

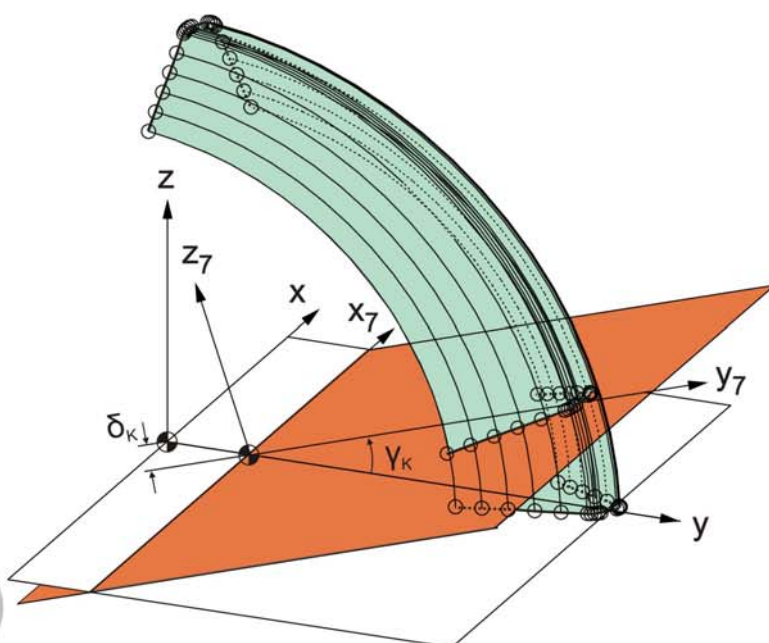


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ CAD



ΗΛΙΑΣ ΑΡΓΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 8

ΧΑΝΙΑ 2010

**Στους γονείς μου
Παναγιώτη και Ελένη
και στον αδελφό μου
Αποστόλη.**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και συμφοιτητές μου για τις γνώσεις, τις συμβουλές, τις εμπειρίες αλλά και το χρόνο που μοιραστήκαν μαζί μου αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Νικόλαο Ταπόγλου για τη χρήσιμη βοήθειά τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου δίνουν σε οποιαδήποτε περίσταση της ζωής μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ	6
2.1 Βασικές αρχές	6
2.2 Προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση στο CAD	10
3. ΠΡΟΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ	17
3.1 Υπολογισμός κοπτικής κατατομής εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz)	17
3.2 Περιγραφή της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου	18
3.3 Προσδιορισμός αποβλίπτων στο προφραιζάρισμα	22
4. ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ (GEAR SKIVING)	25
4.1 Υπολογισμός κατατομής του κοπτικού δοντιού στο φραιζάρισμα αποφλοίωσης με κύλιση	25
4.2 Περιγραφή της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου στην κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων	28
4.3 Προσδιορισμός αποβλίπτων στην αποφλοίωση	29
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	32
6. ΣΥΝΟΨΗ	64
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

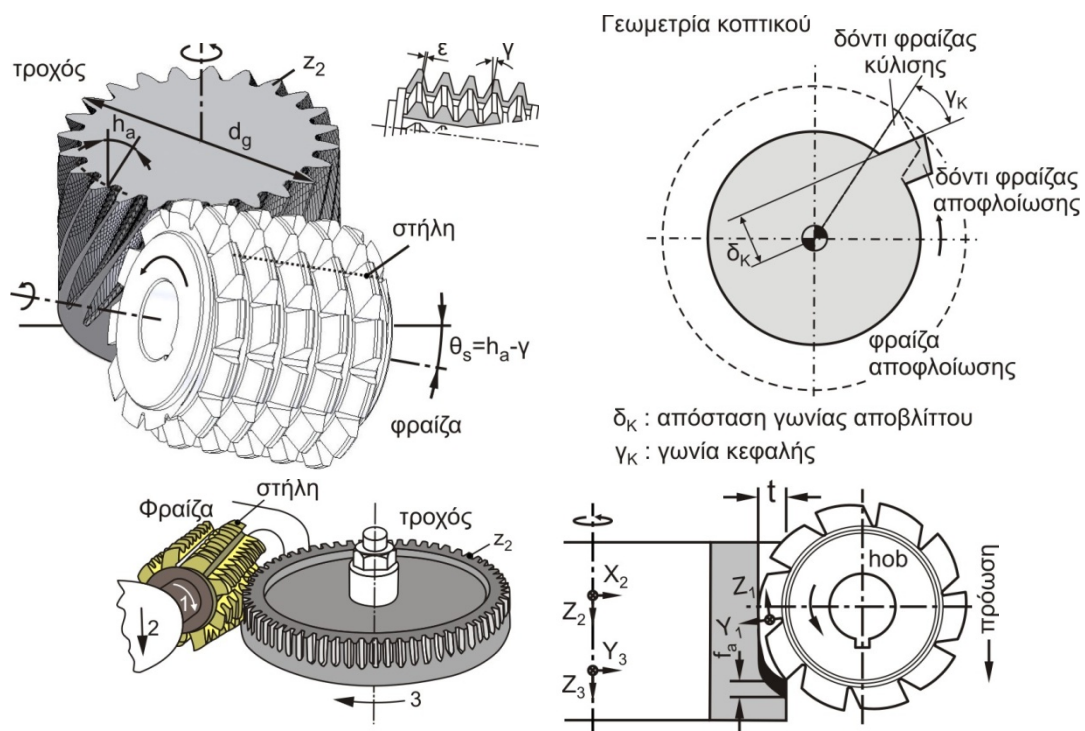
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την κατασκευή οδοντώσεων που λειτουργούν σε υψηλό αριθμό στροφών και με υψηλές ποιοτικές προδιαγραφές, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κατεργασίες κοπής με κύλιση όπως:

- Το φραιζάρισμα με κύλιση
- Η πλάνιση με κύλιση
- Η πλάνιση με κύλιση με οδοντωτό κανόνα
- Η αποφλοίωση με κύλιση

Το φραιζάρισμα με κύλιση (Gear Hobbing) είναι η κύρια μέθοδος κοπής εξωτερικών οδοντώσεων. Σε αντίθεση με το παραδοσιακή αυτή κοπή εξωτερικών οδοντώσεων, το φραιζάρισμα αποφλοίσωσης με κύλιση (Gear Skiving) είναι μία από τις δευτερεύουσες κατεργασίες για την αποπεράτωση των οδοντώσεων. Οι δυνατές ακολουθίες κατεργασιών με τη χρήση της αποφλοίσωσης είναι οι εξής: προκατεργασία, θερμική κατεργασία και τέλος η αποπεράτωση των οδοντώσεων με την κατεργασία του φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης με κύλιση (Gear Skiving).

Οι δύο δυνατότητες στο φραιζάρισμα αποφλοιώσης με κύλιση, συνδέονται με αντίστοιχες μεθόδους προκατεργασίας. Προκατεργασία με τυποποιημένη κοπτική κατατομή κατά DIN 3972 ή προκατεργασία με κοπτικό εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz). Στην παρούσα εργασία η προκατεργασία του φραιζαρίσματος με κύλιση πραγματοποιείται με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz). Η χρήση του εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή είναι απαραίτητη γιατί έτσι η κατεργασία φραιζαρίσματος αφήνει μικρό πάχος υλικού στον οδοντωτό τροχό που στη συνέχεια απομακρύνεται με την αποφλοιώση. Έτσι, με τη χρήση της κατεργασίας αποφλοιώσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαστάσεις του τελικού τροχού. Η βασική ορολογία των κατεργασιών αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1. Διακρίνονται ο κατεργαζόμενος τροχός, το κοπτικό εργαλείο καθώς και τα βασικά δεδομένα της κατεργασίας που αφορούν το εργαλείο, τον κατεργαζόμενο τροχό και τις συνθήκες κοπής.



Σχήμα 1.1 : Ορολογία στο ζεύγος φραίζα – κατεργαζόμενος τροχός.

Οδοντωτός τροχός	Κοπτικό εργαλείο (Hob)	Κατεργασία
d_g : Διάμετρος τροχού	d_h : Διάμετρος φραιζας	θ_s : Γωνία κλίσεως $\theta_s = h_a - \gamma$
h_a : Γωνία κλίσεως οδόντωσης	γ : Γωνία ελικώσεως	f_a : Αξονική πρόωση
z_2 : Αριθμός δοντιών	z_1 : Αριθμός αρχών	t : Βάθος κοπής
w : Πλάτος τροχού	ϵ : Αξονικό βήμα	
	n_1 : Αριθμός στηλών	
	γ_k : Γωνία κεφαλής	
	δ_k : Απόσταση επιπέδου επιφάνειας αποβλήτου	

Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση της μοντελοποίησης με χρήση συστήματος CAD για το φραιζάρισμα αποφλοίωσης οδοντώσεων με κύλιση (Gear Skiving), με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση της κατεργασίας και σε άλλους τομείς, όπως τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά τη διάρκεια της κοπής. Η μοντελοποίηση της κατεργασίας πραγματοποιείται με τη βοήθεια του Autodesk Inventor, ενώ η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του λογισμικού είναι η Visual Basic.

Η ανάπτυξη τέτοιων προγραμμάτων προσομοίωσης είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της κατεργασίας, αύξηση της παραγωγικότητας καθώς και δίνεται η δυνατότητα για επιλογή της κατάλληλης εργαλειομηχανής.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

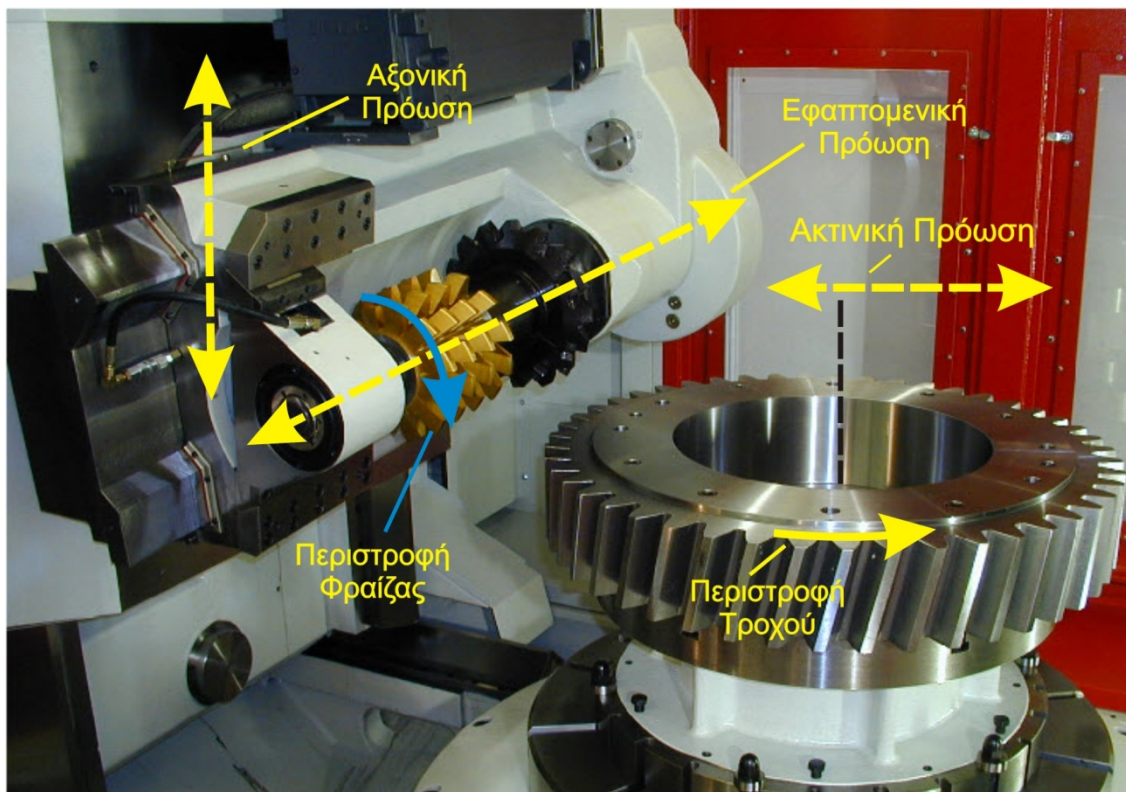
2.1 Βασικές αρχές

Κατά την κατασκευή οδοντωτών τροχών, τα παραγόμενα προϊόντα είναι απαραίτητο να πληρούν προϋποθέσεις όπως: αντοχή στις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία τους, αυξανόμενη απόδοση κατά τη χρήση τους, μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους καθώς και ελαχιστοποίηση του θορύβου.

Η κατασκευή των οδοντωτών τροχών μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους όπως το φραιζάρισμα με κύλιση (gear hobbing) που αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Το φραιζάρισμα με κύλιση συνήθως ακολουθεί η λείανση ως κατεργασία αποπεράτωσης. Ειδικά για σκληρά υλικά και κυρίως για ήδη ενανθρακωμένες παρειές, χρησιμοποιείται ως φινίρισμα η αποφλοίωση των οδοντώσεων με κύλιση (gear skiving) που ακολουθεί την κοπή με φραιζάρισμα με κύλιση με διορθωμένη κεφαλή.

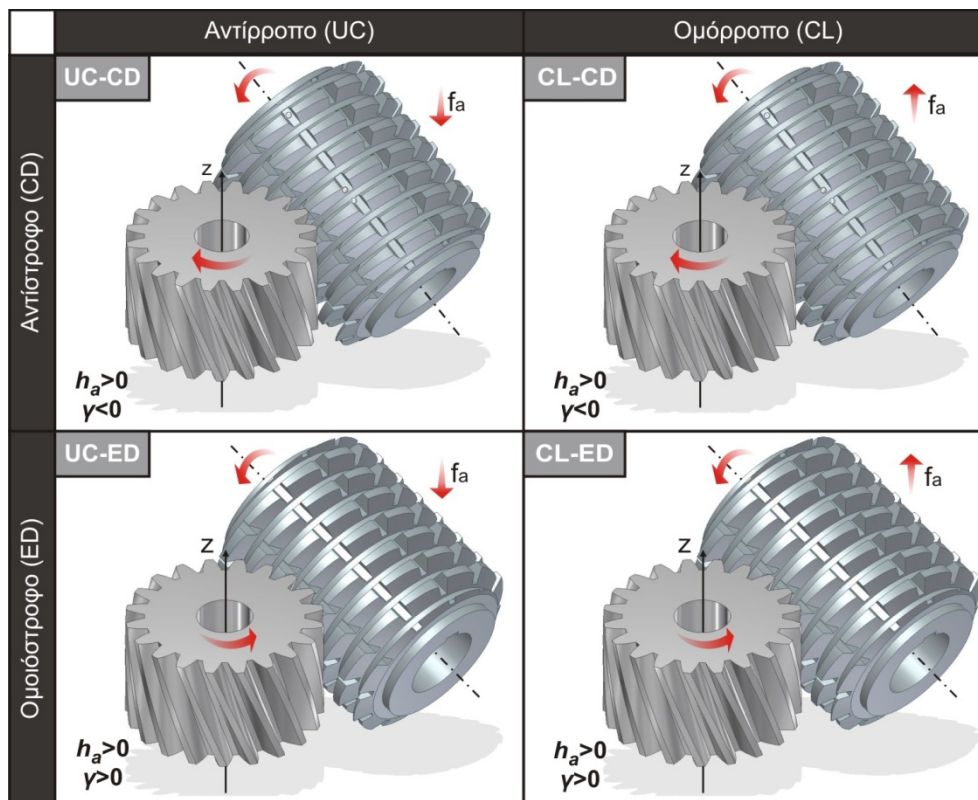
Τα τελευταία χρόνια η κατεργασία κυλινδρικών οδοντωτών τροχών με αποφλοίωση με κύλιση τείνει να αντικαταστήσει την παραδοσιακή μέθοδο της λείανσης με κύλιση (gear honning) εξαιτίας της εξέλιξης των εργαλειομηχανών, οι οποίες καθιστούν τη μέθοδο πρακτική και οικονομική ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται και η απαιτούμενη ποιότητα.

Η κατεργασία κυλινδρικών οδοντωτών τροχών με φραιζάρισμα αποφλοίωσης με κύλιση αλλά και το φραιζάρισμα με κύλιση διαφέρουν από άλλες κατεργασίες (φραιζάρισμα, τórνευση) λόγω της αρχής της κύλισης και της μορφής του κατεργαζόμενου τροχού. Η απαιτούμενη αύξηση της παραγωγικότητας προϋποθέτει τη γνώση μηχανισμού της κοπής, της κινηματικής της κατεργασίας και των καταπονήσεων των κοπτικών εργαλείων. Η βασική κινηματική της κατεργασίας περιγράφεται από ανεξάρτητες μεταξύ τους κινήσεις, της φραιζας και του κατεργαζόμενου τροχού, γεγονός που καθιστά περίπλοκη την προσομοίωση της. Οι κινήσεις αυτές παραστατικά φαίνονται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Κινηματική της κατεργασίας του φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων.

Η αξονική μετατόπιση που πραγματοποιεί η φραιζα ανά μία περιστροφή του τροχού ονομάζεται πρόωση. Η πρόωση f_a , ανάλογα τη φορά της, διακρίνει το φραιζάρισμα των οδοντώσεων σε ομόρροπο ($f_a > 0$) και αντίρροπο ($f_a < 0$). Στις πλάγιες οδοντώσεις διακρίνονται δυο ακόμη παραλλαγές, ανάλογα με την κατεύθυνση της ελίκωσης του εργαλείου, σχετικά με την κατεύθυνση της ελίκωσης του τροχού (ομοίοστροφο – αντίστροφο φραιζάρισμα). Ο συνδυασμός των παραλλαγών αυτών προσφέρει στις πλάγιες οδοντώσεις τέσσερις δυνατότητες κατεργασίας, κάθε μια με τις δικές της τεχνολογικές ιδιαιτερότητες. Οι τέσσερις αυτές δυνατότητες κατεργασίας του φραιζαρίσματος παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 : Παραλλαγές κατεργασίας φραιζαρίσματος πλάγιων οδοντώσεων με κύλιση.

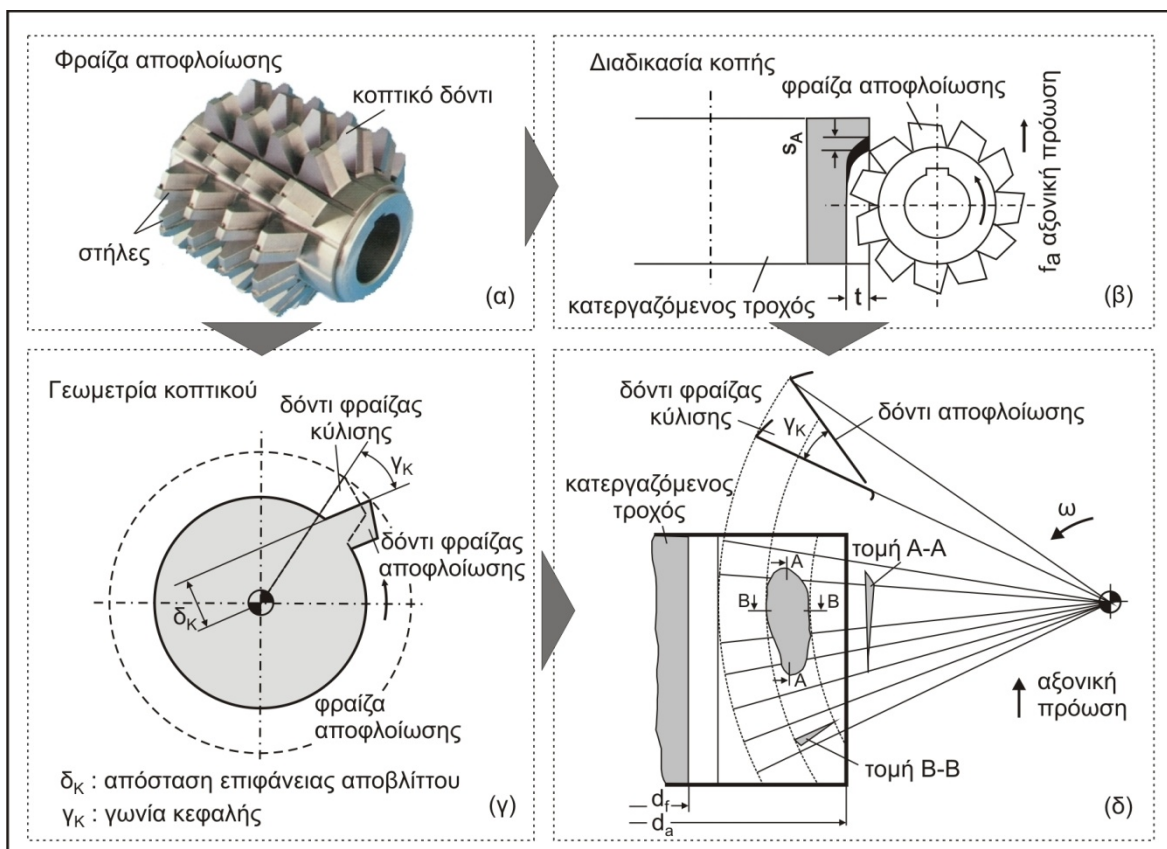
Το φραιζάρισμα αποφλοίσωσης με κύλιση όπως και το φραιζάρισμα με κύλιση χρησιμοποιούνται κυρίως σαν μέθοδοι κοπής οδοντώσεων μετωπικών οδοντοτροχών και οδοντοτροχών που συνεργάζονται με ατέρμονα κοχλία. Κατά την κοπή φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης με κύλιση και φραιζαρίσματος με κύλιση, ανάλογα με τη μέθοδο κατεργασίας, αλλά και σε συνάρτηση με τα διάφορα δεδομένα της, τα σχηματιζόμενα απόβληττα έχουν μορφή και διαστάσεις που ποικίλουν. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζεται και στα αναπτυσσόμενα φορτία κατά την κοπή καθώς και στη συμπεριφορά της φθοράς των δοντιών του κοπτήρα. Εκτός της δημιουργούμενης φθοράς που παρατηρείται κατά κύριο λόγο στην ελεύθερη επιφάνεια των δοντιών, σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν στην κατεργασία σχετίζονται με τις μηχανικές υπερκαταπονήσεις που δέχεται το κοπτικό εργαλείο. Έτσι παρουσιάζονται περιπτώσεις κατεργασιών κοπής οδόντωσης, που παρατηρούνται θραύσεις των κοπτικών ακμών ακόμα και στην αρχή της κατεργασίας ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης εργαλείων από σκληρομέταλλα.

