη (mm) $a_i = 0.035$ $h_s = 0.038$ $l_H = 1.851$	Θέση κύλισης 9 TF 

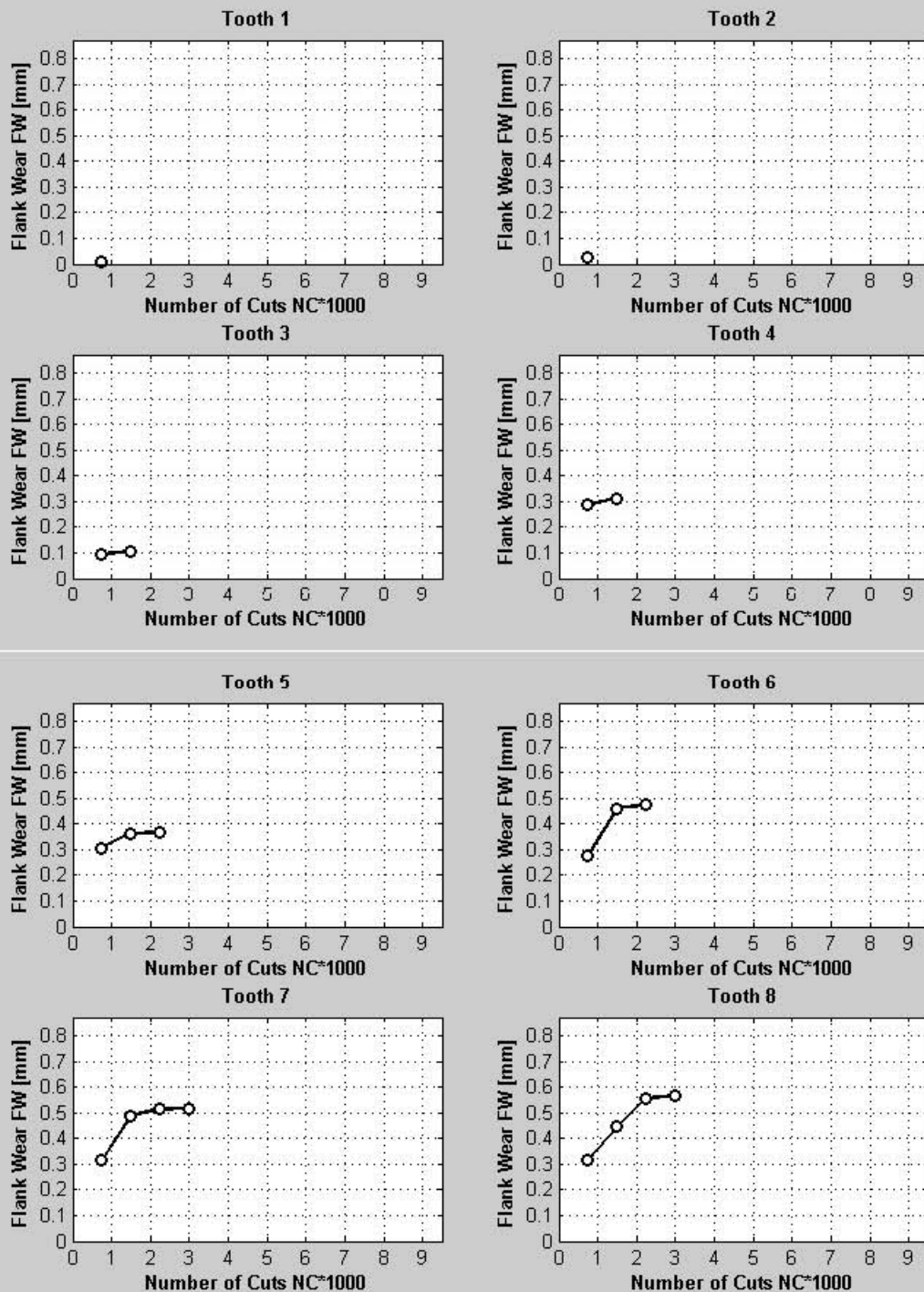
Σχήμα 5.3 Ισοδύναμα μεγέθη τρισδιάστατων αποβλήτων