Τα σκληρομέταλλα, προϊόντα της κονιομεταλλουργίας, συνίστανται από σωματίδια καρβιδίων, κυρίως καρβιδίου του Βολφραμίου (WC) σε συνδυασμό με άλλα καρβίδια, σε μικρότερο όμως ποσοστό. Ως συνδετική υλη χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν το Κοβάλτιο (Co). Από τη φύση τους τα σκληρομέταλλα είναι ψαθυρά υλικά και κατά συνέπεια η

δημιουργία υψηλών εφελκυστικών τάσεων εγκυμονεί κινδύνους δημιουργίας ρωγμών ή και θραύσεων. Η ψαθυρή αυτή θραύση συμβαίνει ύστερα από ελαχίστη ή και καθόλου πλαστική παραμόρφωση, σε συχνά απρόβλεπτα επίπεδα. Μελέτες, για την εκτίμηση των αιτιών των θραύσεων των κοπτικών δοντιών στο φραιζάρισμα αποφλοίσωσης με κύλιση οδοντώσεων αλλά και στο φραιζάρισμα με κύλιση, έδειξαν πως αρκετοί παράγοντες επιδρούν στη δημιουργία θραύσεων. Για τις συγκεκριμένες κατεργασίες οι παράγοντες αυτοί κατατάσσονται σε σχέση με:

- Το κοπτικό εργαλείο (μορφή, σκληρομέταλλο, τρόπος κατασκευής λείανσης)
- Γεωμετρία κοπτικού δοντιού (γωνία ελευθερίας, γωνία αποβλίπτου, κυκλικότητα κοπτικής ακμής)
- Γεωμετρία αποβλίπτου (τομές αποβλίπτου, διαίρεση βάθους κοπής, συνθήκες διεύθυνσης)
- Συνθήκες κατεργασίας (θερμική καταπόνηση, δυναμική συμπεριφορά εργαλειομηχανής)

Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση είναι πλήρως κατανοητός. Επίσης από παλαιότερες έρευνες έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκα λογισμικά (FRS, FRSDYN, FRSFEM, FRSSKIV) που ανάλογα με τα δεδομένα της κατεργασίας δίνουν μια πολύ καλή προσέγγιση για τα στοιχεία της, όπως η γεωμετρία των αποβλίστων, τα αναπτυσσόμενα φορτία κατά την κοπή καθώς και η συμπεριφορά της φθοράς των δοντιών του κοπτήρα. Αυτά τα λογισμικά έχουν αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες κατεργασίες κοπής που στηρίζονται στην ίδια βασική αρχή, δηλαδή την κύλιση.



Σχήμα 2.3 : Η αρχή της κατεργασίας κοπής στο φραιζάρισμα αποφλοίσωσης οδοντώσεων με κύλιση καθώς και η αντιπαράθεση της με το φραιζάρισμα κύλισης.

Η ομοιότητα που υπάρχει μεταξύ των δυο κατεργασιών, διευκολύνει την έρευνα αφού επιτρέπει την εκμετάλλευση της εμπειρίας του φραιζαρίσματος με κύλιση, η οποία έχει αποκτηθεί μέσα από τις ήδη υπάρχουσες έρευνες.

Αυτό που διακρίνει το φραιζάρισμα αποφλοίωσης με κύλιση είναι ότι αποτελεί μέθοδο κατεργασίας αποπεράτωσης των οδοντώσεων, δηλαδή πραγματοποιείται πάνω σε προκατεργασμένο κομμάτι το οποίο έχει δημιουργηθεί με διάφορες κοπτικές κατατομές, όπως η προκατεργασία με κοπτικό εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz). Είναι προφανές λοιπόν ότι για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του οδοντωτού τροχού απαιτείται αρχικά να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση της προκατεργασίας πάνω στον ακατέργαστο τροχό με το κοπτικό εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz), ενώ στη συνέχεια θα γίνει η προσομοίωση του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης με κύλιση, όπου η κοπτική κατατομή του δοντιού της φραιζας έχει ιδιαίτερη γεωμετρία.

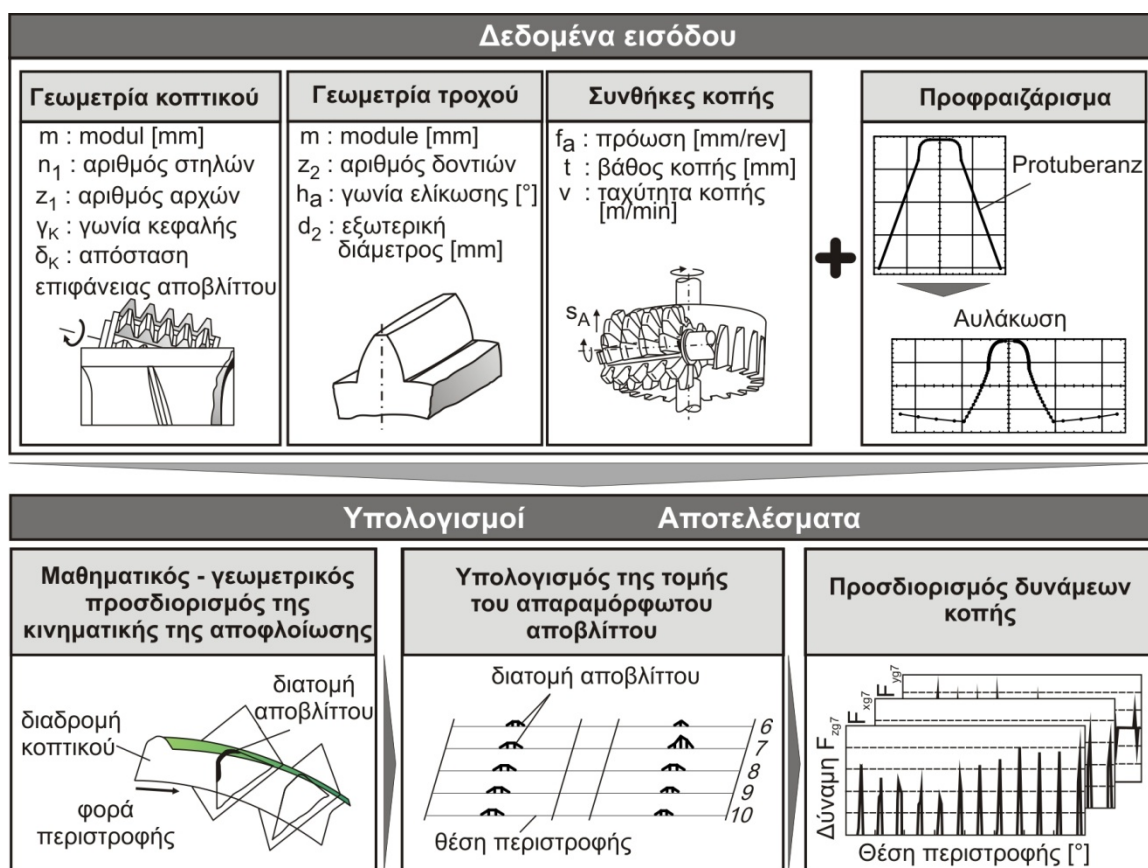
Στο σχήμα 2.3 (α) απεικονίζεται μια τυπική φραιζα (Skiving hob) για την κατεργασία αποφλοίωσης οδοντώσεων με κύλιση της οποίας όπως παρατηρείται η γεωμετρία είναι όμοια με αυτή της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση (Hobbing hob). Επίσης στο σχήμα 2.3 (β) φαίνεται η διαδικασία της κατεργασίας κοπής. Για τη δημιουργία των οδοντώσεων απαιτείται να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα τρεις κινήσεις, η περιστροφή του εργαλείου κοπής (φραιζα) γύρω από τον άξονα του, η περιστροφή του κατεργαζόμενου τροχού γύρω από τον άξονα του και τέλος η αξονική πρόωση του εργαλείου κοπής.

Η ιδιαίτερη γεωμετρία του εργαλείου κοπής για την αποφλοίωση οδοντώσεων με κύλιση παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 (γ), όπου απεικονίζεται η αντιπαράθεση μεταξύ της κοπτικής κατατομής του φραιζαρίσματος με κύλιση και του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης με κύλιση με γωνίες κλίσης $\gamma_k = 0^\circ$ και $\gamma_k = -30^\circ$, αντίστοιχα. Οι βασικές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ αυτού και του εργαλείου κοπής οδόντωσης στο φραιζάρισμα με κύλιση εντοπίζονται στην αρνητική διέδρη γωνία κλίσης γ_k καθώς και στην απόσταση δ_k της επιφάνειας αποβλίπτου. Η αρνητική γωνία κλίσης της κεφαλής, προστατεύει το κοπτικό (καρβιδίου) από κραδασμούς και στιγμιαίες υπερφορτίσεις. Όταν η γωνία κλίσης γ_k της κεφαλής της φραιζας ισούται με μηδέν τότε το επίπεδο που δημιουργείται από την κοπτική επιφάνεια περιλαμβάνει και τον άξονα του κοπτικού εργαλείου. Η διακεκομμένη περιοχή του σχήματος αντιστοιχεί στο ενεργό μέρος κοπής της φραιζας. Επίσης τα κοπτικά εργαλεία και για τις δυο κατεργασίες έχουν το ίδιο ενεργό μέρος κοπής.

Όπως στην κατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση, έτσι και στην κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση, λόγω της περίπλοκης κινηματικής δημιουργείται πρόβλημα ως προς τη μοντελοποίησή της, αφού η μορφοποίηση ενός αυλακιού της οδόντωσης λαμβάνει χώρα σε διαδοχικές διεισδύσεις των δοντιών της φραιζας σχετικά με τον κατεργαζόμενο τροχό. Τα διαδοχικά αυτά περάσματα ονομάζονται θέσεις κύλισης.

Το σχήμα 2.4 δείχνει την αλγοριθμική διαδικασία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίωσης με κύλιση. Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού καθώς και οι συνθήκες κοπής αποτελούν τα δεδομένα για τον προσδιορισμό των διεισδύσεων στο χώρο μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Τα δεδομένα αυτά είναι ίδια με τα αντίστοιχα της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση με εξαίρεση ότι επιπρόσθετα υπάρχει η γωνία γ_k και η απόσταση δ_k . Η ανάπτυξη του κώδικα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επηρεάζει εύκολα τα δεδομένα του προγράμματος. Η προσομοίωση αυτή έχει τη δυνατότητα αναλυτικού υπολογισμού της γεωμετρικής μορφής του απαραμόρφωτου αποβλίπτου καθώς και τον προσδιορισμό των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Εκτός από τα δεδομένα, υπενθυμίζοντας ότι η κατεργασία φραιζαρίσματος αποφλοίωσης με κύλιση αποτελεί μέθοδο αποπεράτωσης, απαιτείται επίσης η γεωμετρία

της αυλάκωσης δεδομένου ότι έχει προηγηθεί κοπή με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή. Η γεωμετρία της αυλάκωσης εξαρτάται από τη γεωμετρία που έχει το κοπτικό δόντι.



Σχήμα 2.4 : Διαδικασία υπολογισμού αποβλίττων στο φραιζάρισμα αποφλοίσωσης οδοντώσεων με κύλιση.

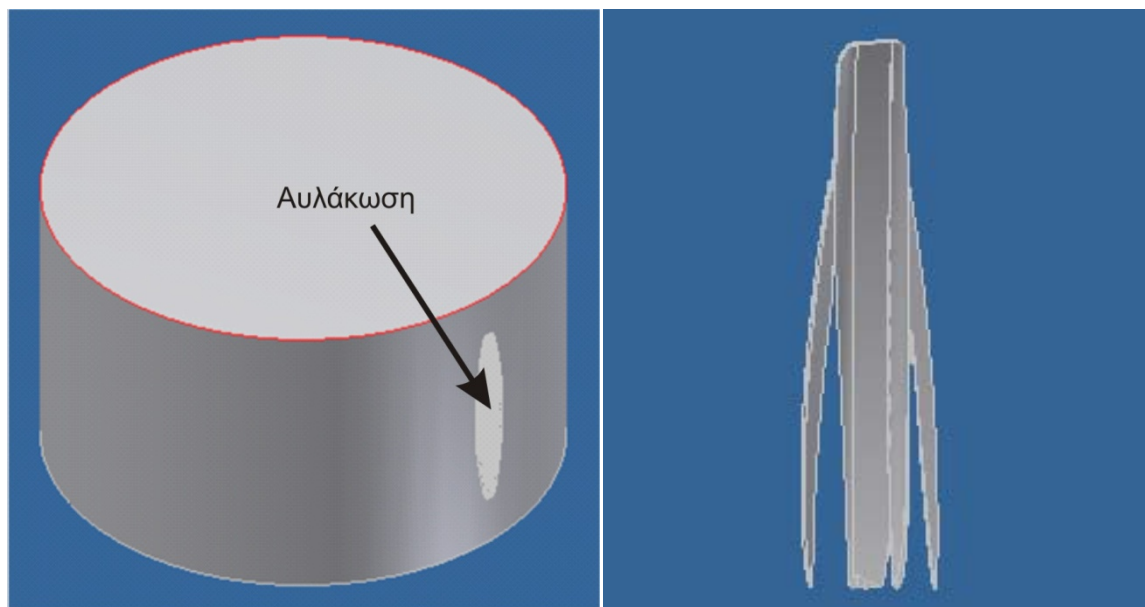
Η αρχή του παραπάνω αλγορίθμου βασίστηκε στη μαθηματική περιγραφή των διεισδύσεων του κοπτικού εργαλείου στον κατεργαζόμενο τροχό. Ο αναπτυχθείς κώδικας επιτρέπει τον προσδιορισμό του απαραμόρφωτου αποβλίττου καθώς και έναν ακριβή υπολογισμό των αποβλίττων μέσω τομών με τα επίπεδα από τα όποια διέρχεται η επιφάνεια αποβλίττου (Chip cross section), όπως φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος 2.4.

2.2 Προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση στο CAD

Όπως έχει αναφερθεί, για τη χρήση της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης οδοντώσεων με κύλιση απαιτείται το προφραιζάρισμα. Πριν λοιπόν γίνει ιδιαίτερη αναφορά για τα δυο αυτά στάδια δημιουργίας οδόντωσης, θα ήταν σκόπιμο να περιγραφεί η βασική λογική που ακολουθήθηκε κατά τον προγραμματισμό για την προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση, η οποία και αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία της προσομοίωσης της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης με κύλιση. Όπως είναι γνωστό, η βασική κινηματική τόσο της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση όσο και της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης με κύλισης, περιγράφεται από ανεξάρτητες μεταξύ τους κινήσεις, της φραιζας και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η διαφορά ανάμεσα στις δυο κατεργασίες έγκειται στην διαφορετική μορφή και γεωμετρία του κοπτικού δοντιού, όπως θα φανεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Για την προσομοίωση της κατεργασίας, η βασική ιδέα είναι η δημιουργία ενός κυλίνδρου που αποτελεί το κατεργαζόμενο τροχό και στη συνέχεια η δημιουργία της κίνησης που διαγράφουν όλα τα δόντια του κοπτικού εργαλείου ως προς τον κατεργαζόμενο τροχό,

λαμβάνοντας υπόψη όλες τις κινήσεις της κατεργασίας. Έχοντας λοιπόν την πορεία όλων των οδοντώσεων του κοπτικού εργαλείου και τον κατεργαζόμενο τροχό, γίνεται συναρμολόγηση (assembly) μεταξύ αυτών των δύο κατά την οποία αφαιρείται το κοινό υλικό μεταξύ των δυο στερεών. Το κοινό υλικό που αφαιρείται από το κάθε πέρασμα αποτελεί το απόβλιττο που δίνει το συγκεκριμένο πέρασμα (θέση κύλισης). Όταν πραγματοποιηθεί η συναρμολόγηση για όλα τα δόντια του κοπτικού και αφού έχουν γίνει τα απαραίτητα περάσματα (μπασίματα) δημιουργείται η τελική μορφή της οδόντωσης (αυλάκωση) πάνω στον κατεργαζόμενο τροχό, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα 2.5.



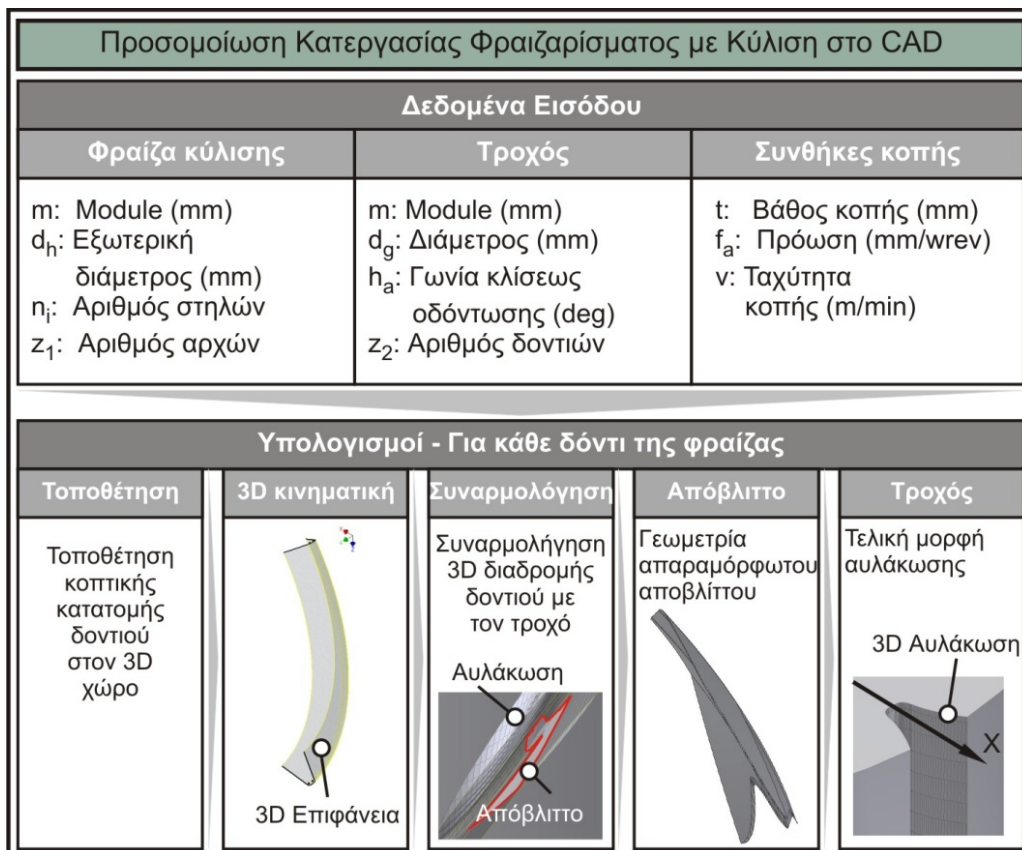
Σχήμα 2.5 : Ενδεικτικά η αυλάκωση οδοντωτού τροχού (γρανάζι) και απόβλιττο κοπής.

Με τη βοήθεια εικόνων θα γίνει λοιπόν μια περιγραφή της λειτουργίας του λογισμικού, ώστε να γίνει πλήρως κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο αναπτύχθηκε ο κώδικας προκειμένου να δημιουργηθούν τα απόβλιττα της κοπής και κατ επέκταση το τελικό αυλάκι.

Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.6 απαραίτητη είναι η αρχικοποίηση των εισόδων του προγράμματος, δηλαδή των δεδομένων και των συνθηκών κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η προσομοίωση της κοπής. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού, καθώς και τις συνθήκες κοπής. Συγκεκριμένα απαιτείται:

Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου

- **m** (module) [mm] : Μέτρο οδόντωσης κοπτικού εργαλείου
Ισχύει : **ύψος δοντιού φραιζας = $2,25 \cdot m$**
- **n_i** : Αριθμός στηλών φραιζας
- **z_1** : Αριθμός αρχών κοπτικών δοντιών
- **d_h** : Εξωτερική διάμετρος φραιζας
- **ϵ** : Αξονικό βήμα, δηλαδή καθορίζει την απόσταση του επόμενου δοντιού.
Ισχύει : **$\epsilon = (m \cdot \pi \cdot 1) / n_i$**
- **γ** : Γωνία ελίκωσης φραιζας



Σχήμα 2.6 : Διάγραμμα ροής της προσομοίωσης του φραιζαρίσματος με κύλιση.

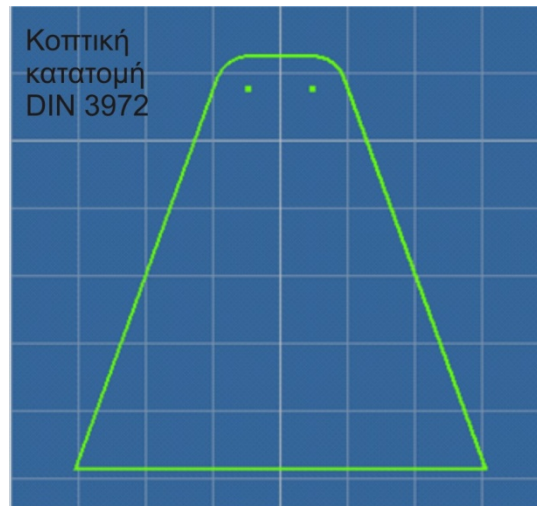
Γεωμετρία κατεργαζόμενου τροχού (γρανάζι)

- d_g [mm] : Διάμετρος τροχού
- h_a [deg] : Γωνία κλίσης οδόντωσης
- z_2 : Αριθμός δοντιών οδοντωτού τροχού
- w [mm] : Πλάτος τροχού

Συνθήκες κοπής

- t [mm] : Βάθος κοπής. Ισχύει : $t = 2.2 \cdot m / \cos(h_a)$
- f_a [mm/wrev] : Αξονική πρόωση, δηλαδή η ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου σε μία πλήρη περιστροφή του γραναζιού
- z [mm] : Απόσταση της πάνω επιφάνειας του κατεργαζόμενου τροχού με το κάθετο επίπεδο που περνάει από το κέντρο του κοπτικού εργαλείου

Μετά την αρχικοποίηση των δεδομένων του προγράμματος μπορεί να δημιουργηθεί ο στερεός κύλινδρος, ο οποίος αποτελεί τον κατεργαζόμενο τροχό (γρανάζι), καθώς και η ακριβής μορφή της κοπτικής κατατομής κατά **DIN 3972 II** που θα έχουν τα κοπτικά δόντια της φραιζας. Τα αποτελέσματα μέσω του CAD φαίνονται στο σχήμα 2.7.

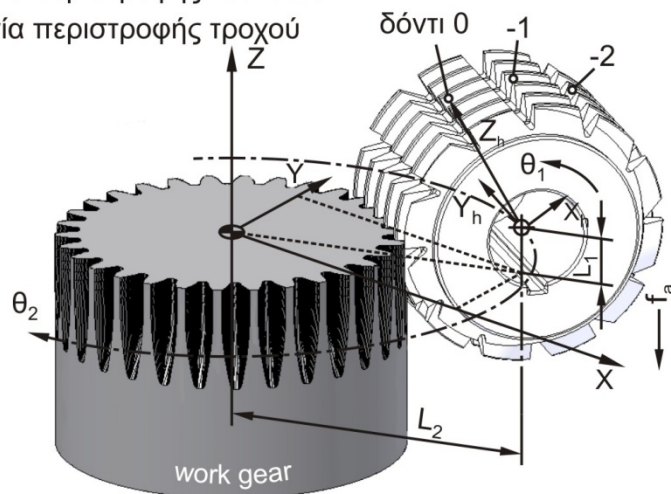


Σχήμα 2.7 : Κοπτική κατατομή κοπτικού εργαλείου.

Βασικό χαρακτηριστικό για την προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση όπως και της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίωσης με κύλιση είναι ότι οι περιστροφές και οι μετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την προσομοίωση μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού μεταφέρονται όλες στο κοπτικό εργαλείο. Δηλαδή όλες κινήσεις πραγματοποιούνται από το κοπτικό εργαλείο ενώ ο τροχός παραμένει σταθερός.

θ_1 : Γωνία περιστροφής κοπτικού

θ_2 : Γωνία περιστροφής τροχού



L_1 : Κατακόρυφη απόσταση κοπτικού-τροχού

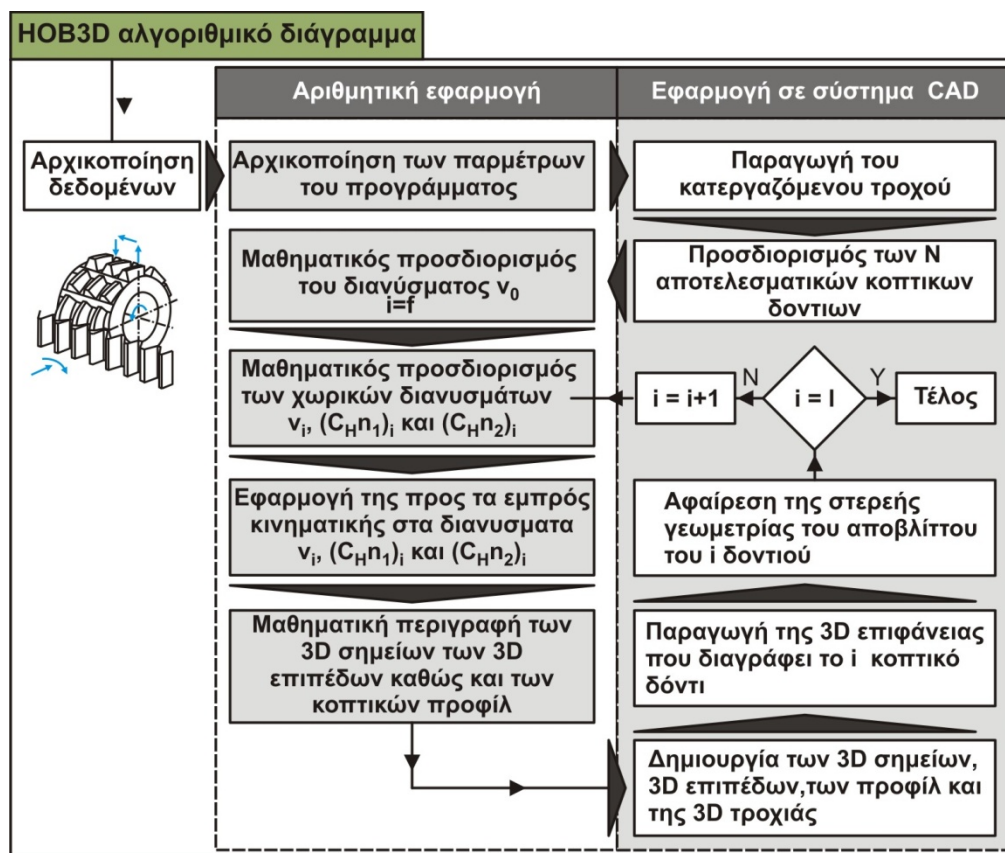
L_2 : Οριζόντια απόσταση κοπτικού-τροχού $L_2 = d_h/2 + d_g/2 - t$

Σχήμα 2.8 : Κινηματική της κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση.

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μεταξύ του κατεργαζόμενου τροχού και του κοπτικού εργαλείου. Όπως φαίνεται το κέντρο του συστήματος **XYZ** βρίσκεται στο κέντρο της άνω επιφάνειας του τεμαχίου κατεργασίας. Με αυτό τρόπο παρέχεται ένα σταθερό σύστημα αναφοράς για την πορεία που διαγράφει το κοπτικό εργαλείο ως προς τον τροχό.

Το κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε κάποιον αριθμό, ο οποίος παρέχει κατά κάποιο τρόπο μια σταθερή ονομασία στα δόντια του εργαλείου. Με αυτή την αρίθμηση δίνεται η δυνατότητα γνώσης της γεωμετρικής θέσης που βρίσκεται το κάθε δόντι του εργαλείου κοπής. Η αρίθμηση περιέχει το δόντι 0, τα αρνητικά δόντια

καθώς και τα θετικά δόντια. Το διάνυσμα $\mathbf{v}_0$ για το δόντι 0 έχει αρχή το $\mathbf{C}_H$ (κέντρο του κοπτικού εργαλείου) πάνω στον $\mathbf{Y}_h$ άξονα του κοπτικού εργαλείου και τέλος τη μέση της ακμής της επιφάνειας αποβλίπτου, το μέτρο του διανύσματος αυτού ισούται με $d_h/2$. Αυτό το διάνυσμα καθορίζει τη διεύθυνση του $\mathbf{Z}_h$ άξονα του συστήματος συντεταγμένων $\mathbf{X}_h\mathbf{Y}_h\mathbf{Z}_h$ του κοπτικού εργαλείου. Η απόσταση L_1 δείχνει την απόσταση που απέχει το σύστημα $\mathbf{X}_h\mathbf{Y}_h\mathbf{Z}_h$ του κοπτικού εργαλείου από την άνω επιφάνεια του κατεργαζόμενου τροχού στην αρχή της κατεργασίας κοπής. Τη στιγμή που αρχίζει η προσομοίωση της κατεργασίας θεωρείται μηδενικός χρόνος. Στην αρχή της προσομοίωσης ($t = 0$) οι επιφάνειες που δημιουργούνται από τους άξονες $\mathbf{YZ}$ και $\mathbf{Y}_h\mathbf{Z}_h$ θεωρούνται παράλληλες. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας και ισούται με : $L_2 = (d_h / 2) + (d_g / 2) - t$. Η απόσταση L_2 πρακτικά ορίζει το βάθος όπου πραγματοποιείται η κοπή. Για την απαιτούμενη γωνία κλίσεως θ_s του κοπτικού εργαλείου ως προς τον κατεργαζόμενο τροχό, περιστρέφεται το σύστημα συντεταγμένων $\mathbf{X}_h\mathbf{Y}_h\mathbf{Z}_h$ ως προς τον άξονα $\mathbf{X}_h$.



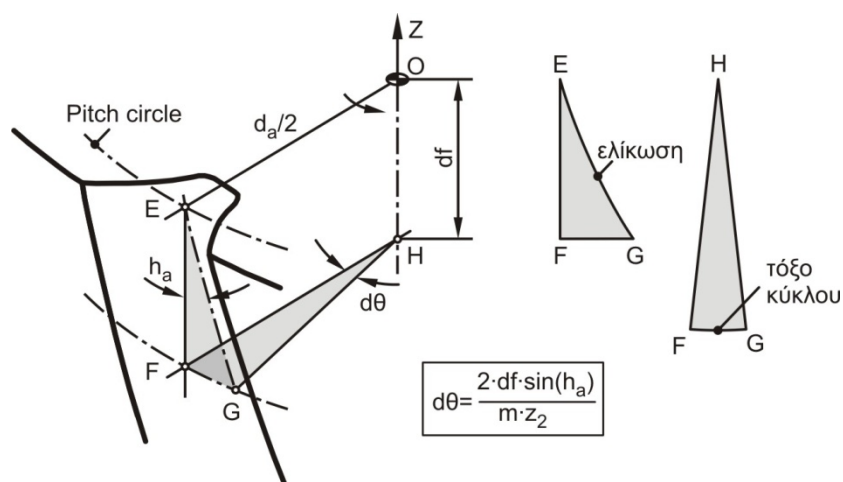
Σχήμα 2.9 : Αλγοριθμικό διάγραμμα κατεργασίας φραιζαρίσματος με κύλιση.

Με γνώμονα το διάνυσμα $\mathbf{v}_0$ του δοντιού 0, είναι εύκολο να υπολογιστούν τα διανύσματα $\mathbf{v}_i$ των υπολοίπων N δοντιών σε σχέση με το διάνυσμα $\mathbf{v}_0$, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά δεδομένα που αφορούν το κοπτικό εργαλείο. Η ανεξάρτητη παράμετρος θ_1 μετράει την περιστροφική γωνία που διαγράφει το κοπτικό εργαλείο γύρω από τον άξονα $\mathbf{Y}_h$ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της κοπής. Η παράμετρος θ_2 αναφέρεται στην γωνία που διαγράφει το κοπτικό εργαλείο γύρω από τον κατεργαζόμενο τροχό και $\mathbf{f}_a$ αξονική πρόωση του εργαλείου κοπής. Οι παράμετροι θ_2 και $\mathbf{f}_a$ εξαρτώνται από την θ_1 και οι τιμές τους καθορίζονται σε σχέση με την τιμή της γωνίας θ_1 .

Η προς τα εμπρός κινηματική που διαγράφει το καθένα από τα N δόντια του κοπτικού εργαλείου λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα αυλάκι (gap) το οποίο δημιουργείται προοδευτικά

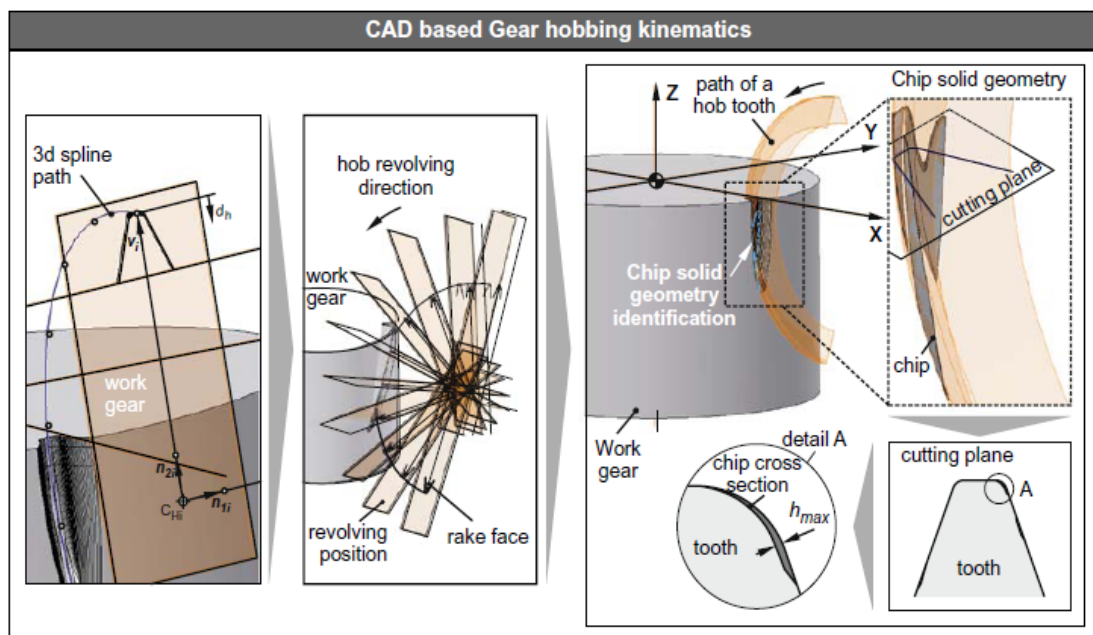
με το πέρασμα όλων των δοντιών. Μετά τον προσδιορισμό του διανύσματος $\mathbf{v}_0$ καθώς και των διανυσμάτων $\mathbf{v}_i$, εφαρμόζεται η προς τα εμπρός κινηματική αρχικά στο διάνυσμα $\mathbf{v}_0$ και διαδοχικά στα ακόλουθα διανύσματα $\mathbf{v}_i$, μέχρι και το τελευταίο κοπτικό δόντι του κύκλου εργασίας, προσομοιώνοντας με ακρίβεια την πραγματική παραγωγική διαδικασία.

Στην περίπτωση προσομοίωσης οδοντωτών τροχών με ελικοειδή μορφή, μια διαφορετική γωνία προστίθεται στο εκ περιστροφής σύστημα του τροχού, έτσι ώστε να αυξάνεται ή να μειώνεται γωνιακή ταχύτητα του περιστρεφόμενου κατεργαζόμενου τροχού, διασφαλίζοντας έτσι τη συναρμογή μεταξύ των γωνιών του εργαλείου κοπής και του κατεργαζόμενου τροχού. Ανάλογα με το είδος κοπής φραιζαρίσματος με κύλιση μια νέα γωνιακή παράμετρος $d\theta$ πρέπει να παρεμβάλλεται σε ολόκληρη την κινηματική αλυσίδα για την επιτάχυνση ή επιβράδυνση της θ_2 . Ο υπολογισμός της παραμετρικής τιμής $d\theta$ λαμβάνει χώρα σε ένα κυκλικό τμήμα όπως περιγράφεται αναλυτικά στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 : Κινηματική της κατεργασίας αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων με ελίκωση.

Η καθορισμένη κινηματική αλυσίδα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της τρισδιάστατης (3d spline path) πορείας της οδόντωσης στο περιβάλλον CAD. Αυτές οι πορείες που διαγράφουν τα δόντια του κοπτικού εργαλείου προκύπτουν από την παρεμβολή των σημείων που παράγονται από τα $\mathbf{v}_i$ διανύσματα, τα οποία με ακρίβεια μεταφέρονται και περιστρέφονται με τη βοήθεια των παραμέτρων προσομοίωσης θ_1 , θ_2 και $\mathbf{f}_a$. Ακολουθώντας την ίδια τακτική τα μοναδιαία διανύσματα $(\mathbf{CH} \mathbf{n1})\mathbf{i}$ και $(\mathbf{CH} \mathbf{n2})\mathbf{i}$ πρέπει να μεταφερθούν και να περιστραφούν για την παράγωγή ενός επίπεδου το οποίο θα βρίσκεται στη σωστή θέση στον τρισδιάστατο χώρο, για κάθε περιστροφική θέση του δοντιού $\mathbf{i}$.



Σχήμα 2.11 : Η τρισδιάστατη κινηματική της κατεργασίας σε CAD περιβάλλον.

Το προφίλ της κοπτικής κατατομής (βλέπε σχήμα 2.7) του κοπτικού εργαλείου σχεδιάζεται σε καθένα από τα χωρικά επίπεδα, όπως παρουσιάζεται στη μέση του σχήματος 2.11. Στην συνέχεια με κατάλληλη εντολή του CAD μπορεί να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη ανοιχτή επιφάνεια η οποία όπως φαίνεται και δεξιά στο σχήμα 2.11 βρίσκεται μέσα στην αυλάκωση του κατεργαζόμενου τροχού. Αυτή η πορεία της ανοιχτής επιφάνειας που δημιουργείται αντιπροσωπεύει την παραγωγική θέση του i δοντιού ενώ δείχνει και τα όρια των διεισδύσεων του όγκου στον κατεργαζόμενο τροχό. Με τη βοήθεια της διαδρομής της επιφάνειας, δηλαδή της πορείας του κοπτικού δοντιού, μια στερεή γεωμετρία αποβλήτου ορίζεται για κάθε παραγωγική θέση του δοντιού, χρησιμοποιώντας δυνατότητες του CAD. Η γεωμετρία του αποβλήτου οριοθετείται από την τομή της αυλάκωσης του κατεργαζόμενου τροχού και της επιφάνειας που δημιουργήθηκε. Η εντοπιζόμενη στερεή γεωμετρία αφαιρείται στη συνέχεια από τον κατεργαζόμενο τροχό σχηματίζοντας έτσι το στερεό απόβλητο καθώς και τη νέα γεωμετρία της αυλάκωσης του τεμαχίου κατεργασίας.

3. ΠΡΟΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ

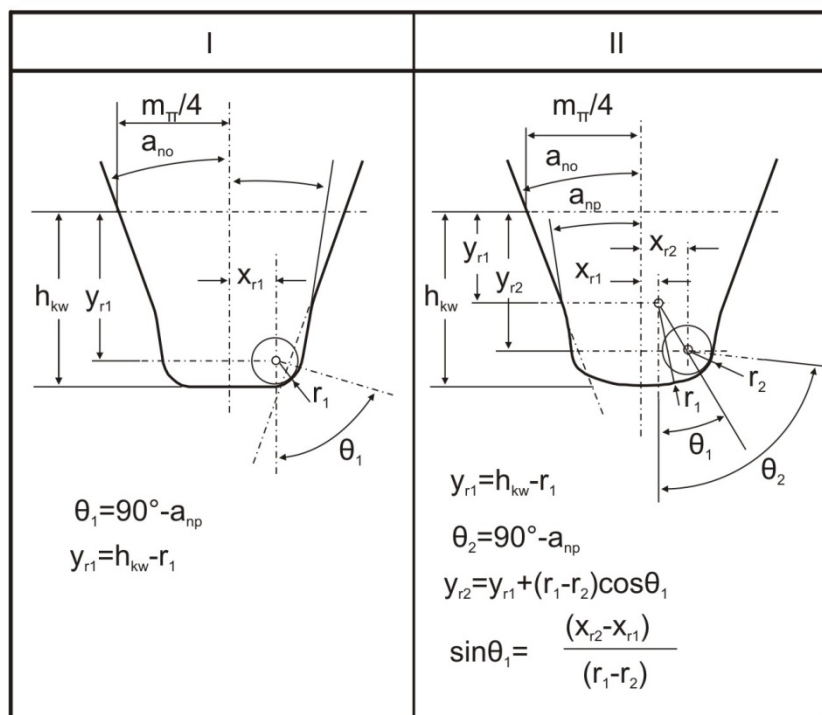
Στη συνέχεια γίνεται μια πλήρης περιγραφή της προκατεργασίας του φραιζαρίσματος κύλισης με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz).

3.1 Υπολογισμός κοπτικής κατατομής εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz)

Το εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz) χρησιμοποιείται, όπως έχει αναφερθεί, στην προκατεργασία φραιζαρίσματος με κύλιση οδοντώσεων (προφραιζάρισμα). Η χρήση εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή είναι απαραίτητη όταν προηγείται της κατεργασίας φραιζαρίσματος αποφλοίσωσης. Με το εργαλείο αυτό διαμορφώνεται η βάση στο αυλάκι της οδόντωσης και παραμένει υλικό στις παρειές σε κάποιο επιθυμητό πάχος, το οποίο θα αφαιρεθεί με την αποφλοίσωση.

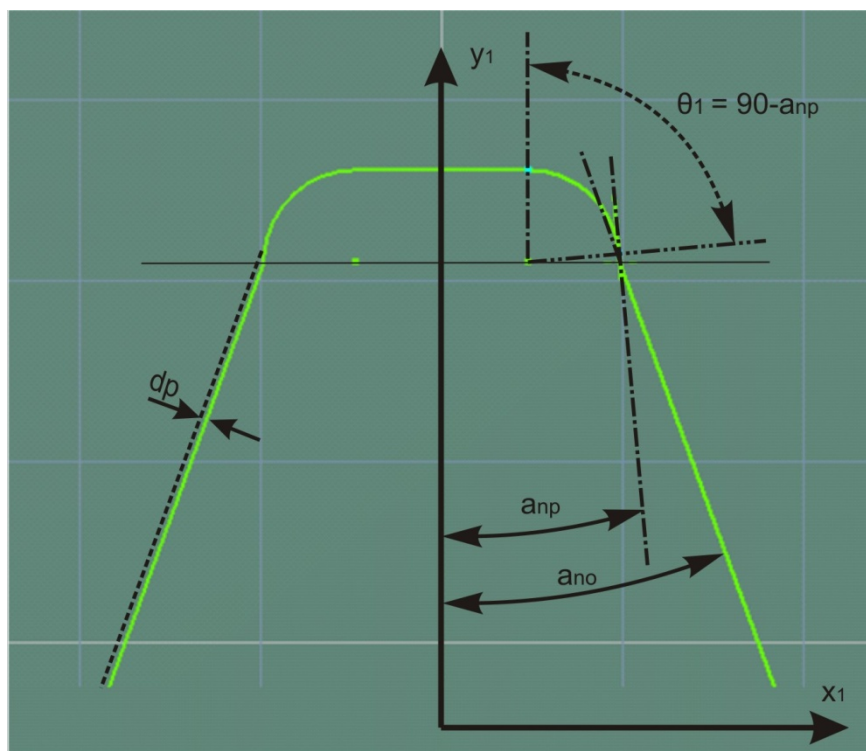
Η κοπτική κατατομή του εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή για φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων υπολογίζεται με ακρίβεια από αναλυτικές σχέσεις που την περιγράφουν. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, με προσέγγιση τμήματος της κοπτικής ακμής με έναν ή δυο κύκλους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Οι αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις δίνονται στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος.

Protuberanz κατατομή (Petri)



Σχήμα 3.1 : Μέθοδοι προσδιορισμού εργαλείου Protuberanz για φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων.

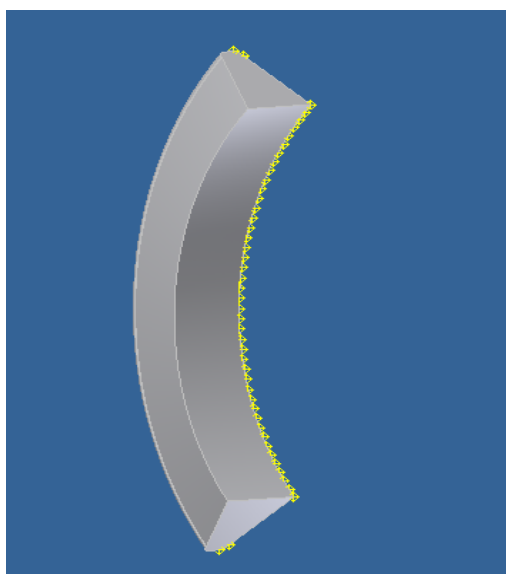
Το εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή υπολογίζεται για κάποια απόσταση **dp** στην παρειά που σχετίζεται με το επιδιωκόμενο εναπομένον πάχος στην παρειά του κατεργαζόμενου τροχού που πρόκειται να απομακρυνθεί κατά την κατεργασία της αποφλοίσωσης με κύλιση. Η κατατομή του εργαλείου με διορθωμένη κεφαλή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 : Εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή για το φραιζάρισμα οδοντώσεων με κύλιση.