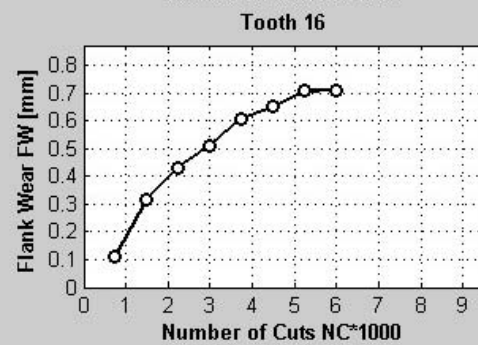
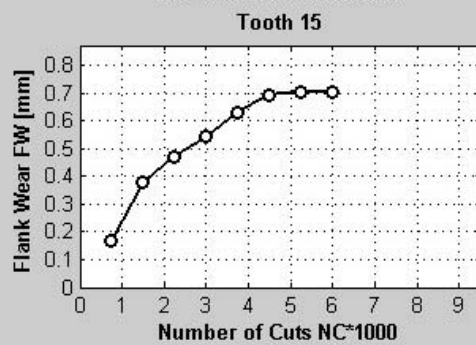
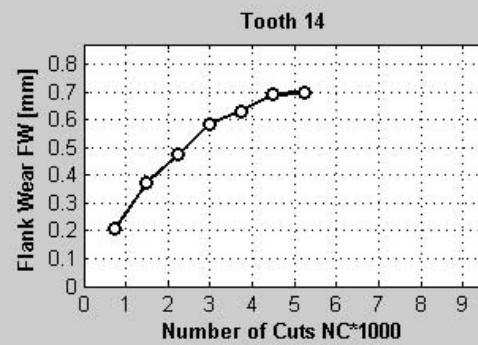
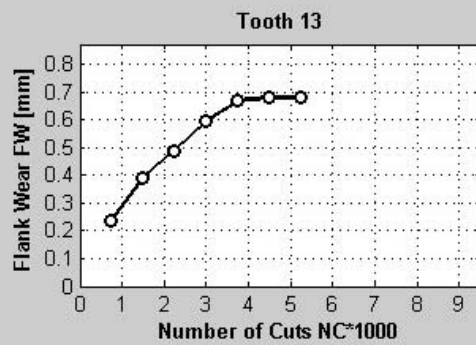
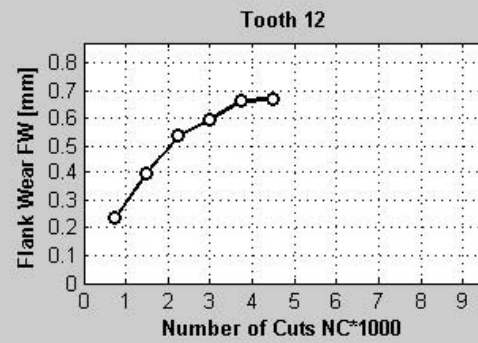
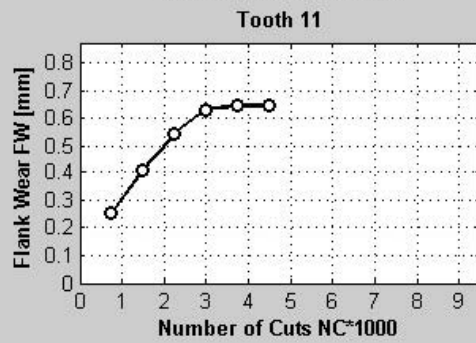
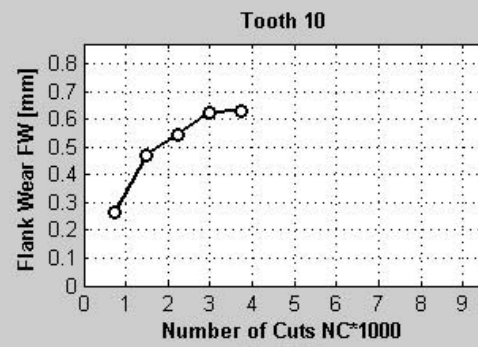
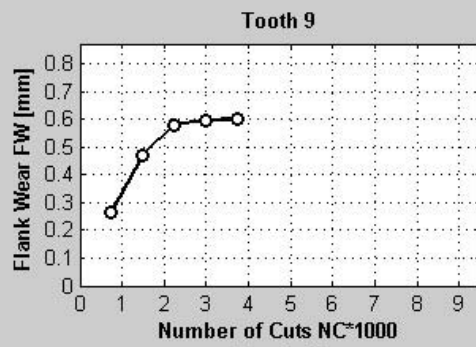
5.2 Υπολογισμός της φθοράς και της βέλτιστης εφαπτομενικής μετατόπισης

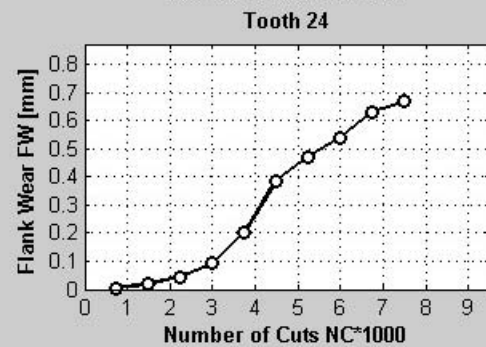
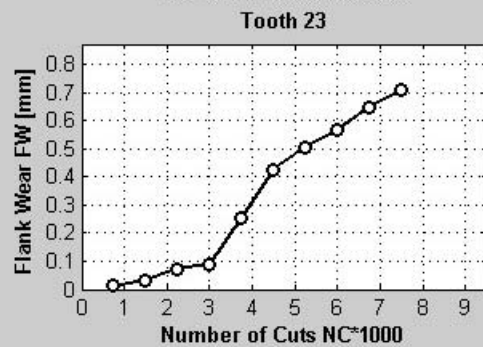
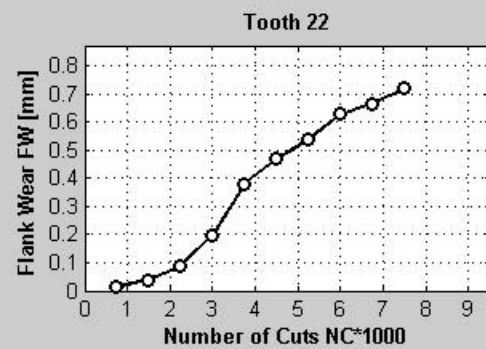
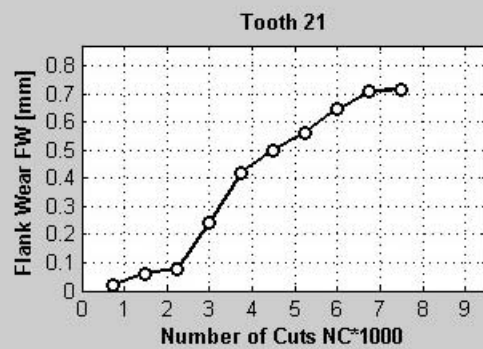
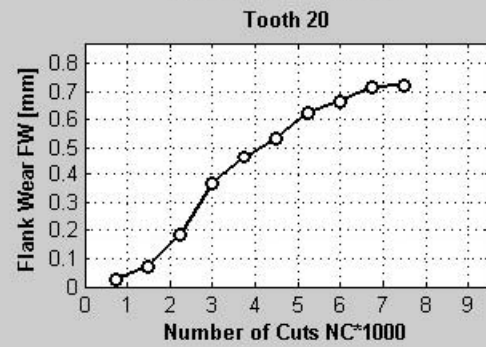
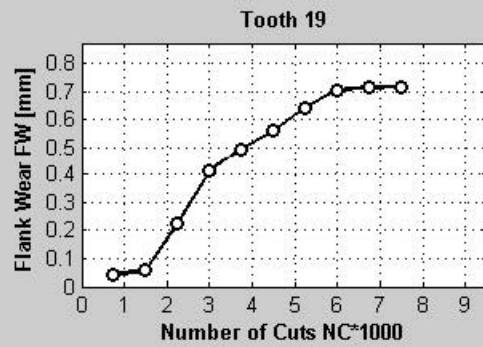
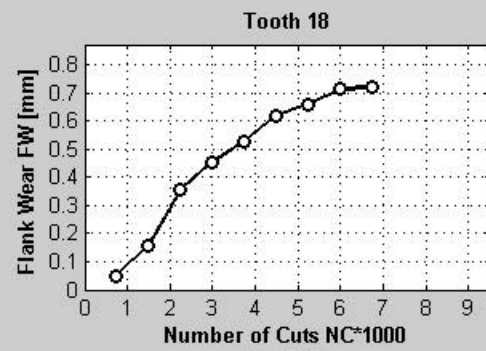
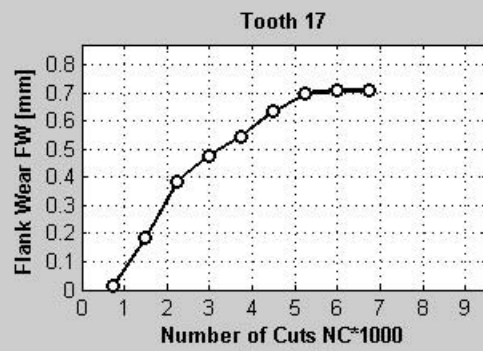
Στη συνέχεια όλα τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα προσδιορισμού της φθοράς και εξάγεται η αναφορά που παρουσιάζεται στο [Σχήμα 5.4](#). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα λαμβάνουν χώρα 10 εφαπτομενικές μετατοπίσεις. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι κόβουν 44 δόντια της κοπτικής φραίζας. Στα δέκα τελευταία διαγράμματα βλέπουμε την πορεία βελτιστοποίησης της κατανομής της φθοράς στα δόντια της κοπτικής φραίζας.