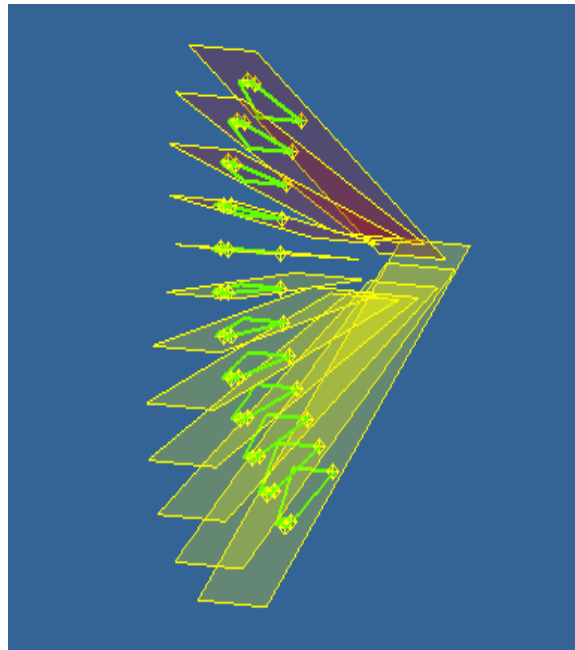
3.2 Περιγραφή της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου

Στη συνέχεια γίνεται με τη βοήθεια σχημάτων μία πλήρης περιγραφής του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της κατεργασίας προφραιζαρίσματος στο CAD και πιο συγκεκριμένα στο Autodesk Inventor. Το δυσκολότερο κομμάτι εστιάζεται στην κίνηση που διαγράφει το κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου στον τρισδιάστατο χώρο, καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, όλες οι κινήσεις της κατεργασίας πραγματοποιούνται από το κοπτικό εργαλείο. Ενδεικτικά στο [σχήμα 3.3](#) παρουσιάζεται η κίνηση που διαγράφει κάποιο δόντι στον τρισδιάστατο χώρο.



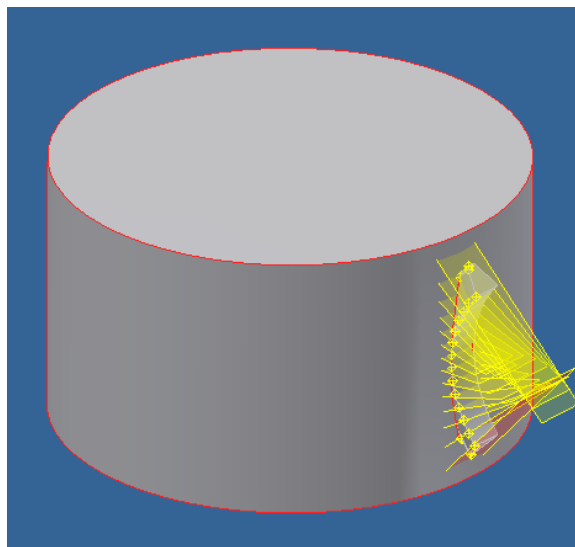
Σχήμα 3.3 : Η επιφάνεια που διαγράφει το κοπτικό δόντι στον τρισδιάστατο χώρο.

Για τη δημιουργία της τρισδιάστατης πορείας που διαγράφει το δόντι του εργαλείου κοπής στο περιβάλλον CAD, απαιτείται να προσδιοριστούν τα χωρικά επίπεδα που παρουσιάζονται σχήμα 3.4, στα οποία σχεδιάζεται στο καθένα χωριστά, το προφίλ του εργαλείου *Protuberanz*. Στη συνέχεια με κατάλληλη εντολή του Autodesk Inventor μπορεί να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη ανοιχτή επιφάνεια όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.4 : Επίπεδα αναφοράς για τη δημιουργία της κινηματικής του δοντιού.

Τα επίπεδα αναφοράς ουσιαστικά ορίζονται από τις στιγμιαίες θέσεις της επιφάνειας αποβλήτου του κοπτικού δοντιού κατά τη διάρκεια μιας διείσδυσης στον κατεργαζόμενο τροχό, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Το πλήθος των επιπέδων αναφοράς καθορίζει και την ακρίβεια υπολογισμού του αποβλήτου, μιας και ο υπολογισμός αυτός γίνεται στις διάφορες θέσεις περιστροφής που αντιστοιχούν στα επίπεδα αναφοράς.



Σχήμα 3.5 : Διείσδυση δοντιού στον κατεργαζόμενο τροχό.

Η λογική για τον υπολογισμό και τη σωστή τοποθέτηση των επιπέδων στο χώρο είναι ότι, κατά την περιστροφή ενός δοντιού του κοπτικού εργαλείου κατά γωνία **d_phi** ως προς τον άξονα του, ταυτόχρονα πρέπει να υπολογιστούν, τόσο η περιστροφική κίνηση του

εργαλείου ως προς τον κατακόρυφο άξονα του κατεργαζόμενου τροχού όσο και η κατακόρυφη πρόωση που λαμβάνουν χώρα στον ίδιο χρόνο. Ανάλογα με το πλήθος των επιπέδων αναφοράς που απαιτούνται για την προσομοίωση, πραγματοποιούνται και τόσες περιστροφές του δοντιού κατά γωνία d_phi . Στη συνέχεια περιγράφονται τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά τον προγραμματισμό της προσομοίωσης για τον προσδιορισμό των επιπέδων αναφοράς στον τρισδιάστατο χώρο.

Στάδιο 1

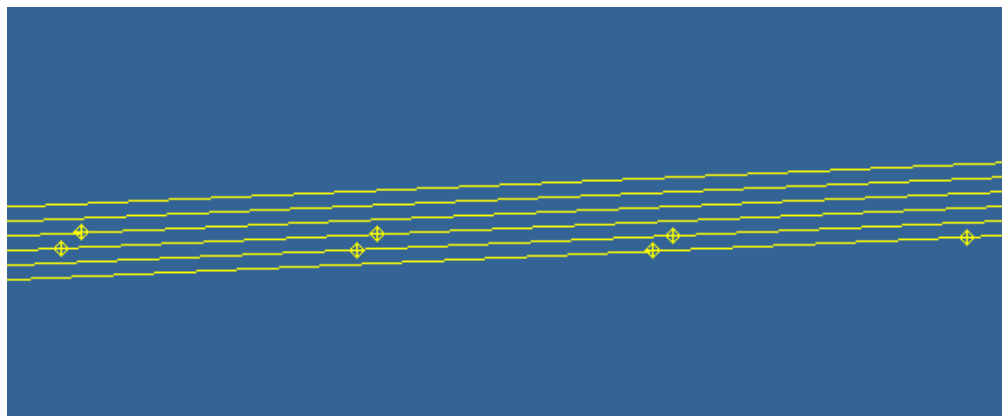
Προσδιορισμός του κέντρου του κοπτικού εργαλείου στον τρισδιάστατο χώρο XYZ , για κάθε επιπλέον περιστροφή του δοντιού του κοπτικού εργαλείου κατά d_phi . Για τον υπολογισμό των XYZ συντεταγμένων σε κάθε νέα περιστροφή d_phi του κοπτικού ως προς τον άξονα του, απαιτείται να υπολογιστεί η γωνία **Theta**, η οποία προσδιορίζει τη γωνία που έχει διαγράψει μέχρι τότε το κοπτικό εργαλείο ως προς τον κατακόρυφο άξονα του κατεργαζόμενου τροχού. Στο σχήμα 3.6 διακρίνονται τα διαδοχικά κέντρα του κοπτικού εργαλείου. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.6 τα σημεία διαγράφουν την περιστροφική κίνηση καθώς και την κατακόρυφη μετακίνηση προς τα πάνω εξαιτίας της θετικής πρόωσης.



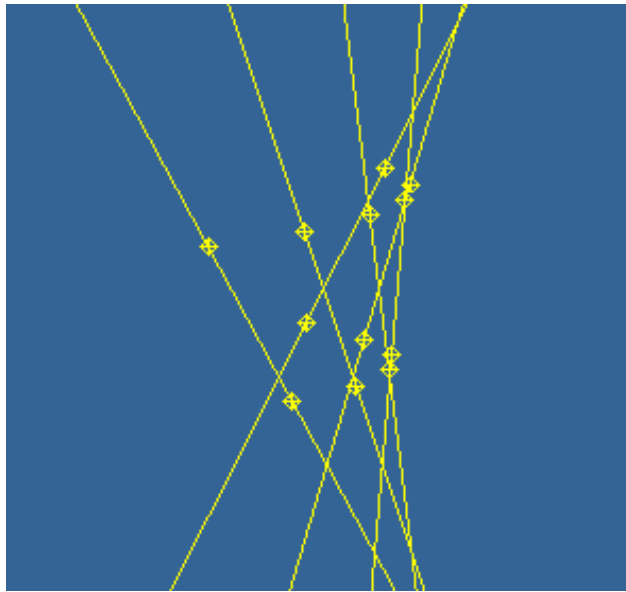
Σχήμα 3.6 : Διαδοχικά κέντρα κατά την κίνηση του εργαλείου κοπής.

Στάδιο 2

Στη συνέχεια για κάθε διαδοχική θέση του κέντρου του κοπτικού εργαλείου, υπολογίστηκε και σχεδιάστηκε ένα ακόμη σημείο το οποίο βρίσκεται πάνω στον άξονα περιστροφής του εργαλείου κοπής. Φέρνοντας λοιπόν μία γραμμή που ενώνει τα δυο σημεία δημιουργήθηκε ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου για κάθε διαδοχική θέση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.7 και 3.8. Στο πρώτο διακρίνεται η θετική πρόωση που πραγματοποιείται από το κοπτικό εργαλείο, ενώ στο δεύτερο η περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα περιστροφής του κατεργαζόμενου τροχού.



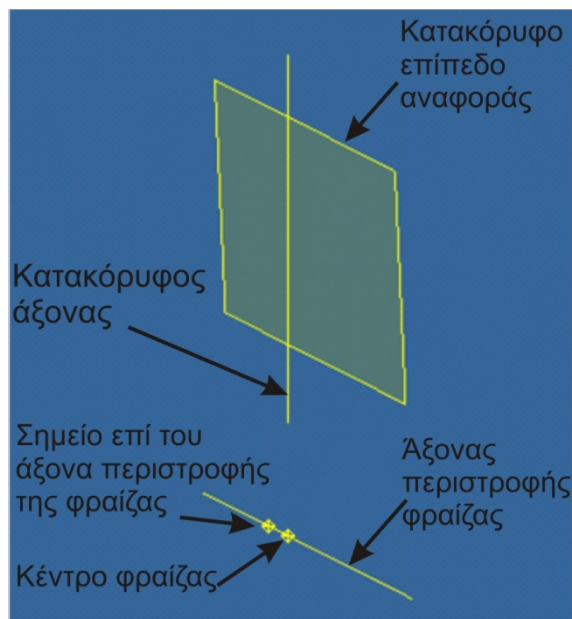
Σχήμα 3.7 : Άξονες περιστροφής για κάθε διαδοχική θέση του κοπτικού. Διακρίνεται η θετική πρόωση της φραιζας.



Σχήμα 3.8 : Άξονες περιστροφής για κάθε διαδοχική θέση του κοπτικού. Διακρίνεται η περιστροφική κίνηση της φραιζας.

Στάδιο 3

Μετά από την τοποθέτηση των αξόνων περιστροφής και αφού πριν σχεδιάστηκε ένας κατακόρυφος άξονα ο οποίος τέμνει τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, δημιουργήθηκε για κάθε διαδοχική θέση ένα κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς το οποίο όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.9](#) άγεται από τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Αυτό το επίπεδο δημιουργήθηκε με βάση τον άξονα περιστροφής της εκάστοτε θέσης του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή αποτελεί το επίπεδο που δημιουργείται από την κατακόρυφη μετακίνηση του άξονα προς τα επάνω. Για καλύτερη ευκρίνεια στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται το κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς για μία μόνο θέση του κοπτικού εργαλείου, το ίδιο δημιουργήθηκε για όλες τις διαδοχικές θέσεις της κίνησης του δοντιού.



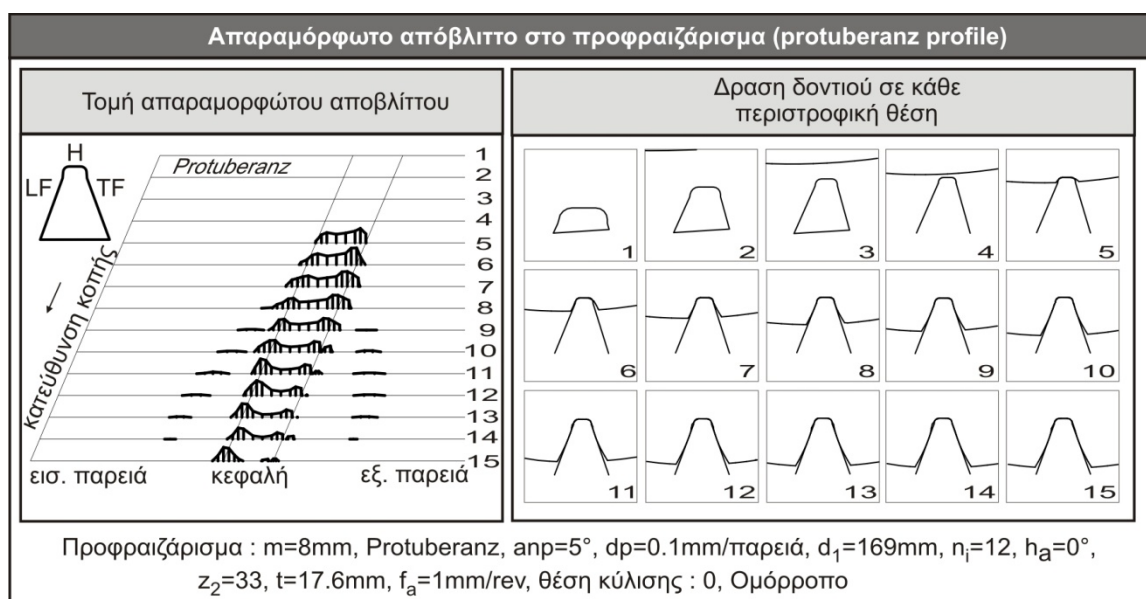
Σχήμα 3.9 : Δημιουργία κατακόρυφου επιπέδου αναφοράς.

Στάδιο 4

Μετά τη δημιουργία του κατακόρυφου επιπέδου αναφοράς, έγινε περιστροφή του κατακόρυφου επιπέδου ως προς τον άξονα περιστροφής από τον οποίο προήλθε, κατά γωνία **phi**, όπου **phi** ισούται με τη γωνία που έχει διαγράψει το δόντι του κοπτικού εργαλείου μέχρι την εκάστοτε θέση, δηλαδή **phi = θέση_i · d_phi**. Τα τελικά επίπεδα αναφοράς, πάνω στα οποία στη συνέχεια σχεδιάστηκε στο καθένα χωριστά το προφίλ του δοντιού του εργαλείου κοπής φαίνονται στο σχήμα 3.4. Η τοποθέτηση του προφίλ του δοντιού έγινε με γνώμονα ότι κατά την προσομοίωση της θέσης κύλισης 0, η μέση της κεφαλής του κοπτικού δοντιού βρίσκεται σε απόσταση μηδενική από τον κατακόρυφο άξονα, ενώ για κάθε άλλη θέση κύλισης η αντίστοιχη απόσταση ισούται με **dx₁ = θέση_κύλισης · ε**. Δηλαδή αν η προσομοίωση γίνεται για κάποιο θετικό δόντι του εργαλείου κοπής, η τοποθέτηση του προφίλ του δοντιού γίνεται δεξιά από τον κατακόρυφο άξονα σε απόσταση **dx₁** ενώ αντίστοιχα αν γίνεται για κάποιο αρνητικό δόντι η τοποθέτηση γίνεται σε απόσταση **-dx₁**.

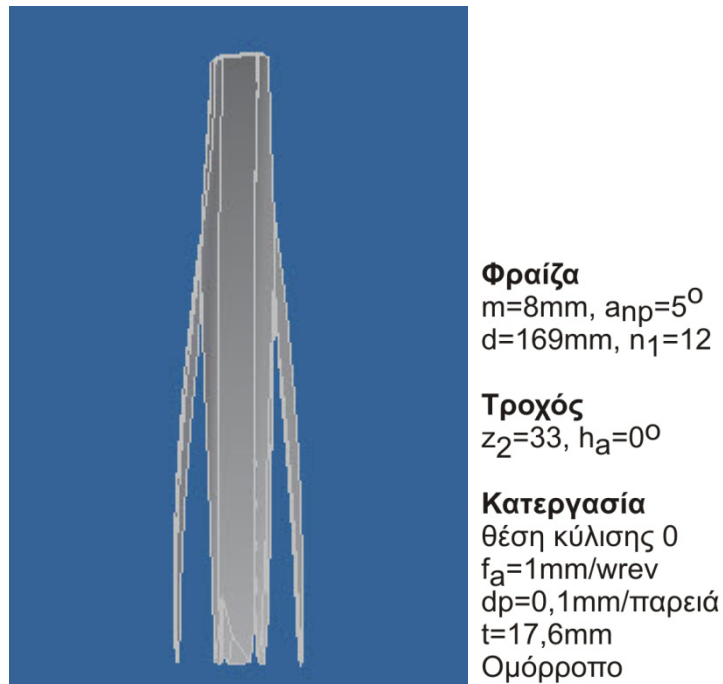
3.3 Προσδιορισμός αποβλίττων στο προφραιζάρισμα

Ο μεγαλύτερος όγκος αποβλίττων για τη δημιουργία των οδοντώσεων αφαιρείται στο προφραιζάρισμα με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (Protuberanz). Τα παραγόμενα απόβλιττα για μια τέτοια κατεργασία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10. Πάνω αριστερά στο σχήμα διακρίνεται το παραγωγικό τμήμα αποβλίττου για τη θέση κύλισης 0. Το παραγωγικό αυτό τμήμα του δοντιού έχει χωριστεί σε 15 διαδοχικά επίπεδα αναφοράς πάνω στα οποία είναι υπολογισμένες οι τομές (chip cross sections) του απαράμορφωτου αποβλίττου καθώς και τα αναπτύγματα αυτών των τομών με το Protuberanz προφίλ. Όπως είναι αναμενόμενο στο προφραιζάρισμα εκτός από τις δυο πλευρές του δοντιού του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή εισερχόμενη και εξερχόμενη παρειά, υπάρχει παραγόμενο απόβλιττο και από την κεφαλή του δοντιού, σε αντίθεση με το φραιζάρισμα αποφλοιώσης. Δεξιά στο σχήμα απεικονίζεται η διάταξη των 15 διαδοχικών θέσεων σχετικά με τον κατεργαζόμενο τροχό. Από αυτές τις ανακυκλούμενες θέσεις που εξεταστήκαν, είναι φανερό από σχήμα ότι μόνο οι 11 είναι ενεργές (5-15), δηλαδή συμβάλουν στην απομάκρυνση υλικού. Τα αποτελέσματα του σχήματος 3.10 προέρχονται από το λογισμικό του FRSSKIV που είχε αναπτυχθεί από άλλους ερευνητές.



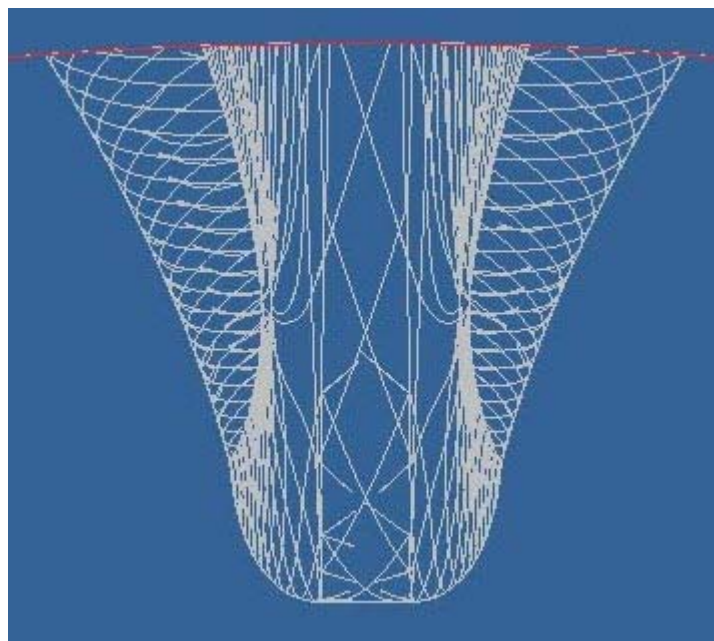
Σχήμα 3.10 : Υπολογισμός εγκάρσιων τομών αποβλίττου στο προφραιζάρισμα με εργαλείο με Protuberanz προφίλ.

Το αντίστοιχο απόβλιπτο για τη θέση κύλισης 0, που παράχθηκε κατά την προσομοίωση της κατεργασίας προφραιζάρισμα με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή στο CAD, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Όπως παρατηρείται, η μορφή του παραγόμενου αποβλίπτου παρουσιάζει περίπου την ίδια μορφή με αυτή του σχήματος 3.10, η ομοιότητα αυτή αποτελεί κριτήριο για την ορθότητα της προσομοίωσης της κατεργασίας.



Σχήμα 3.11 : Απόβλιπτο στο προφραιζάρισμα για τη θέση κύλισης 0.

Αφού πραγματοποιήθηκε διαδοχικά στο CAD η προσομοίωση της κατεργασίας προφραιζάρισμα για όλες τις θέσεις κύλισης του εργαλείου κοπής και για όσα περάσματα (μπασίματα) χρειάστηκε, δημιουργήθηκε η τελική μορφή της αυλάκωσης πάνω στον κατεργαζόμενο τροχό η οποία και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12.



Φραίζα

$m=8\text{mm}$, $\alpha_{hp}=5^\circ$
 $d=169\text{mm}$, $n_1=12$

Τροχός

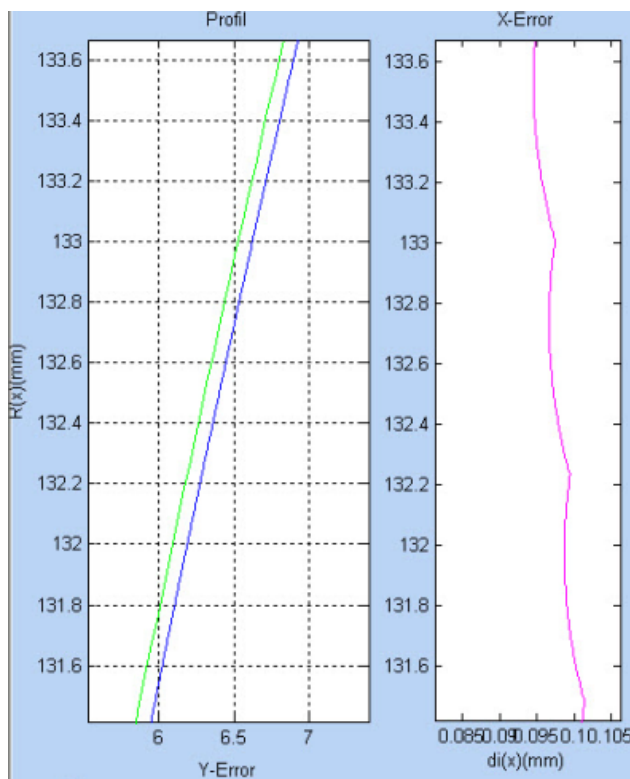
$z_2=33$, $h_a=0^\circ$

Κατεργασία

θέση κύλισης 0
 $f_a=1\text{mm/wrev}$
 $dr=0,1\text{mm/παρεία}$
 $t=17,6\text{mm}$
 Ομόρροπο

Σχήμα 3.12 : Η μορφή της τελικής αυλάκωσης στο προφραιζάρισμα με εργαλείο Protuberanz όπως δημιουργήθηκε στο CAD.

Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το εναπομένον πάχος που αφήνει το εργαλείο Protuberanz σε σχέση με την κοπή με κοπτική κατατομή κατά DIN 3972 II. Επίσης το πάχος που παραμένει στην παρεία είναι περίπου ίσο με το επιδιωκόμενο. Οι υπολογισμοί του σχήματος 3.13 έχουν γίνει μέσα από πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο m3 του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Φραίζα

$m=8\text{mm}$, $\alpha_{hp}=5^\circ$
 $d=169\text{mm}$, $n_1=12$

Τροχός

$z_2=33$, $h_a=0^\circ$

Κατεργασία

θέση κύλισης 0
 $f_a=1\text{mm/wrev}$
 $dr=0,1\text{mm/παρεία}$
 $t=17,6\text{mm}$
 Ομόρροπο

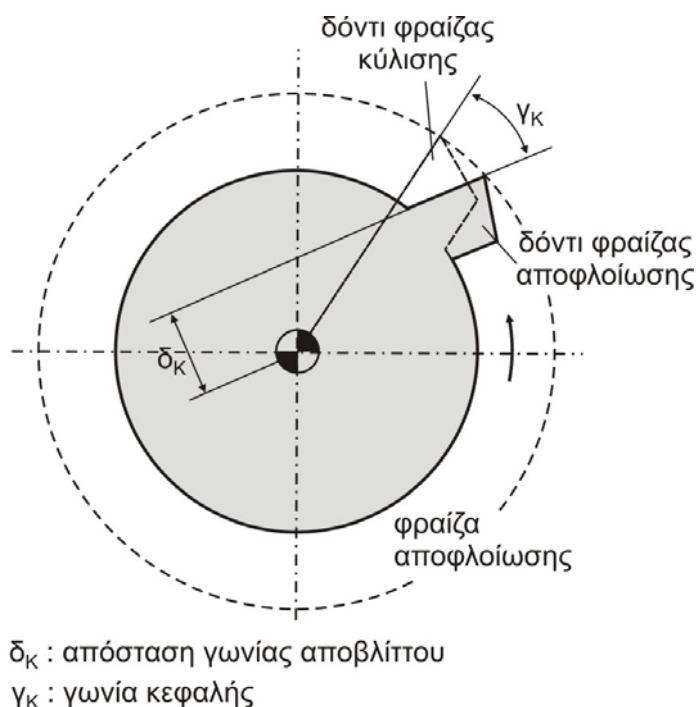
Σχήμα 3.13 : Η τελική μορφή της εισερχόμενης παρείας της αυλάκωσης μετά το πέρας κατεργασία του προφραιζαρίσματος(Protuberanz).

4. ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ (GEAR SKIVING)

Η κατεργασία αποφλοΐωσης με φραιζάρισμα με κύλιση (Gear Skiving), σαν τελική κατεργασία αποπεράτωσης της οδόντωσης, απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της κοπτικής κατατομής του κοπτικού εργαλείου. Αντίστοιχα με το φραιζάρισμα κύλισης οδοντώσεων με διορθωμένη κεφαλή παρουσιάζεται μια υπολογιστική διαδικασία για τον προσδιορισμό της κοπτικής κατατομής και των διεισδύσεων του κοπτικού εργαλείου στον κατεργαζόμενο τροχό.

4.1 Υπολογισμός κατατομής του κοπτικού δοντιού στο φραιζάρισμα αποφλοΐωσης με κύλιση

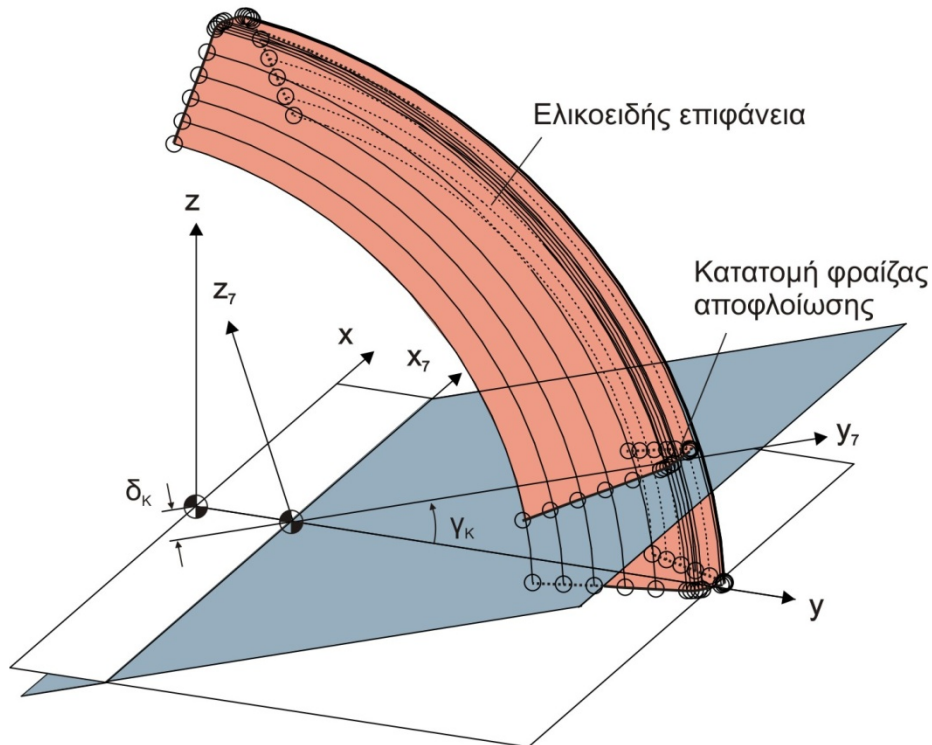
Η κοπτική κατατομή του εργαλείου του φραιζαρίσματος αποφλοΐωσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια της κινηματικής της κατεργασίας. Το κοπτικό δόντι διαγράφει στο χώρο την ίδια τροχιά με αυτήν του αντίστοιχου κοπτικού δοντιού στο φραιζάρισμα με κύλιση (Gear Hobbing). Μέσω αυτής της ιδιότητας υπολογίζεται η κοπτική κατατομή του φραιζαρίσματος αποφλοΐωσης από την αντίστοιχη κατατομή αναφοράς, με βασικά δεδομένα τη γωνία της κεφαλής γ_k καθώς και την αξονική απόσταση δ_k , όπως αυτά φαίνονται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 : Δεδομένα για τον υπολογισμό της κοπτικής κατατομής του εργαλείου για την κατεργασία της αποφλοΐωσης με φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων.

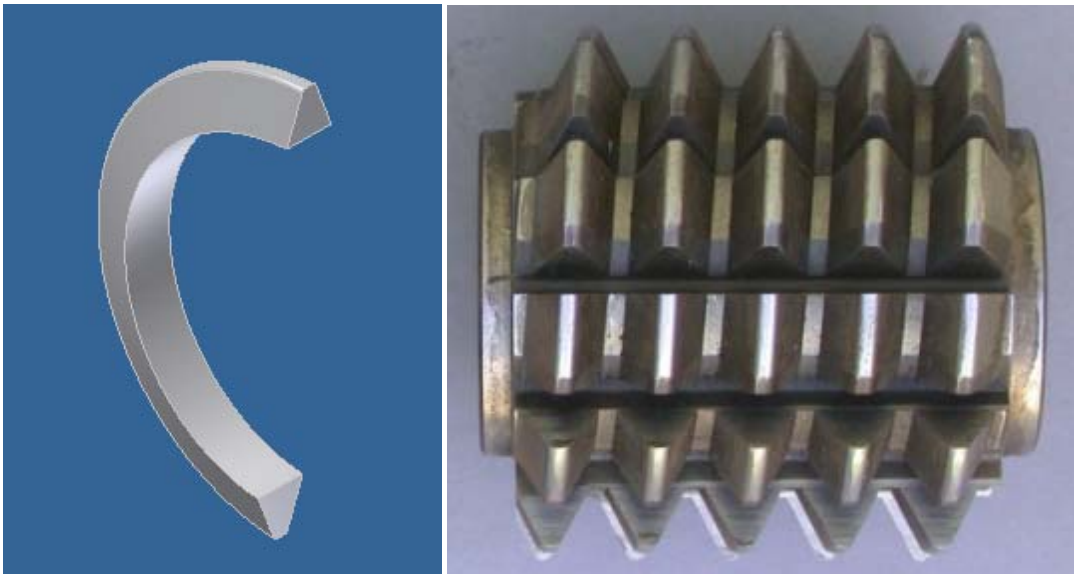
Η κοπτική κατατομή, για την αποφλοΐωση οδοντώσεων με κύλιση, προσδιορίζεται σαν η τομή της έλικας που διαγράφεται από την κίνηση της κοπτικής κατατομής με ένα επίπεδο που σχηματίζει διέδρη γωνία γ_k με το επίπεδο της κατατομής αναφοράς και απέχει απόσταση δ_k από τον άξονα περιστροφής. Το επίπεδο της τομής καθώς και η μορφή της ελικοειδούς επιφάνειας που διαγράφει η κατατομή αναφοράς παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.

Κατατομή αποφλοΐωσης



Σχήμα 4.2 : Υπολογισμός κοπτικής κατατομής φραιζαρίσματος αποφλοΐωσης.

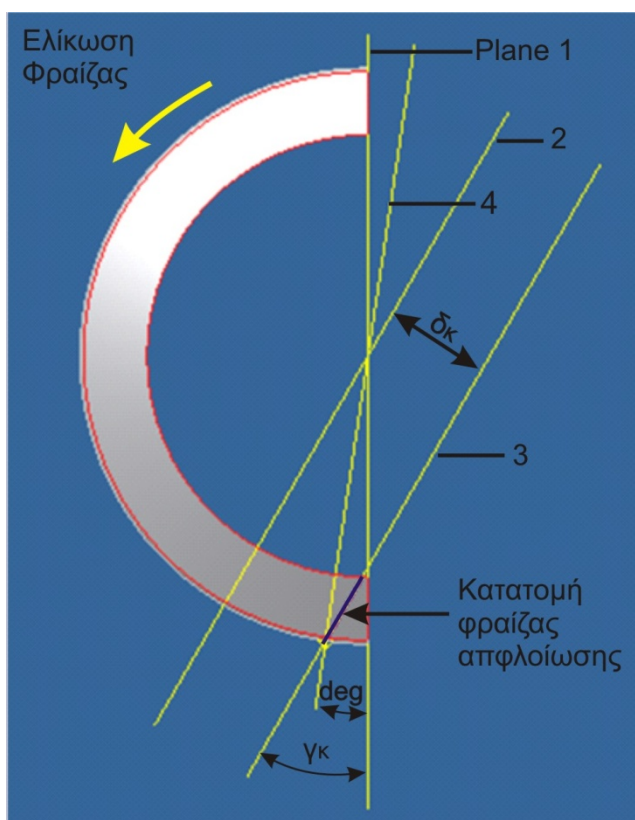
Κατά την προσομοίωση της κατεργασίας στο CAD, προκειμένου να δημιουργηθεί η κατατομή που θα έχει το εργαλείο κοπής για την κατεργασία φραιζαρίσματος αποφλοΐωσης με κύλιση (Gear skiving), δημιουργήθηκε μέσω κατάλληλου προγραμματισμού στο CAD η ελικοειδής επιφάνεια που διαγράφει μία φραιζα κυλίσεως όταν περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της. Δίνοντας λοιπόν στην εντολή δημιουργίας ελικοειδούς επιφάνειας τα κατάλληλα δεδομένα που αφορούν τη φραιζα κυλίσεως, δηλαδή τη γωνία ελίκωσης γ καθώς και την κατατομή αναφοράς του κοπτικού δοντιού στη σωστή θέση από τον άξονα περιστροφής δημιουργήθηκε όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 4.3](#), η κίνηση που διαγράφει η ελίκωση της φραιζας στον τρισδιάστατο χώρο.



Σχήμα 4.3 : Ελικοειδή επιφάνεια φραιζας κυλίσεως.

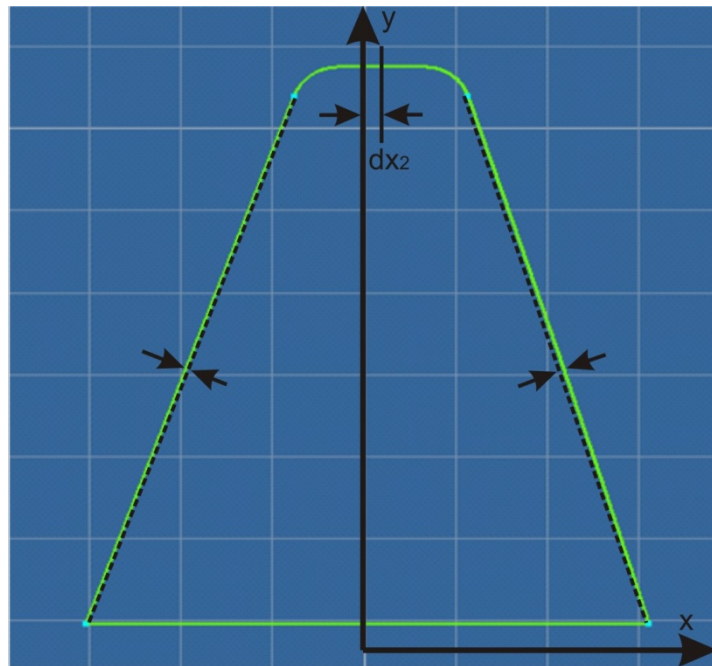
Σαν κατατομή αναφοράς για τη δημιουργία της ελικοειδούς επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε η κατατομή κατά **DIN 3972 II**.

Για τον προσδιορισμό της κοπτικής κατατομής του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης στο CAD, χρειάστηκε να τοποθετηθούν δυο επίπεδα αναφοράς σε κατάλληλες θέσεις, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Αρχικά τοποθετήθηκε το Plane 2 το οποίο σχηματίζει διέδρη γωνία γ_K με το επίπεδο της κατατομής αναφοράς, ενώ στην συνέχεια τοποθετήθηκε το επίπεδο αναφοράς Plane 3, παράλληλα, σε απόσταση δ_K από το Plane 2. Στη συνέχεια με κατάλληλο προγραμματισμό στο CAD υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού της τομής του Plane 3 με την ελίκωση της φραιζας κυλίσεως.



Σχήμα 4.4 : Υπολογισμός κοπτικής κατατομής φραιζαρίσματος αποφλοίωσης στο CAD.

Η, με αυτόν τον τρόπο, υπολογισμένη κοπτική κατατομή του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Από το σχήμα 4.5 γίνεται φανερό ότι η υπολογισμένη κατατομή δεν έχει ευθείες ακμές όπως η κατατομή κατά **DIN 3972 II**, αλλά καμπύλες. Η κοπτική κατατομή του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης δεν είναι συμμετρική και έτσι οι αποκλίσεις από την ευθεία κάθε παρειάς δεν έχουν την ίδια τιμή. Η μορφή της υπολογισμένης κατατομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, παρουσιάζεται με καμπύλες ακμές και μάλιστα και οι δύο παρειές είναι κοίλες. Η μέγιστη διαφορά από την ευθεία των καμπύλων κοπτικών ακμών εξαρτάται από τις τιμές των γ_K και δ_K .



Σχήμα 4.5 : Κοπτική κατατομή φραιζαρίσματος αποφλοίωσης στο CAD.

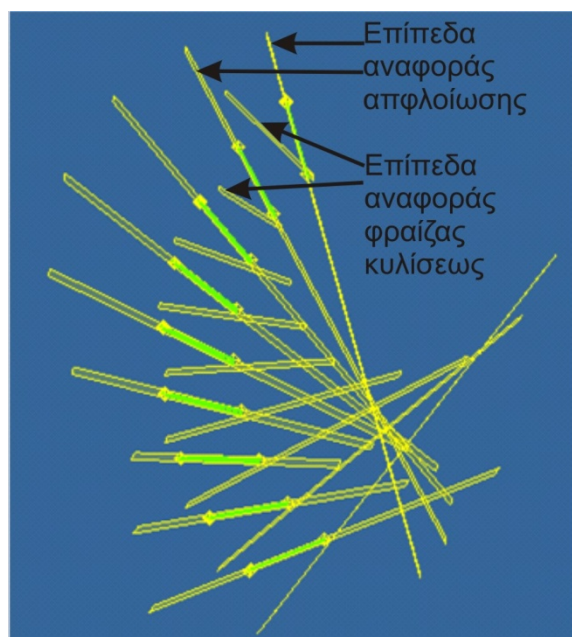
Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η γωνιακή διαφορά **deg** μεταξύ της κεφαλής της κατατομής φραιζας αποφλοίωσης που υπολογίστηκε, με την κατατομή της φραιζας κυλίσεως από την οποία και δημιουργήθηκε η ελίκωση του εργαλείου κοπής. Όταν η κατατομή της φραιζας κυλίσεως είναι τοποθετημένη ώστε η μέση της κεφαλής της να είναι σε μηδενική απόσταση από τον κατακόρυφο άξονα, λόγω της ελίκωσης ψ του εργαλείου κοπής και του γεγονότος ότι η κατατομή της φραιζας κυλίσεως προηγείται της κατατομής της φραιζας αποφλοίωσης, η κατατομή της αποφλοίωσης που υπολογίστηκε δεν θα είναι τοποθετημένη σε μηδενική απόσταση από τον κατακόρυφο άξονα αλλά η μέση της κεφαλής της θα βρίσκεται σε απόσταση dx_2 , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Η τιμή της απόστασης dx_2 ισούται με: $dx_2 = (deg \cdot e \cdot n_1) / 360$.

4.2 Περιγραφή της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου στην κατεργασία αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

Για την προσομοίωση της κινηματικής που διαγράφει το δόντι της φραιζας αποφλοίωσης στο CAD, ακολουθήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 για το προφραιζάρισμα, με εξαίρεση το στάδιο 4 όπου και παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δυο κατεργασιών.

Μετά τη δημιουργία των επιπέδων αναφοράς κυλίσεως που φαίνονται στο σχήμα 4.6, δημιουργήθηκαν τα επίπεδα αναφοράς της αποφλοίωσης (Gear skiving) με τον ίδιο τρόπο όπως δημιουργήθηκε το Plane 3 σε σχέση με το Plane 1 στο σχήμα 4.4 για δεδομένη γωνιά γ_k και απόσταση κατατομής αποβλίττου δ_k . Στην συνέχεια σε καθένα από τα επίπεδα αναφοράς αποφλοίωσης σχεδιάστηκε η κατατομή του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης του σχήματος 4.5. Όπως είναι γνωστό το κοπτικό δόντι κατά την κατεργασία φραιζαρίσματος αποφλοίωσης (Gear Skiving) διαγράφει στον χώρο την ίδια τροχιά με αυτήν του αντίστοιχου κοπτικού δοντιού στο φραιζάρισμα με κύλιση (Gear Hobbing) με διορθωμένη κεφαλή. Προκειμένου να ταυτίζονται οι τροχιές των δυο κατεργασιών, ήταν απαραίτητη η σωστή τοποθέτηση της κοπτικής κατατομής πάνω στα επίπεδα αναφοράς της αποφλοίωσης. Για τη σωστή τοποθέτηση λοιπόν, εκτός από τη μετακίνηση της κατατομής αποφλοίωσης λόγω της εκάστοτε θέσης κύλισης υπολογίστηκε και η μετατόπιση του προφίλ λόγω της γωνιακής διαφοράς μεταξύ των δυο κατεργασιών. Ο τύπος που δίνει τη σωστή τοποθέτηση της κοπτικής κατατομής είναι ο εξής:

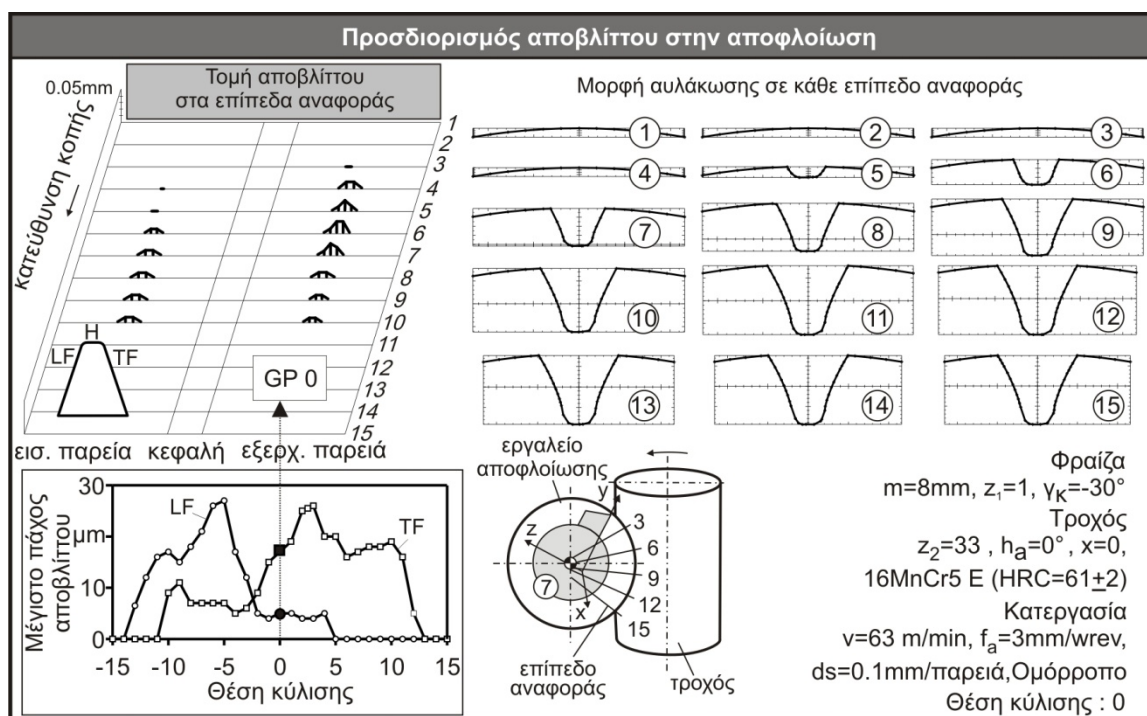
$x = dx_1 + dx_2$, όπου $dx_1 = \text{θέση_κύλισης} \cdot e$ και $dx_2 = (deg \cdot e \cdot n_1) / 360$.



Σχήμα 4.6 : Επίπεδα αναφοράς αποφλοΐωσης στο CAD.