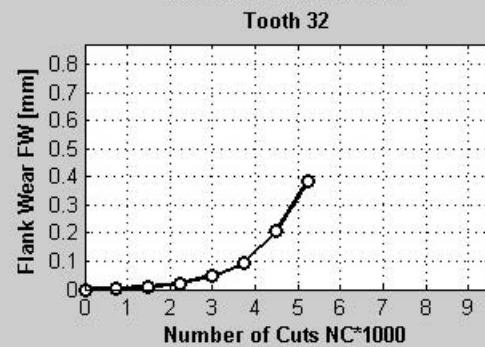
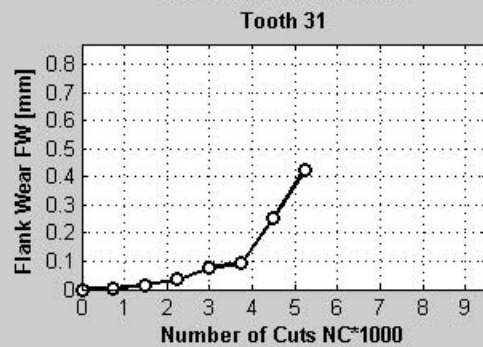
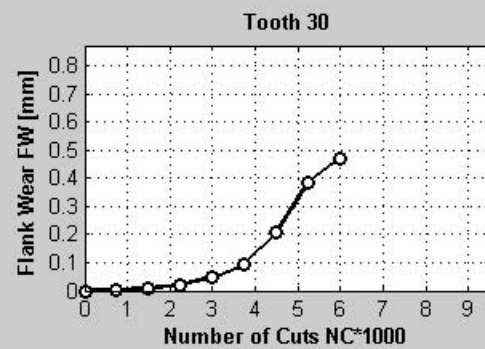
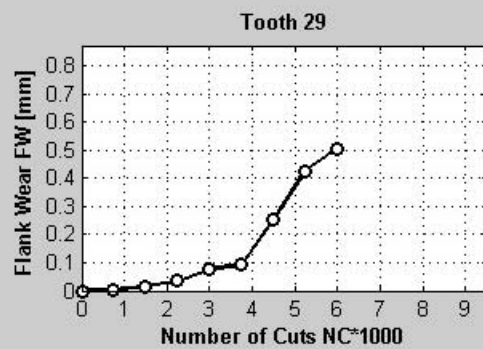
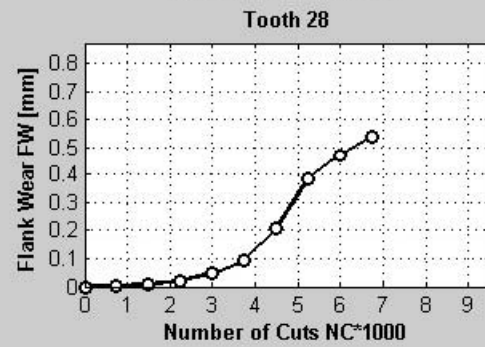
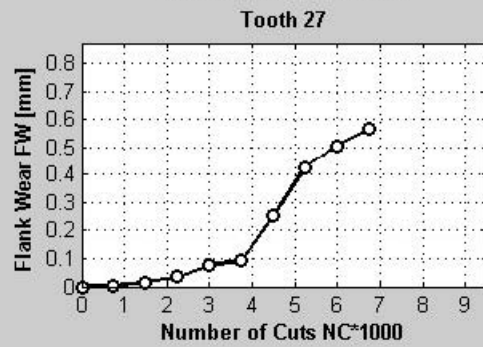
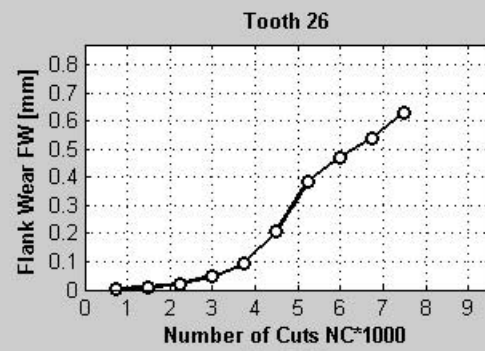
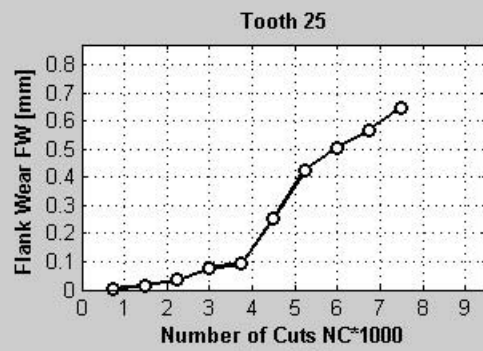


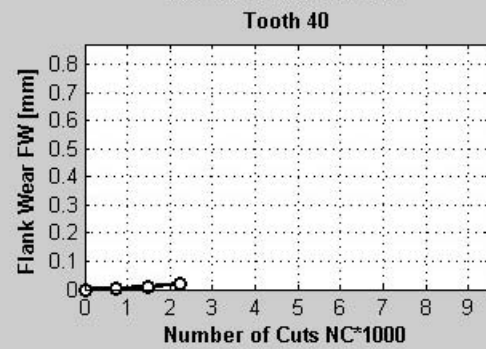
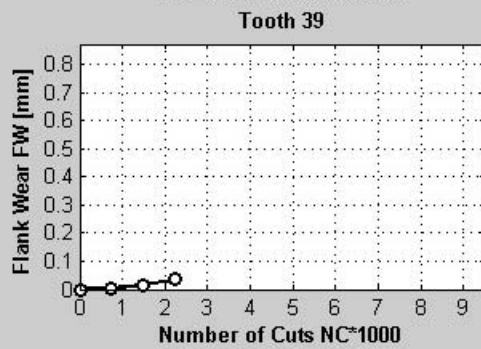
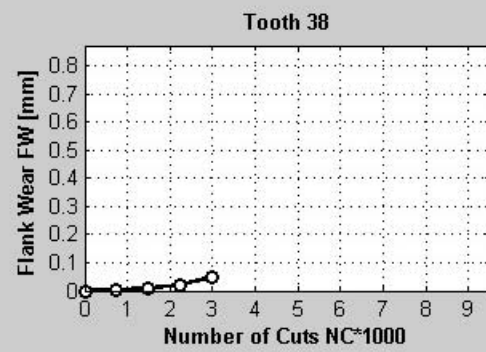
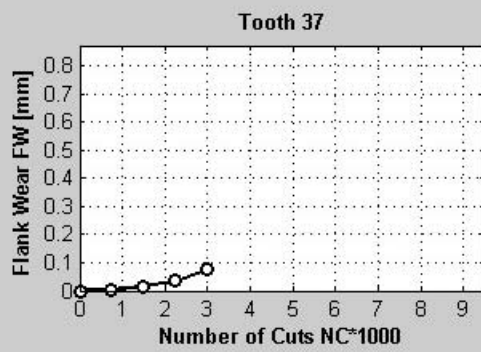
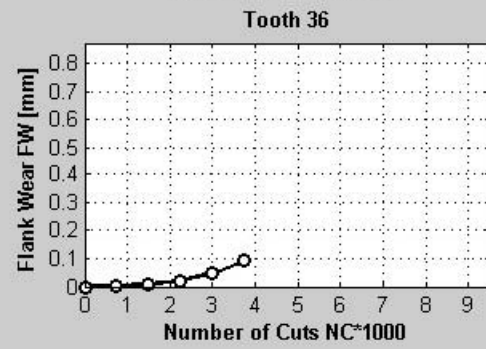
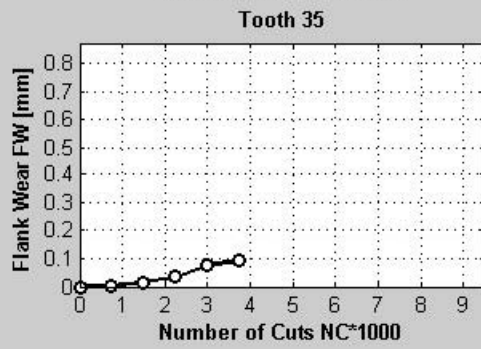
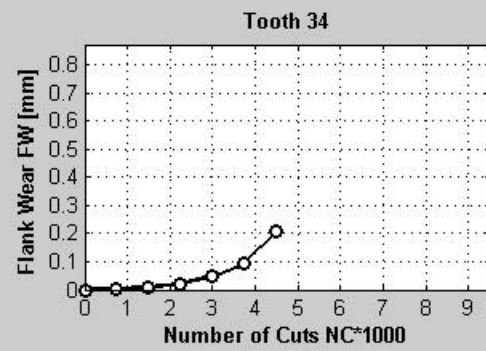
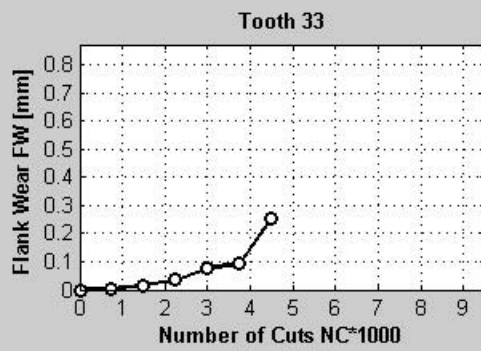
MICROMACHINING & MANUFACTURING MODELING LAB
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE - DEPT. of PRODUCTION ENGINEERING & MANAGEMENT