4.3 Προσδιορισμός αποβλίττων στην αποφλοΐωση

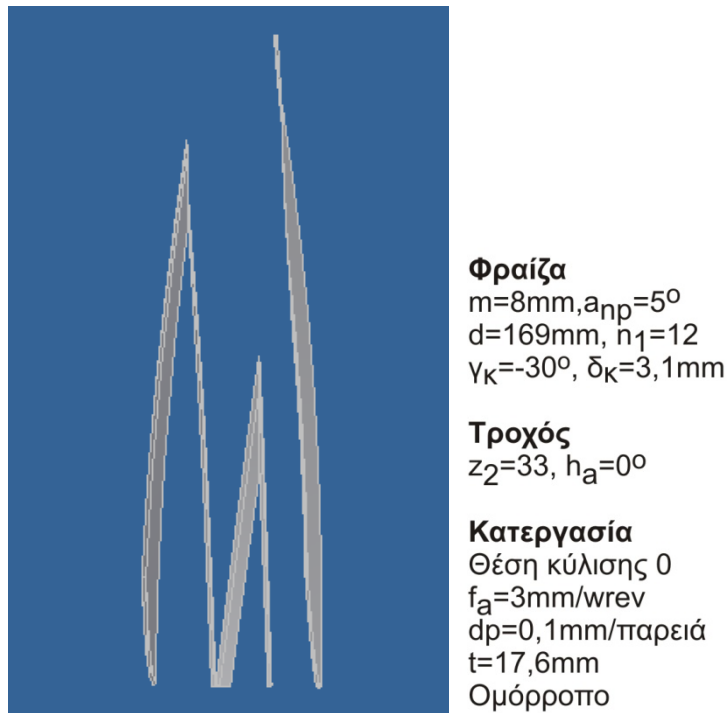
Η αποπεράτωση των οδοντώσεων με αποφλοΐωση με κύλιση γίνεται αφού έχει προηγηθεί η κοπή της οδόντωσης με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή. Στο φραιζάρισμα αποφλοΐωσης τα απόβλιττα που δημιουργούνται είναι πολύ μικρού πάχους. Έτσι οι αντίστοιχες δυνάμεις κοπής είναι πολύ μικρότερες από το φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων. Στο επάνω αριστερά τμήμα του σχήματος 4.7 παρουσιάζεται το παραγόμενο απόβλιττο από την κατεργασία της αποφλοΐωσης για τη θέση κύλισης 0. Τα αποτελέσματα του σχήματος 4.7 προέρχονται από το λογισμικό του FRSSKIV.



Σχήμα 4.7 : Απόβλιττο στην κατεργασία αποφλοΐωσης οδοντώσεων .

Όπως προαναφέρθηκε το εργαλείο του φραιζαρίσματος αποφλοίωσης δεν κόβει καθόλου απόβλιττο στην περιοχή της κεφαλής, μια και η βάση της οδόντωσης έχει διαμορφωθεί από το προφραιζάρισμα. Έτσι στο σχήμα 4.7 δεν παρουσιάζεται απόβλιττο στην περιοχή της κεφαλής της κοπτικής κατατομής της φραιζας αποφλοίωσης.

Στο σχήμα 4.8 φαίνεται το αντίστοιχο απόβλιττο που δημιουργήθηκε κατά την προσομοίωση στο CAD για τα δεδομένα που παρουσιάζονται δεξιά στο κάτω μέρος του σχήματος 4.7. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 η κοπτική κατατομή έκτος από τις παρειές δείχνει ότι κόβει και στην κεφαλή, ωστόσο όπως υπολογίστηκε μέσα από το CAD, το πάχος του αποβλίττου στην κεφαλή είναι σχεδόν αμελητέο (της τάξης των 2-3 μm).

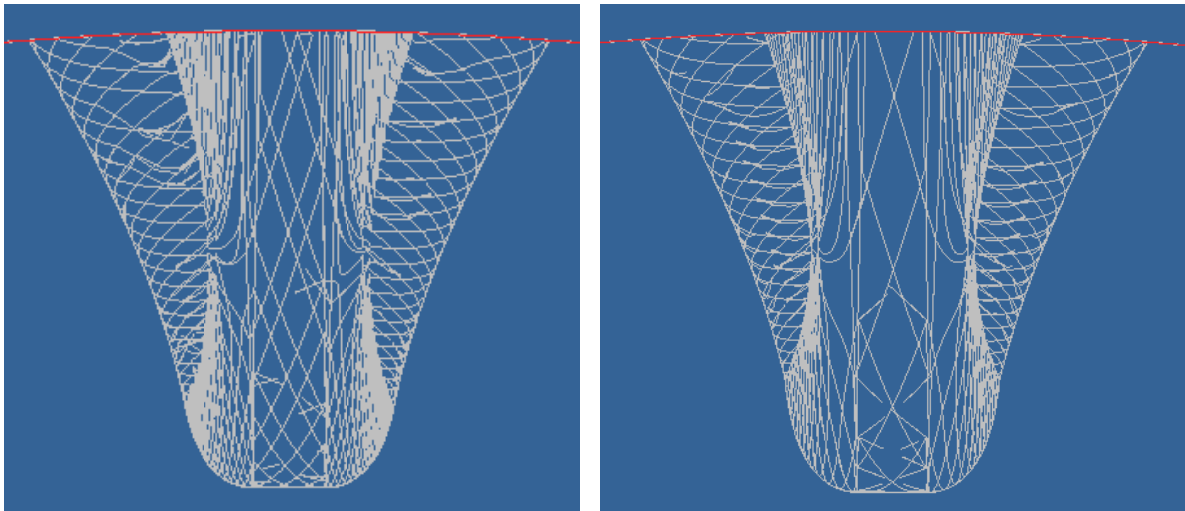


Σχήμα 4.8 : Απόβλιττο στην αποφλοίωση για τη θέση κύλισης 0.

Όπως παρατηρείται η μορφή του παραγόμενου αποβλίττου στο CAD παρουσιάζει περίπου την ίδια μορφή με αυτή του σχήματος 4.7, η ομοιότητα αυτή αποτελεί κριτήριο για την ορθότητα της προσομοίωσης της κατεργασίας.

Τα απόβλιττα στο φραιζάρισμα αποφλοίωσης είναι εξαιρετικά μικρού πάχους (της τάξης των 10-30 μm). Αριστερά στο κάτω μέρος του σχήματος 4.7 παρουσιάζεται το μέγιστο πάχος αποβλίττου που εμφανίζεται ανά θέση κύλισης. Το εργαλείο για την αποφλοίωση απομακρύνει ανά παρεία το ίδιο πάχος υλικού και το αναμενόμενο μέγιστο πάχος αποβλίττου είναι περίπου ίδιο για τις δυο παρείες του κοπτικού δοντιού.

Αφού πραγματοποιήθηκε διαδοχικά στο CAD η προσομοίωση της κατεργασίας αποφλοίωσης για όλες τις θέσεις κύλισης του εργαλείου κοπής και για όσα περάσματα (μπασίματα) χρειάστηκε, δημιουργήθηκε η τελική μορφή της αυλάκωσης πάνω στον κατεργαζόμενο τροχό η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9. Παρατηρώντας τη μορφή της τελικής αυλάκωσης μετά την κατεργασία της αποφλοίωσης, είναι φανερό η διαφορά με την αντίστοιχη αυλάκωση του κατεργαζόμενου τροχού πριν την αποφλοίωση.



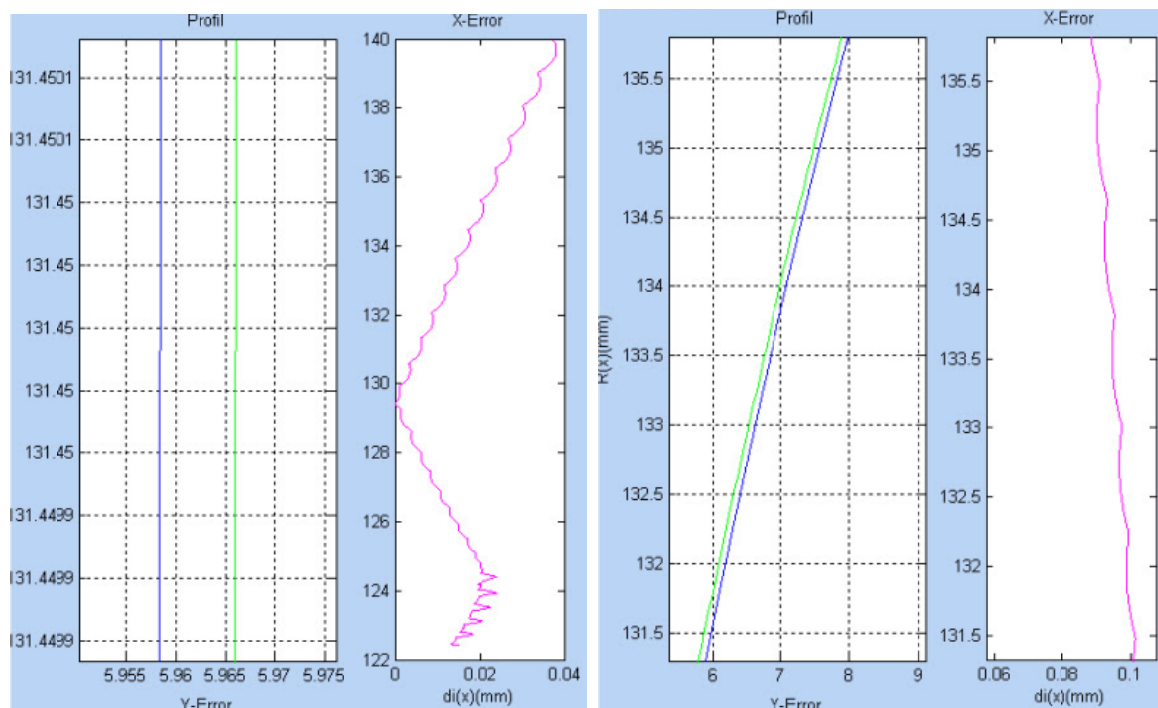
Φραιζα : θέση κύλισης 0, $m=8\text{mm}$, $d_h=169\text{mm}$, $n_1=12$, $\gamma_k=-30^\circ$, $\delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός : $z_2=33$, $h_a=0^\circ$

Κατεργασία : $f_a=3\text{mm/wrev}$, $dp=0,1\text{mm/παρειά}$, $t=17,6\text{mm}$, Ομόρροπο

Σχήμα 4.9 : Αριστερά η μορφή της τελικής αυλάκωσης μετά το πέρας της αποφλοΐωσης και δεξιά πριν την αποφλοΐωση.

Στο σχήμα 4.10 αριστερά, παρουσιάζεται η τελική μορφή της εισερχόμενης παρειάς της αυλάκωσης μετά την αποφλοΐωση. Όπως παρατηρείται η μέγιστη διαφορά μεταξύ της κοπής με κοπτική κατατομή κατά DIN 3972 II και του εργαλείου της αποφλοΐωσης είναι της τάξης του $0,04\text{mm}$. Δεξιά στο σχήμα 4.10 φαίνεται το εναπομένον πάχος που αφήνει το εργαλείο Protuberanz σε σχέση με την κοπή με κοπτική κατατομή κατά DIN 3972 II. Τα δεδομένα κατεργασίας είναι ίδια με αυτά του σχήματος 4.9. Οι υπολογισμοί του σχήματος 4.10 έχουν γίνει μέσα από πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο m3 του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Σχήμα 4.10 : Αριστερά η τελική μορφή της εισερχόμενης παρειάς της αυλάκωσης μετά το πέρας της αποφλοΐωσης και δεξιά η αντίστοιχη παρειά μετά την κατεργασία του προφραιζαρίσματος(Protuberanz).

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της κατεργασίας. Συγκεκριμένα αφού δημιουργήθηκε ο κώδικας για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας, στη συνέχεια προσομοιώθηκαν έξι διαφορετικές περιπτώσεις για τη δημιουργία των αποβλίπτων και κατ επέκταση των αυλακώσεων. Οι περιπτώσεις για τις οποίες έγιναν προσομοιώσεις αφορούν έξι διαφορετικές τιμές της αξονικής πρόωσης f_a (mm/wrev) από -3mm/wrev μέχρι και 3mm/wrev. Τα υπόλοιπα δεδομένα πλην της πρόωσης f_a και για τις έξι περιπτώσεις παρέμειναν ίδια.

Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος είχαν ως εξής:

Φραίζα:

- Modul $m=8$ (mm)
- Εξωτερική Διάμετρος $d_h=169$ (mm)
- Γωνία πίεσης 20 (deg)
- Στήλες $n_1=12$
- Απόσταση $e=2,094$ (mm)
- Γωνία ελίκωσης $\gamma=3,077$ (deg)
- Γωνία κεφαλής $\gamma_k = -30$ (deg)
- Απόσταση επιφάνειας αποβλίπτου $\delta_k = -3,1$ (mm)

Τροχός:

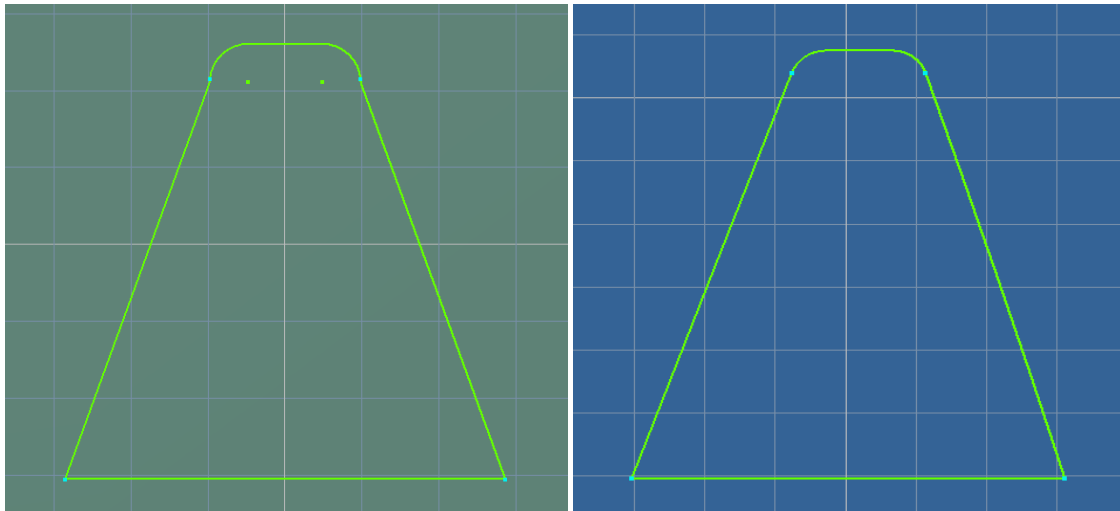
- Γωνία ελίκωσης $h_a=0$ (deg)
- Πλάτος $w=160$ (mm)
- Αριθμός δοντιών $z_2=33$
- Εξωτερική διάμετρος $d_g=280$ (mm)

Κατεργασία: Βάθος κοπής $t=17,6$ (mm)

Δεδομένα προσομοίωσης:

- Πρώτο κοπτικό δόντι το -30
- Τελευταίο κοπτικό δόντι το 30
- Περάσματα (μπασίματα) 2
- Γωνία μεταξύ επιπέδων αναφοράς $d_phi=2$ (deg)

Στο σχήμα 5.1 παραθέτονται οι κοπτικές κατατομές με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις για το προφραιζάρισμα και την αποφλοίωση.



Σχήμα 5.1 : Αριστερά η μορφή της κατατομής για το προφραιζάρισμα (Protuberanz) και δεξιά η κατατομή της αποφλοίωσης.

Στη συνέχεια για κάθε τιμή της πρόωσης (-3mm/wrev έως 3mm/wrev) παρουσιάζονται οι τελικές αυλακώσεις των δυο κατεργασιών στη δεξιά και στην αριστερή παρειά καθώς και τα παραγόμενα απόβλιττα τόσο στο προφραιζάρισμα όσο και στην αποφλοίωση. Στους πίνακες αποβλίττων φαίνονται οι θέσεις κύλισης οι οποίες ήταν ενεργές, δηλαδή πραγματοποίησαν κοπή.

Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ, a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}, n_1=12, z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ, \delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