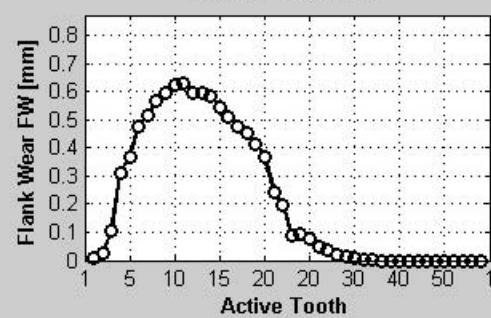
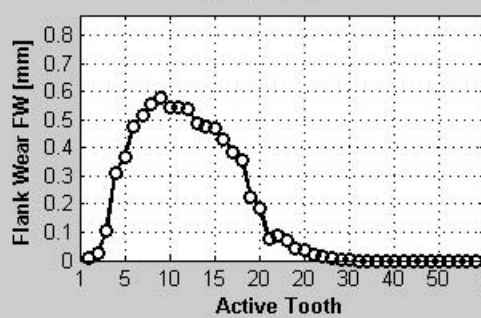
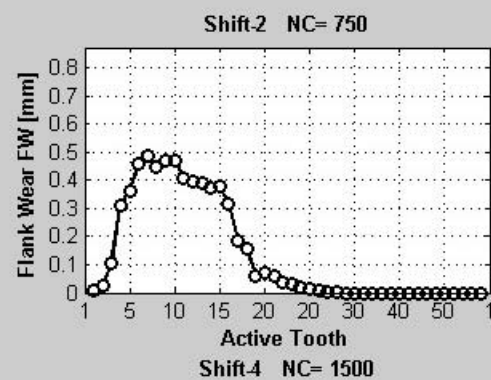
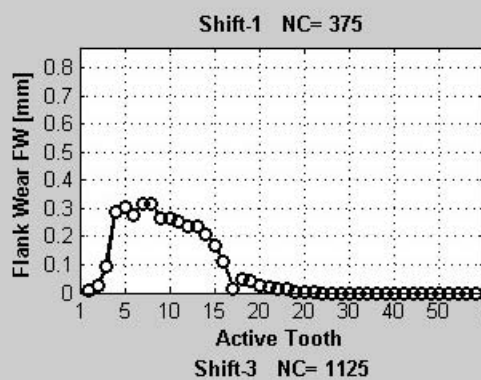
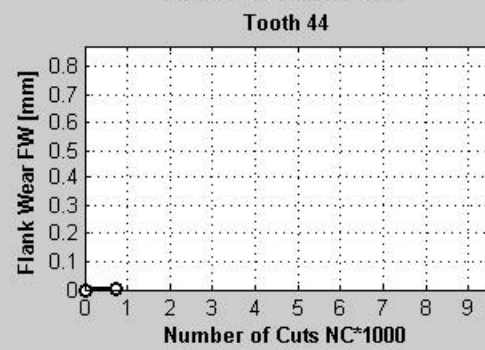
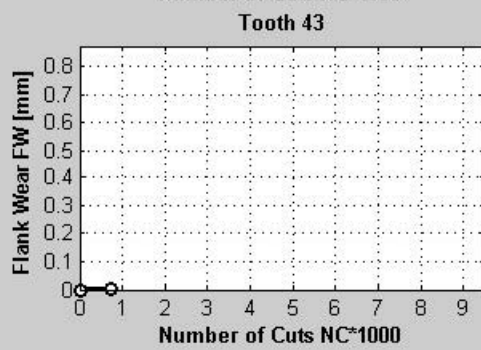
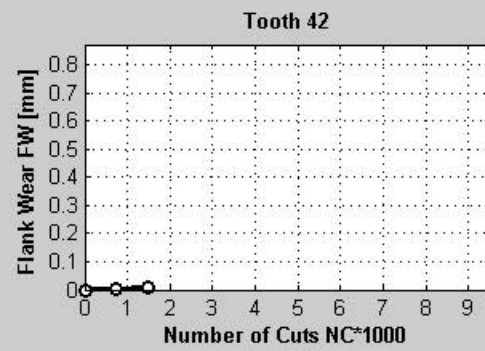
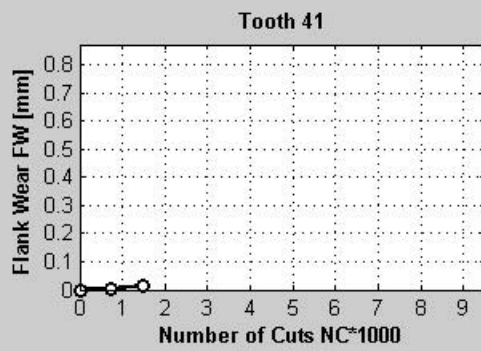