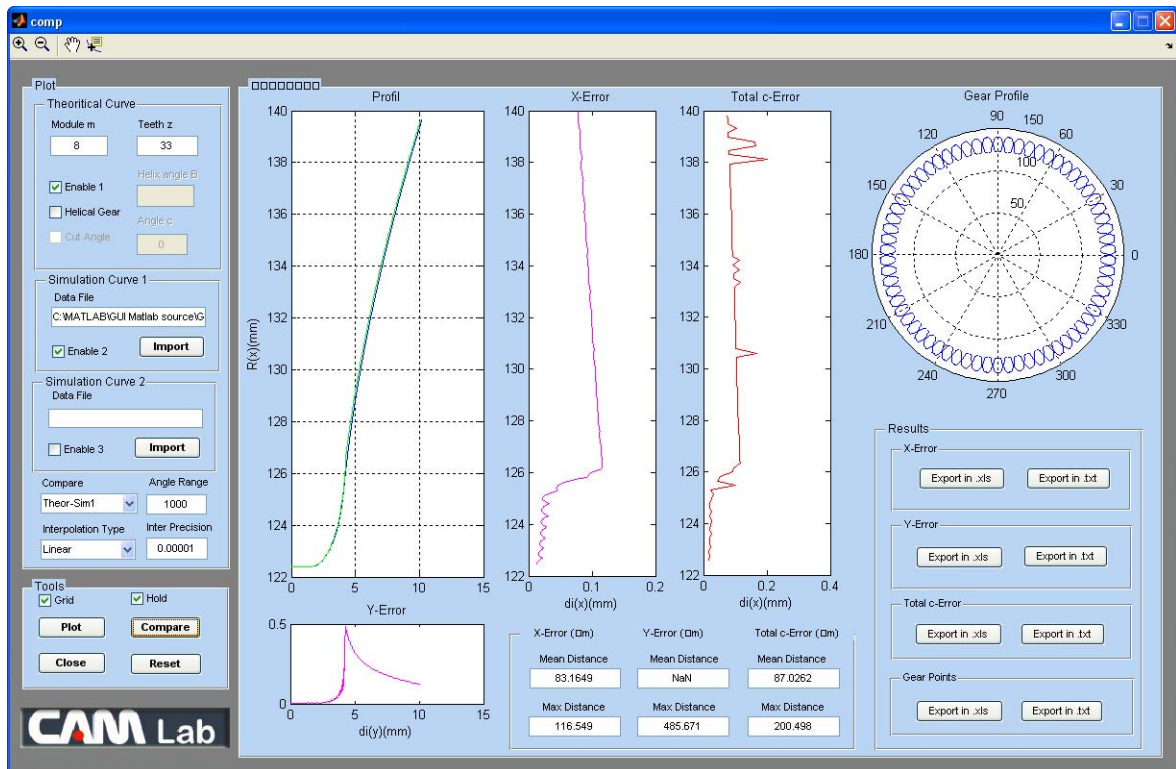
$z_2=33, h_a=0^\circ$

Κατεργασία

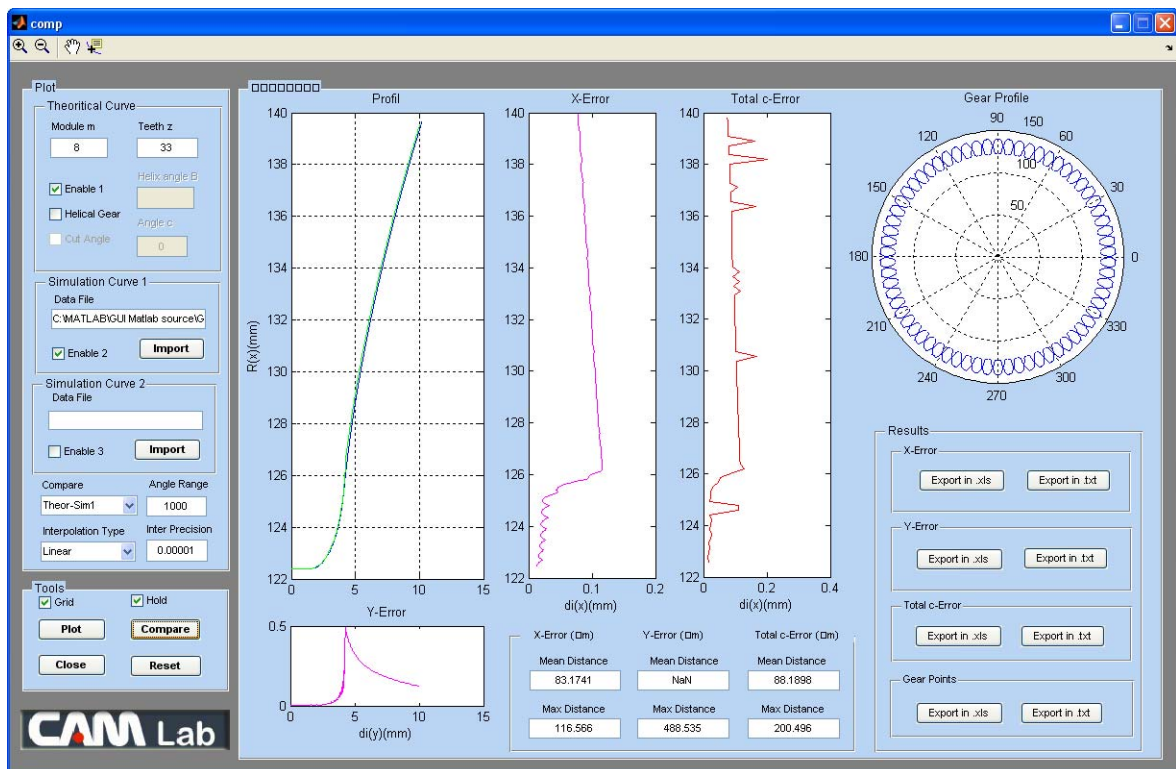
$dp=0,1\text{mm/παρειά}$

$f_a=3\text{mm/wrev}, \text{Ομόρροπο}$

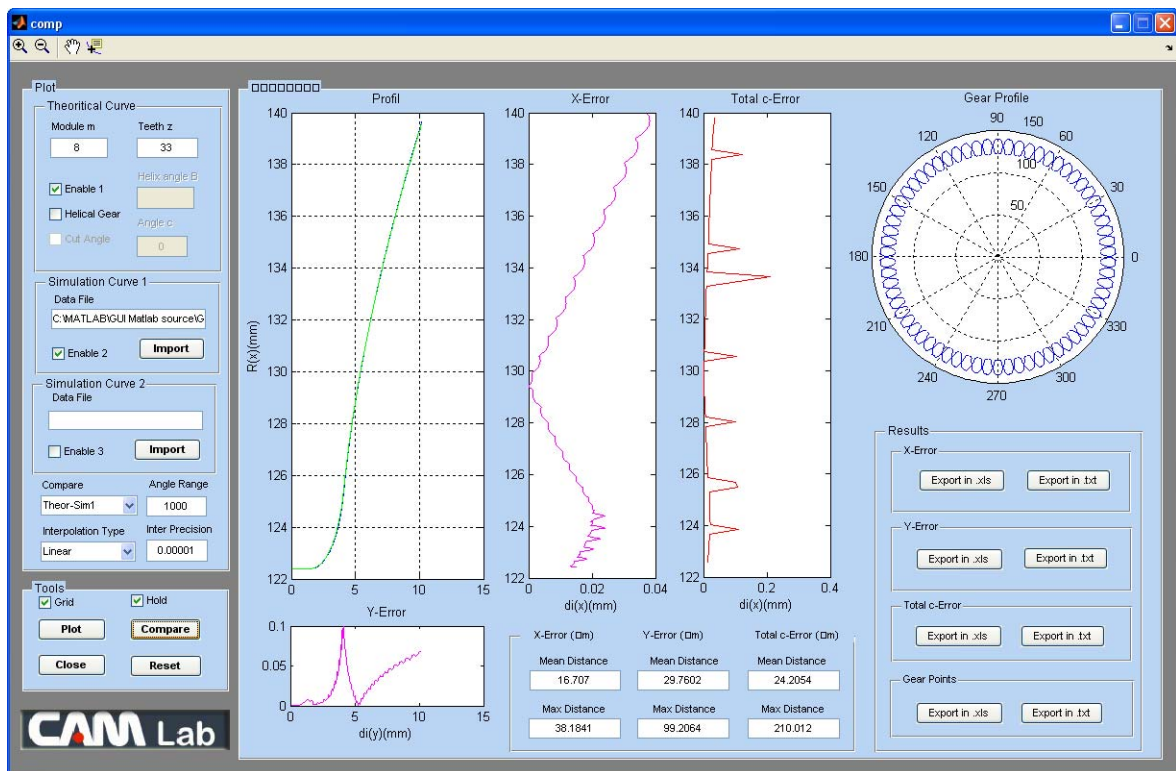
Εισερχόμενη παρειά



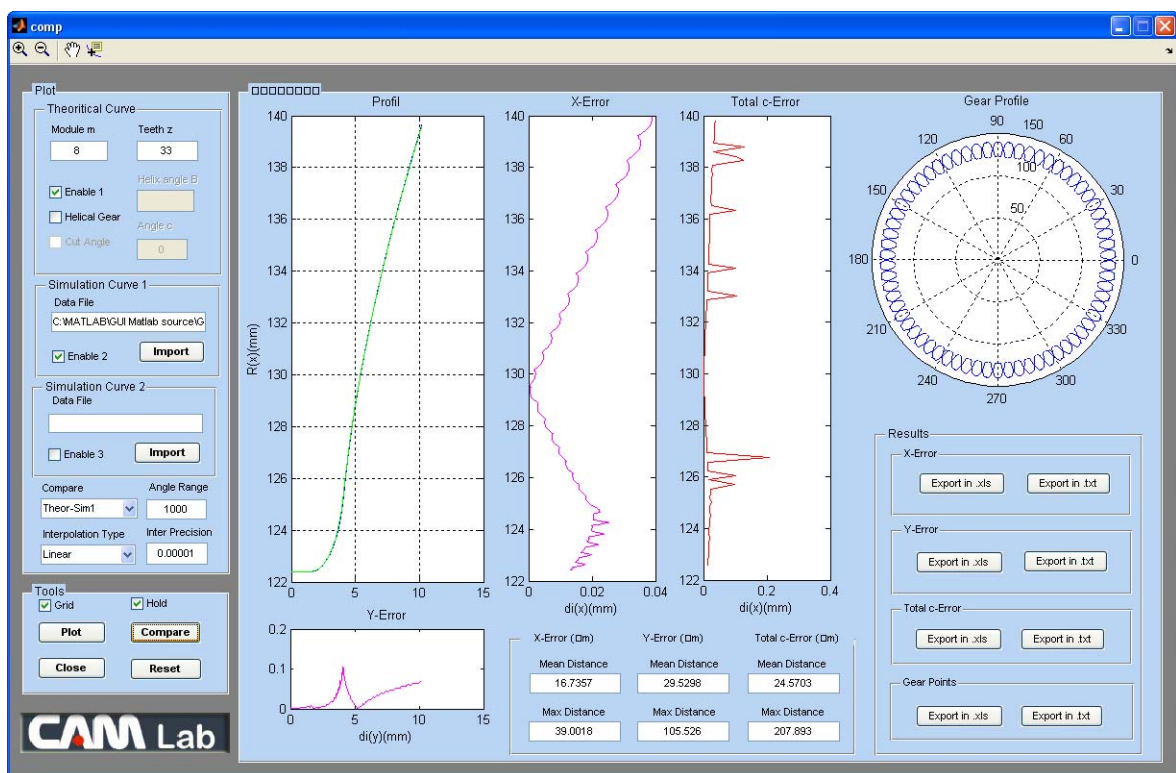
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ, a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}, n_1=12, z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ, \delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

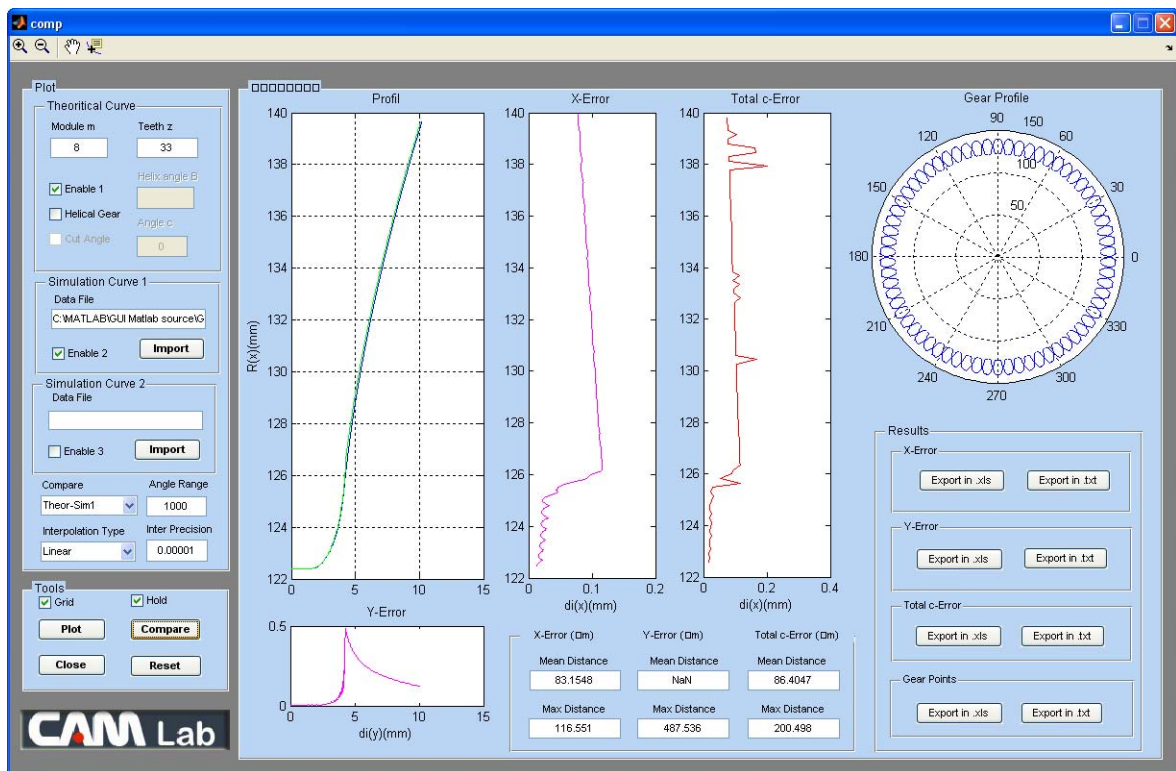
$z_2=33, h_a=0^\circ$

Κατεργασία

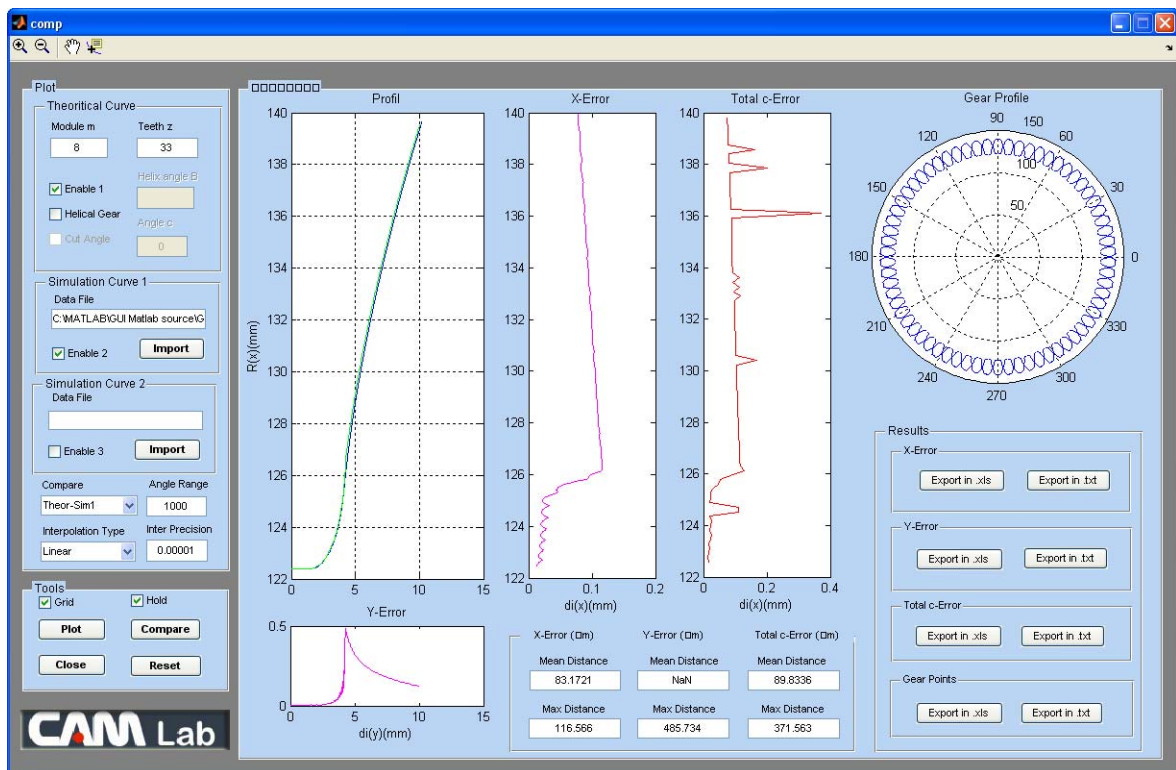
$dp=0,1\text{mm/παρειά}$

$f_a=2\text{mm/wrev}, \text{Ομόρροπο}$

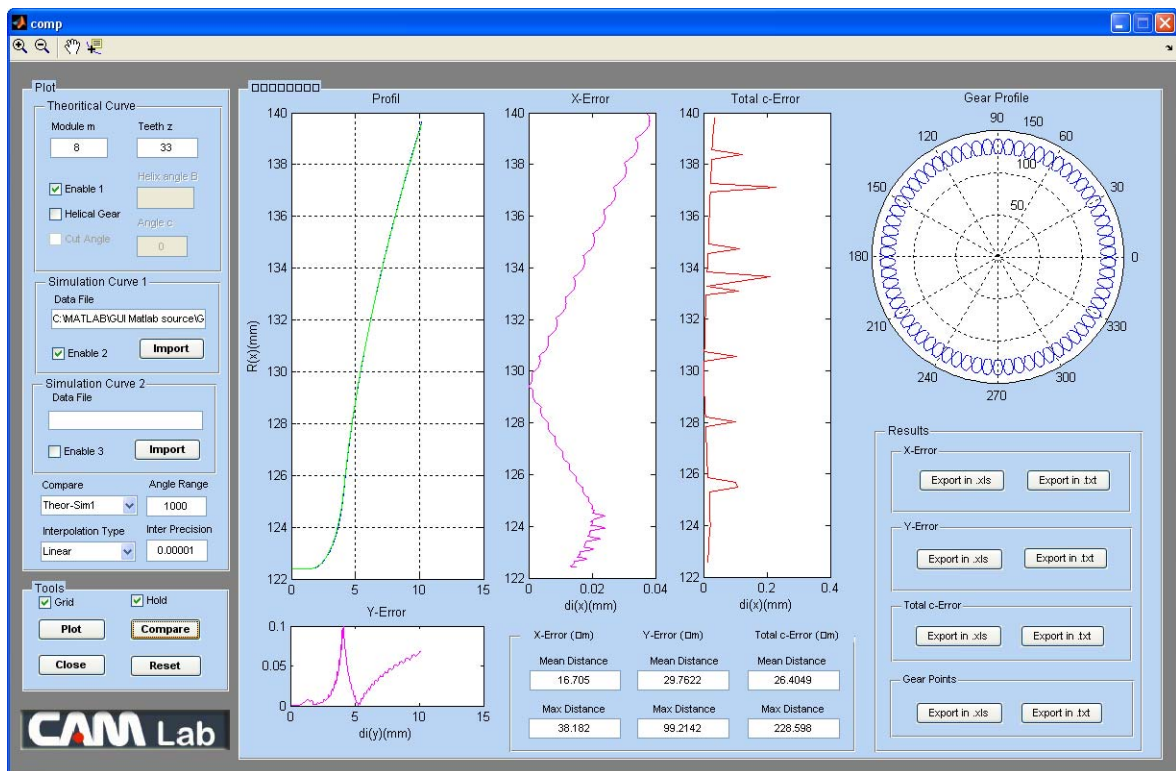
Εισερχόμενη παρειά



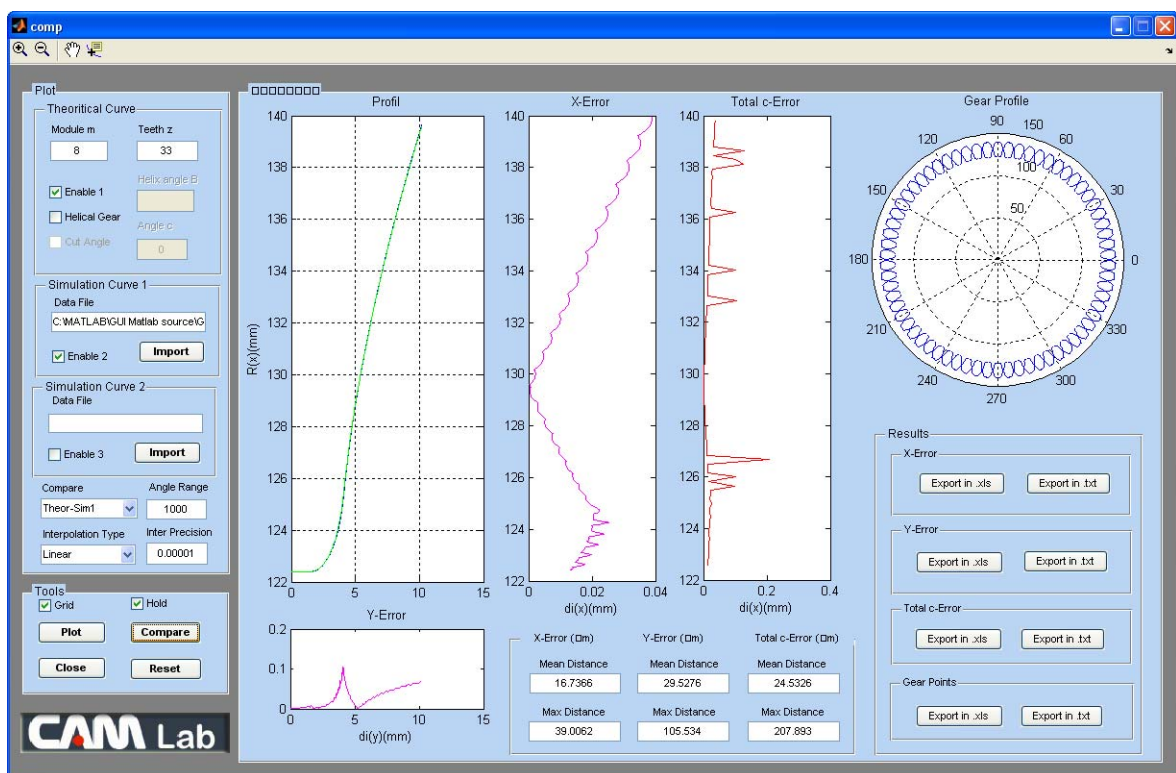
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ, a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}, n_1=12, z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ, \delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