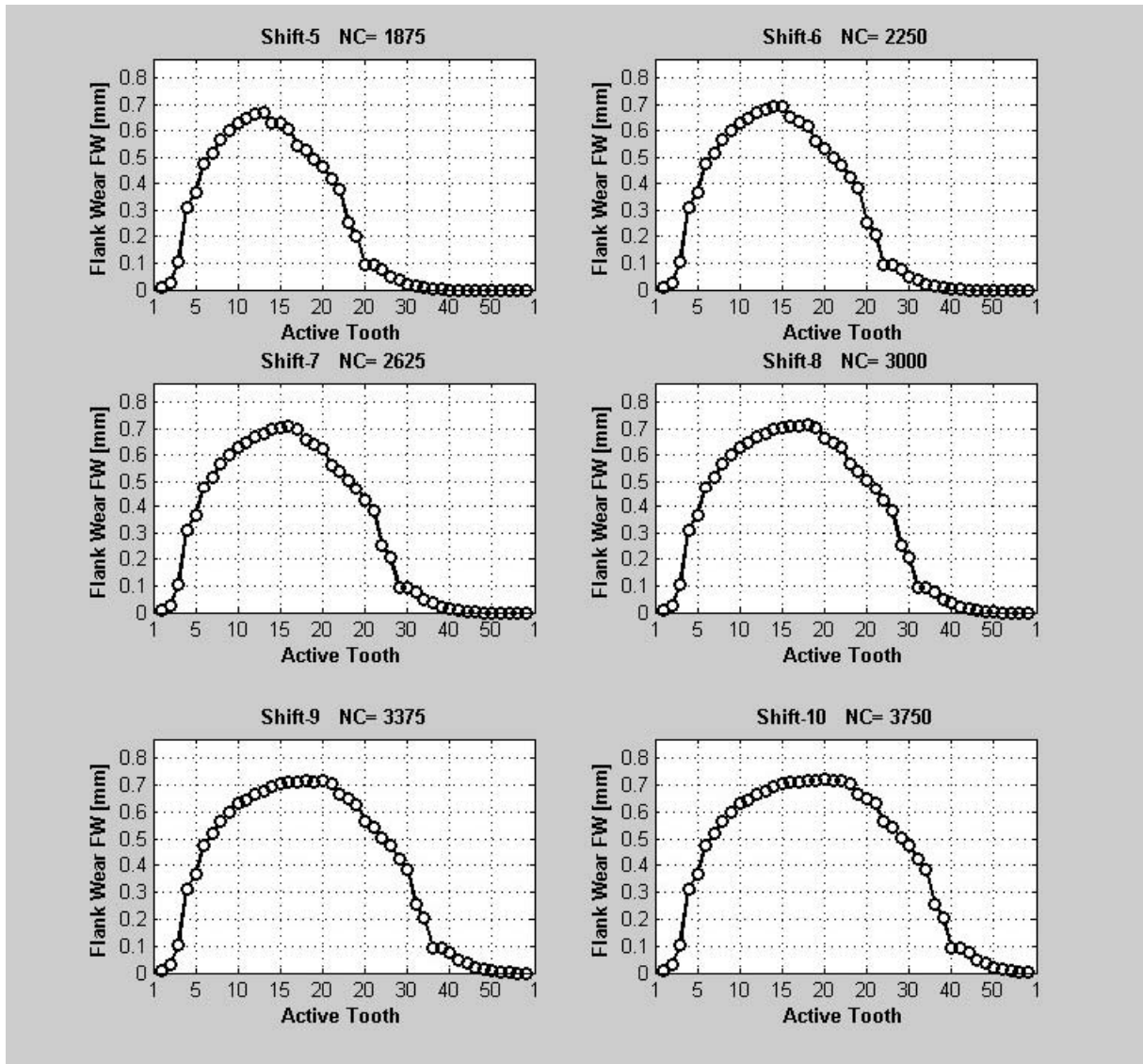


Table 1. GFW Data Table

Name	Value
Axial_Feed_SA	8
Axial_per_Tangential_Shift_NDW	2
Gear_Blank_Material	42CrMo4V
Hob_Material	S6-5-2-5
Number_of_Gears_NGZ	4
Number_of_Transitional_Area_NPER	1
Reference_Velocity_VI	30
Tangential_Shifts_Number_NSHW	10
Teeth_Number_Z2	30
Tooth_Breadth_BR	25
Velocity_of_Cut_V	30
Wear_Reference_VBI	0.6000

Table 2. Chip Data (FRS)

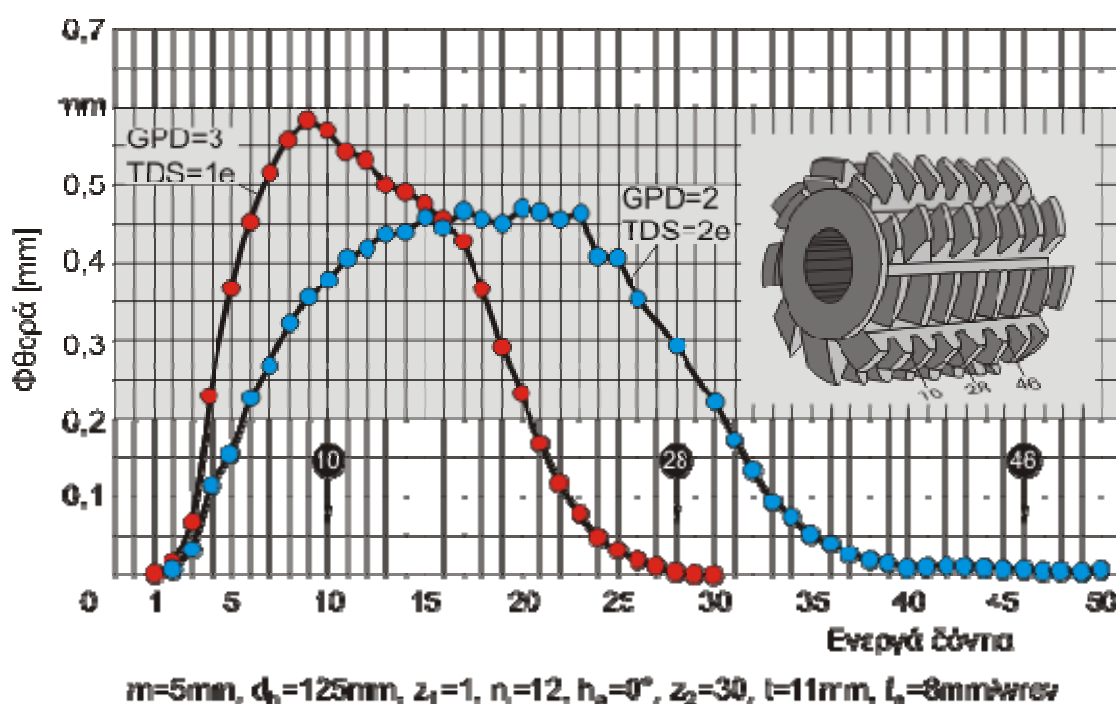
Name	Value
Chip_Groups	[3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 2]
Equivalent_Lenght	[2.641 17.012 27.641 30.279 32.002 33.446 34.701 35.901 37.012 37.907 38.758 39.434 40.011 40.415 40.728 32.88 38.813 20.012 19.542 13.641 10.854 7.514 5.553 3.628 2.141 1.851]
Equivalent_Thickness	[0.087 0.067 0.157 0.406 0.421 0.427 0.404 0.391 0.367 0.352 0.325 0.296 0.265 0.233 0.2 0.157 0.018 0.099 0.086 0.075 0.072 0.069 0.076 0.044 0.046 0.038]
Hobbing_Position	[-16 -15 -14 -13 -12 -11 -10 -9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9]

Σχήμα 5.4 Αυτόματη αναφορά του προγράμματος HOBWEAR

5.3 Παράδειγμα βελτιστοποίησης μέσω εφαπτομενικής μετατόπισης

Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει ένα παράδειγμα αφορά την κατασκευή 18 γραναζιών με διαφορετικές συνθήκες εφαπτομενικής μετατόπισης. Στην πρώτη περίπτωση η κοπτική φραίζα μετατοπίζεται κατά $1e$ (όπου e το αξονικό βήμα της εκάστοτε φραίζας) αφού πρώτα κατεργαστεί 3 γρανάτζια.

Στη δεύτερη περίπτωση η κοπτική φραίζα μετατοπίζεται κατά $2e$ αφού πρώτα κατεργαστεί 2 γρανάτζια. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε πως η εφαπτομενική μετατόπιση πρέπει να λαμβάνει χώρα αφού ολοκληρωθεί η κατεργασία όλου του πλάτους της οδόντωσης το οποίο μπορεί να αφορά και περισσότερα από ένα γρανάτζια σε πακέτο.



Σχήμα 5.5 Παράδειγμα βελτιστοποίησης εφαπτομενικής μετατόπισης

Στο παραπάνω σχήμα η γκρί περιοχή είναι η περιοχή μελέτης της φθοράς από 0,2 έως 0,6 mm. Κάτω από αυτή την περιοχή η φθορά έχει γραμμική εξάρτηση με τον αριθμό κοπών, ενώ πάνω από αυτή η εξέλιξη είναι απότομη και μη γραμμική. Όπως φαίνεται στην παραπάνω γραφική παράσταση στην πρώτη περίπτωση η φραίζα έχει ήδη φτάσει στο όριο φθοράς της.

6. ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή παρουσιάσθηκε μια νέα μέθοδος υπολογισμού των ισοδύναμων μεγεθών για τον προσδιορισμό της φθοράς από τα τρισδιάστατα απόβλιπτα. Στη συνέχεια έγινε προγραμματισμός ενός υπάρχοντος μοντέλου προσδιορισμού της φθοράς και αναπτύχθηκε ένα περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη για τη διαχείριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων.

Μελλοντικός ερευνητικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ενσωμάτωση στο μοντέλο υπολογισμού της φθοράς ορισμένων χαρακτηριστικών της τρισδιάστατης γεωμετρίας του. Το νέο αυτό μοντέλο προβλέπεται να είναι πιο ακριβές και πιο γρήγορο. Επίσης θα γίνει προσομοίωση της εξέλιξης της φθοράς με πεπερασμένα στοιχεία [17,12,18].

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Akkurt, S. (1995). "On the effect of surface roughness on wear of acetal-metal gear pairs." *Wear* 184(2): 107-109.
- [2] Amini, N., B. G. Rosén, et al. "Optimization of Gear Tooth Surfaces." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38(5-6): 425-435.
- [3] Antoniadis, A., - Vidakis, N.- Bilalis, N. (2002). "Fatigue Fracture Investigation of Cemented Carbide Tools in Gear Hobbing. Part 1: FEM Modeling of Fly Hobbing and Computational Interpretation of Experimental Results." *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol.124/4/2002: pp.784-798.
- [4] Antoniadis, A.-V., N.- Bilalis, N. "A Simulation Model of Gear Skiving." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.146-2/2004: pp.213-220.
- [5] Antoniadis, A.-V., N.- Bilalis, N. (2002). "Fatigue Fracture Investigation of Cemented Carbide Tools in Gear Hobbing. Part 2: The Effect of Cutting Parameters on the Level of Tool Stresses- A Quantitative Parametric Analysis." *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol.124/4/2002: pp.792-798.
- [6] Antoniadis, A., N. Vidakis, et al. (2004). "A simulation model of gear skiving." *Journal of Materials Processing Technology* 146(2): 213-220.
- [7] Arikan, M. A. S. and Ö. Carkoglu (1993). "Performance Rating of Spur Gears with Nonstandard Proportions and Profiles." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42(1): 189-192.
- [8] Bouzakis, K. (1981). "Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Walzfräsen." *WZL Aachen* 42.
- [9] Bouzakis, K., - Kompogiannis, S.- Antoniadis, A.- Vidakis, N. (2002). "Gear Hobbing Cutting Process Simulation and Tool Wear Prediction Models." *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 124/1/2002: pp.42-51.
- [10] Bouzakis, K. D. and A. Antoniadis (1988). "Optimal Selection of Machining Data in Gear Hobbing Regarding the Tool Mechanical Stresses Occuring During the Cutting Process." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 37(1): 109-112.
- [11] Bouzakis, K. D. and A. Antoniadis (1995). "Optimizing of Tangential Tool Shift in Gear Hobbing*." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44(1): 75-78.
- [12] Bouzakis, K. D., O. Friderikos, et al. (2008). "FEM-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of spur and helical gears." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1(1): 18-26.
- [13] Bouzakis, K. D., W. König, et al. (1982). "Use of Powder Metallurgical High Speed Steel in Gear Hobbing and Gear Shaping." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 31(1): 25-29.
- [14] Bouzakis, K. D., E. Lili, et al. (2008). "Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(2): 676-696.
- [15] Bouzakis, K. D., N. Michailidis, et al. (2002). "Geometry and coating parameters effect on cemented carbide sticks cutting performance used in bevel gear manufacturing." *Surface and Coatings Technology* 153(2-3): 148-154.
- [16] Bouzakis, K. D., G. Skordaris, et al. (2004). "A nanoindentation based determination of internal stress alterations in PVD films and their cemented carbides substrates induced by recoating procedures and their effect on the cutting performance." *Thin Solid Films* 447-448: 264-271.
- [17] Bouzakis, K. D., N. Vidakis, et al. (1996). "Determination of the fatigue behavior of thin hard coatings using the impact test and a FEM simulation." *Surface and Coatings Technology* 86-87(Part 2): 549-556.
- [18] Brauer, J. (2004). "A general finite element model of involute gears." *Finite Elements in Analysis and Design* 40(13-14): 1857-1872.
- [19] Claudin, C. and J. Rech (2009). "Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing--Application to the evaluation

- of various cutting edge preparations in high speed dry gear hobbing." *Journal of Materials Processing Technology* 209(11): 5152-5160
- [20] Cronjäger, L. and A. Steinwachs (1991). "Wälzfräsen von Kupplungs - Planverzahnungen -- Analyse der Verfahrenskinetik durch Simulation." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40(1): 87-9
 - [21] Dhanasekaran, S. and R. Gnanamoorthy (2008). "Gear tooth wear in sintered spur gears under dry running conditions." *Wear* 265(1-2): 81-87.
 - [22] Galczynski, R. (1984). "The effect of hob wear on the level of vibration generated in hobbing." *International Journal of Machine Tool Design and Research* 24(4): 295-309.
 - [23] Galczynski, R. (1984). "Effect of hob wear on the sounds emitted in the gear hobbing process." *Precision Engineering* 6(1): 25-30.
 - [24] Gerth, J., M. Larsson, et al. (2009). "On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting." *Wear* 266(3-4): 444-452.
 - [25] Gerth, J., M. Werner, et al. (2009). "Reproducing wear mechanisms in gear hobbing-- Evaluation of a single insert milling test." *Wear* 267(12): 2257-2268.
 - [26] Karpuschewski, B., H. J. Knoche, et al. (2008). "Gear finishing by abrasive processes." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(2): 621-640.
 - [27] Klocke, F., T. Schroeder, et al. (2007). "Manipulation of coating and subsurface properties in reconditioning of WC-Co carbide cutting tools." *Surface and Coatings Technology* 202(4-7): 1194-1198.
 - [28] Kuljanic, E. (1985). "A Method for Optimization of Hobbing." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 34(1): 75-78.
 - [29] Kuljanic, E. (1989). "Method for Increasing Tool Life in Hobbing (MITL-Hobbing)." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 38(1): 91-94.
 - [30] Kumar Das, A. (1999). "Technological heredity in spur gear manufacturing." *Journal of Materials Processing Technology* 91(1-3): 66-74.
 - [31] Natarajan, R., C. Rathnasabapathy, et al. (1987). "Surface durability of shaved gears." *Wear* 114(3): 295-308.
 - [32] Park, D. and A. Kahraman (2009). "A surface wear model for hypoid gear pairs." *Wear* 267(9-10): 1595-1604.
 - [33] Rech, J. (2006). "Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing." *Wear* 261(5-6): 505-512.
 - [34] Rech, J., M. A. Djouadi, et al. (2001). "Wear resistance of coatings in high speed gear hobbing." *Wear* 250(1-12): 45-53.
 - [35] Senthilvelan, S. and R. Gnanamoorthy (2006). "Effect of gear tooth fillet radius on the performance of injection molded Nylon 6/6 gears." *Materials & Design* 27(8): 632-639.
 - [36] Stachurski, Z. and H. Slupik (1997). "Hobbing as finishing machining of the hard teeth." *Journal of Materials Processing Technology* 64(1-3): 353-358.
 - [37] Vicenzi, B., L. Risso, et al. (2001). "High performance milling and gear hobbing by means of cermet tools with a tough (Ti,W,Ta)(C,N)-Co,Ni,W composition." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 19(1): 11-16.
 - [38] Wang, W.-S. and Z.-H. Fong (2008). "A dual face-hobbing method for the cycloidal crowning of spur gears." *Mechanism and Machine Theory* 43(11): 1416-1430.
 - [39] Μπουζάκης Κ-Δ, Α. Α., Κομπόγιαννης Σ. (1998). Προσδιορισμός Διάρκειας Ζωής Εργαλείων κατά το Φραιζάρισμα με Κύλιση Οδοντώσεων, για την Αύξηση της Παραγωγικότητας και τον Περιορισμό του Κόστους Κατεργασίας. Θεσσαλονίκη, Α.Π.Θ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας για τον προσδιορισμό της φθοράς