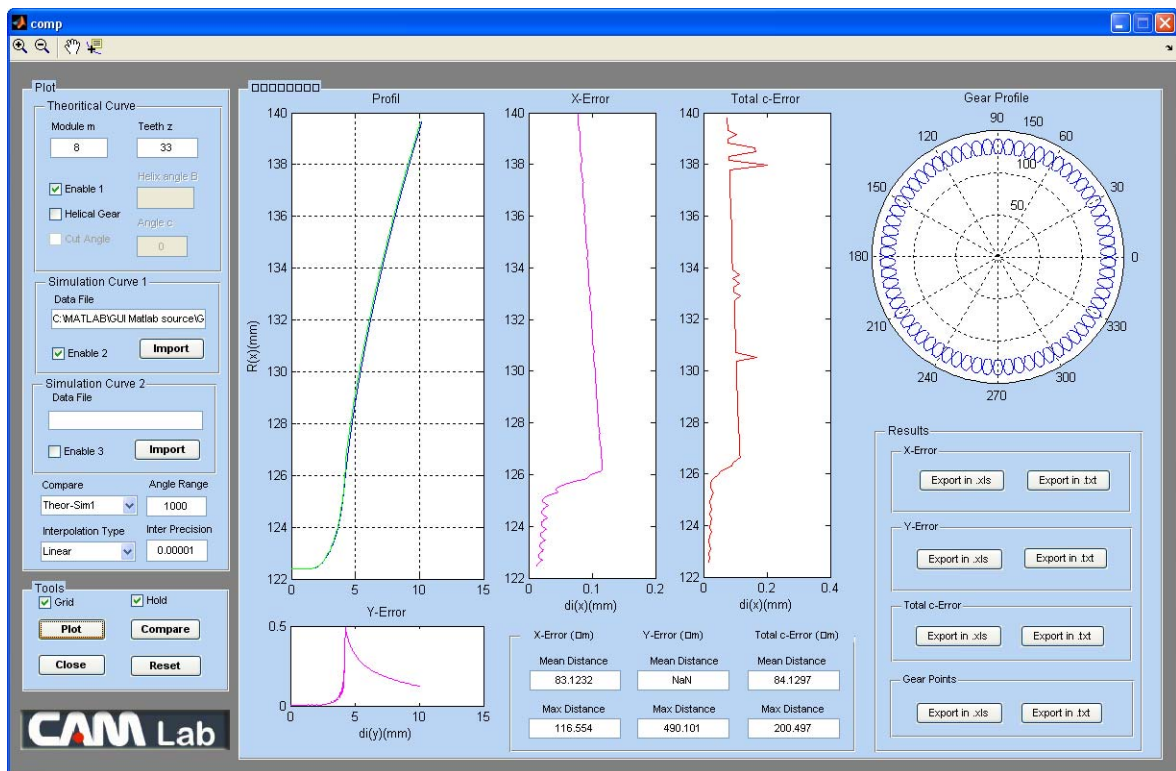
$z_2=33, h_a=0^\circ$

Κατεργασία

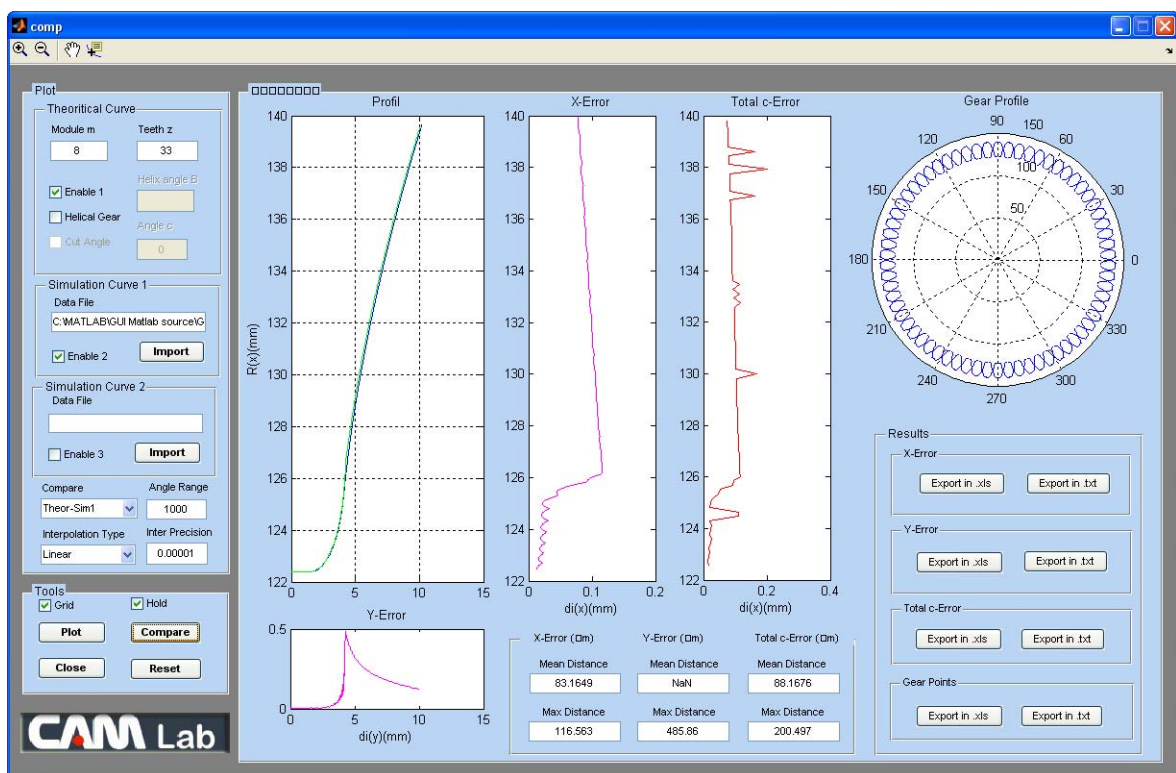
$dp=0,1\text{mm}/\text{παρειά}$

$f_a=1\text{mm}/\text{wrev}, \text{Ομόρροπο}$

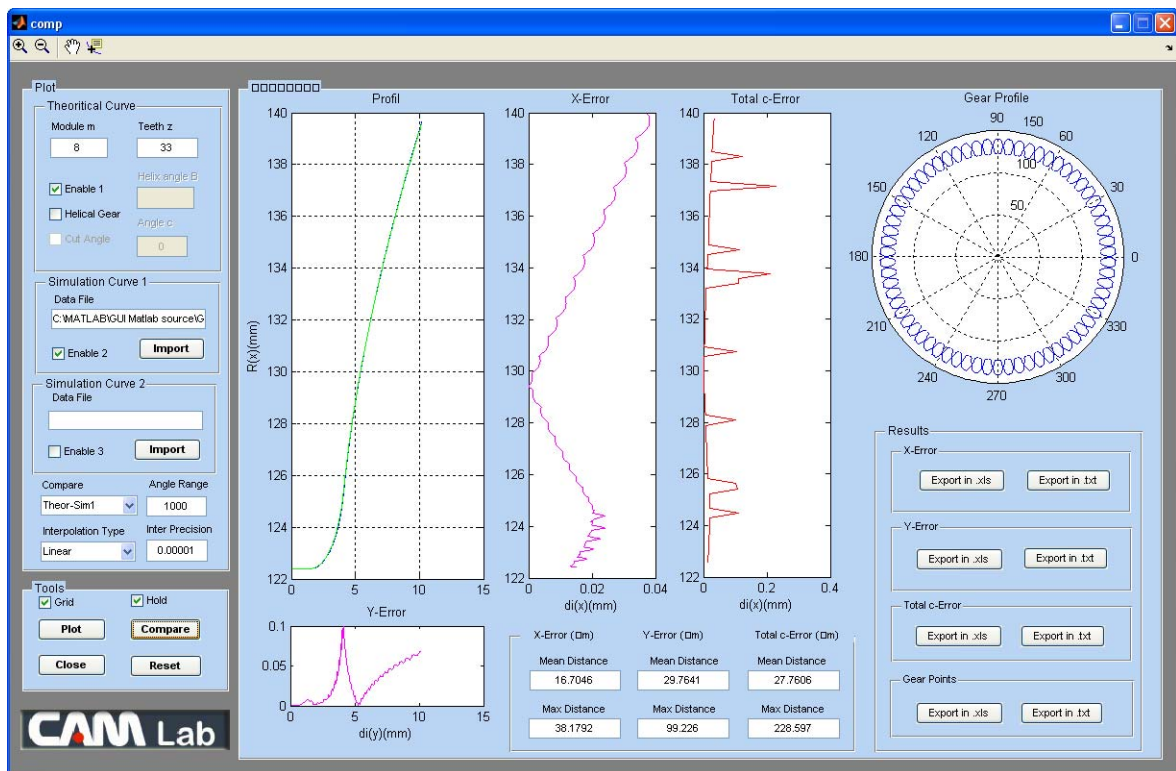
Εισερχόμενη παρειά



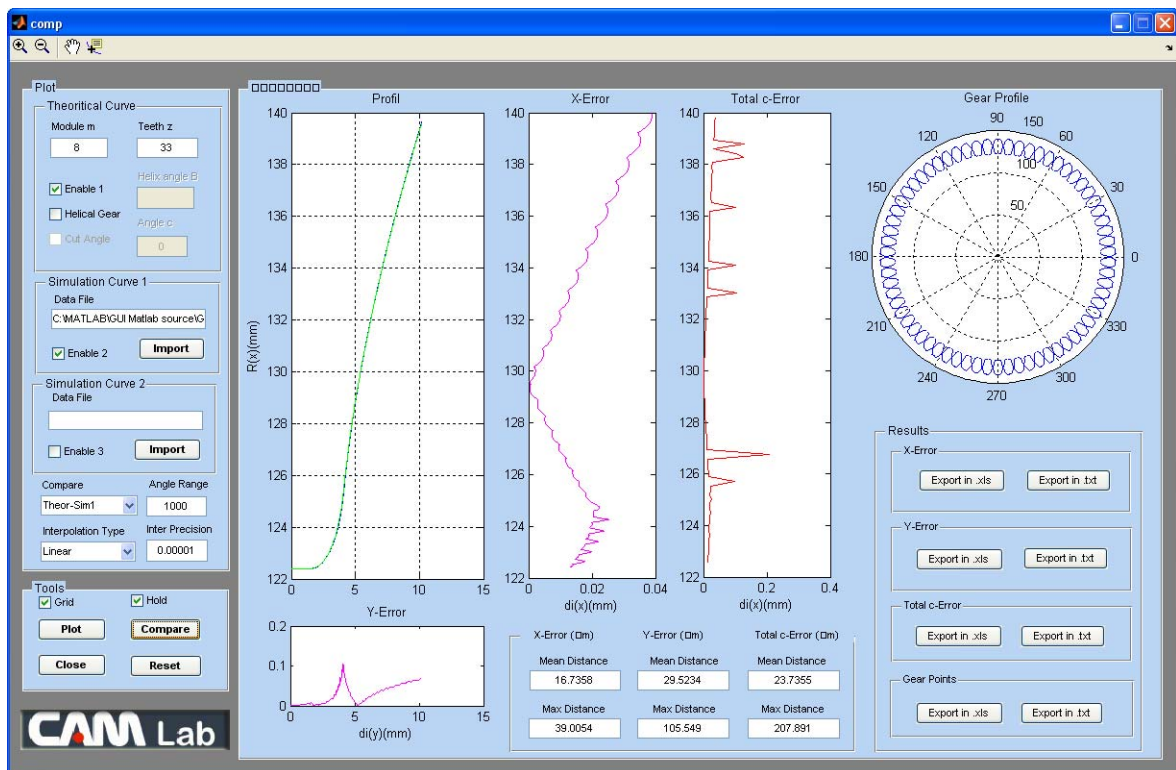
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ, a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}, n_1=12, z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ, \delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

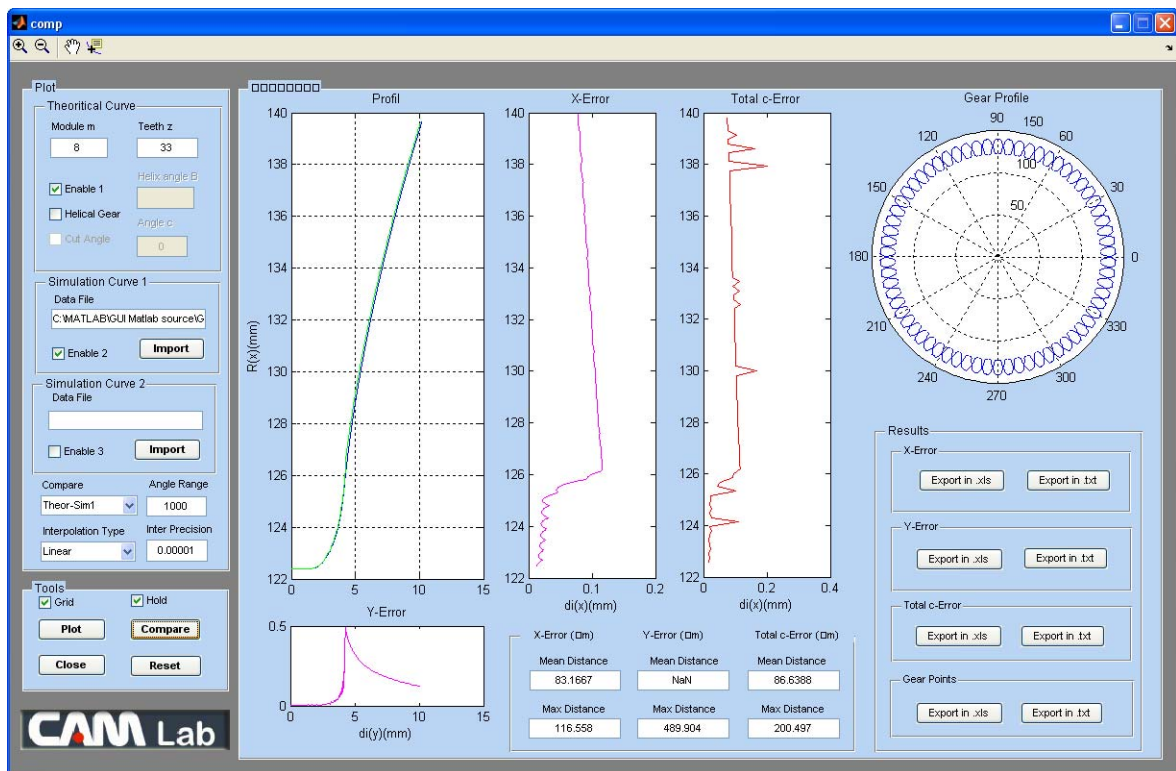
$z_2=33, h_a=0^\circ$

Κατεργασία

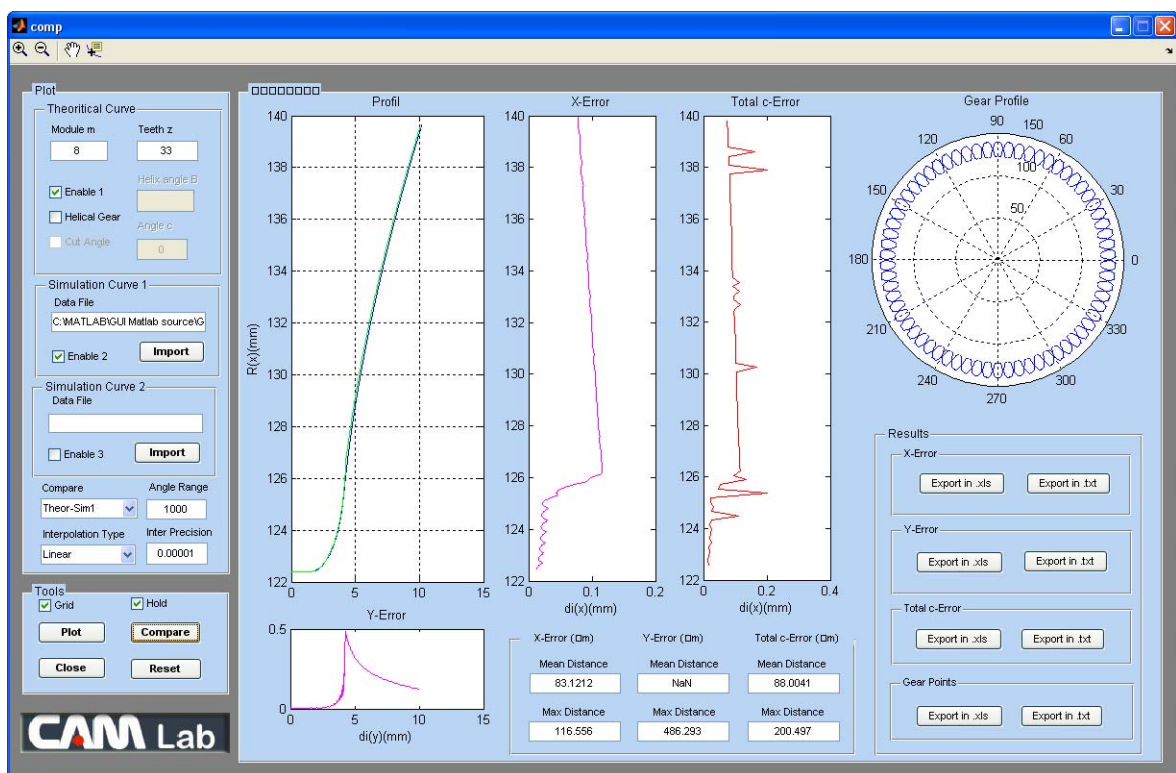
$dp=0,1\text{mm/παρειά}$

$f_a=-1\text{mm/wrev}$, Αντίρροπο

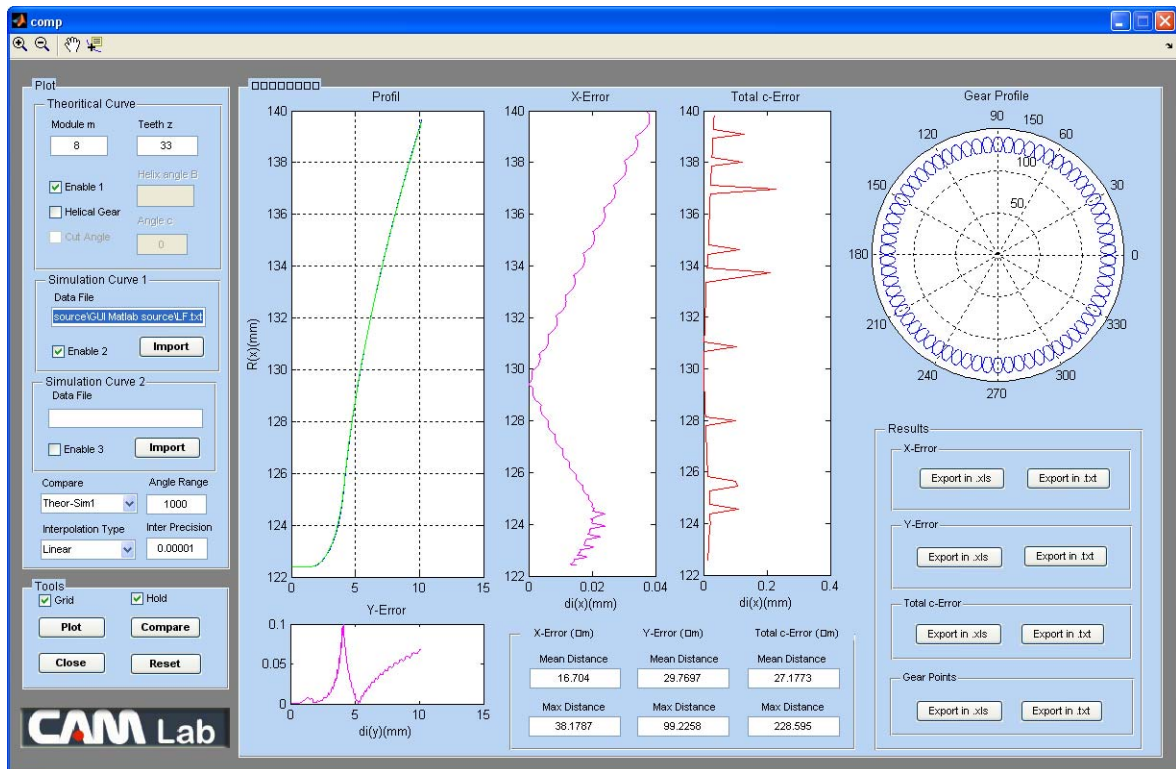
Εισερχόμενη παρειά



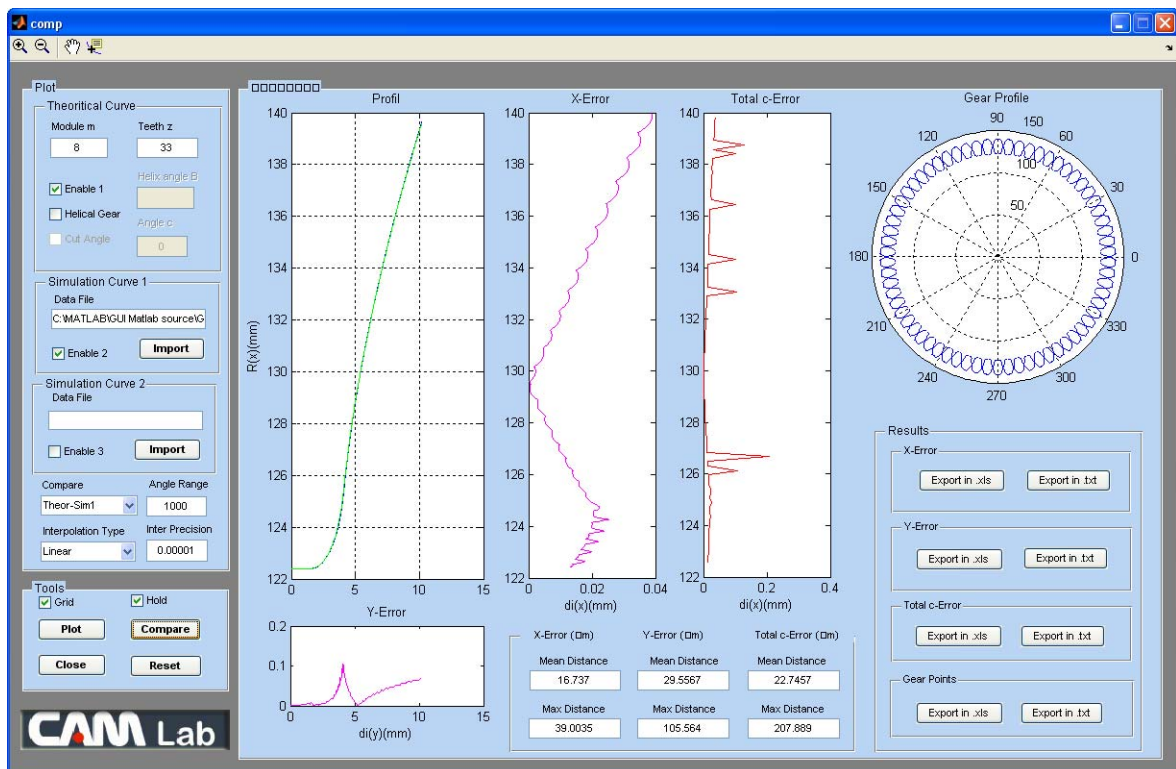
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ$, $a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}$, $n_1=12$, $z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ$, $\delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

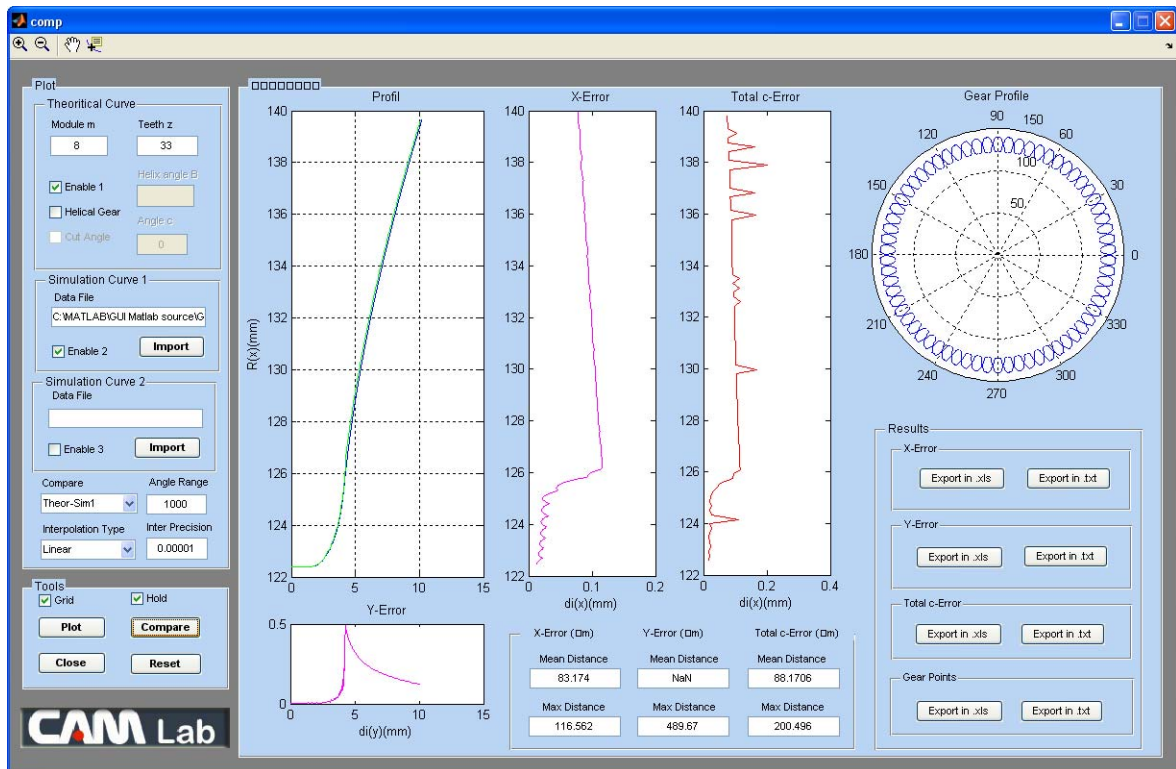
$z_2=33$, $h_a=0^\circ$

Κατεργασία

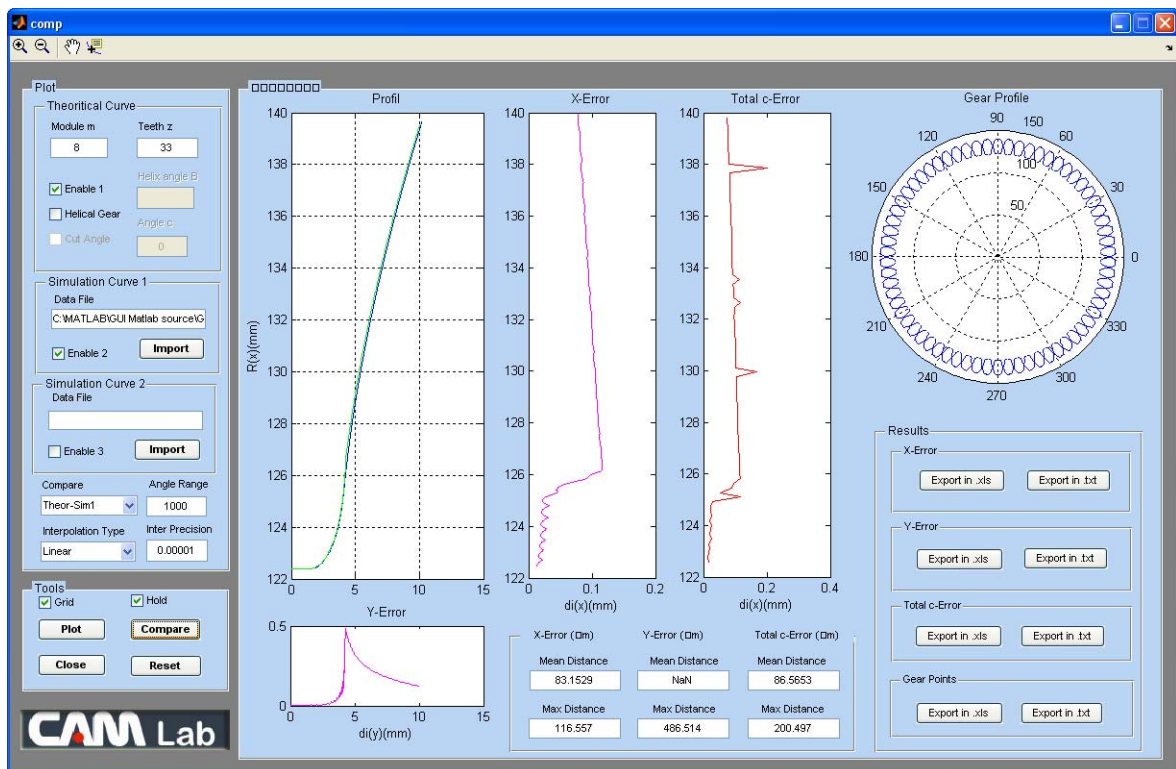
$dp=0,1\text{mm/παρειά}$

$f_a=-2\text{mm/wrev}$, Αντίρροπο

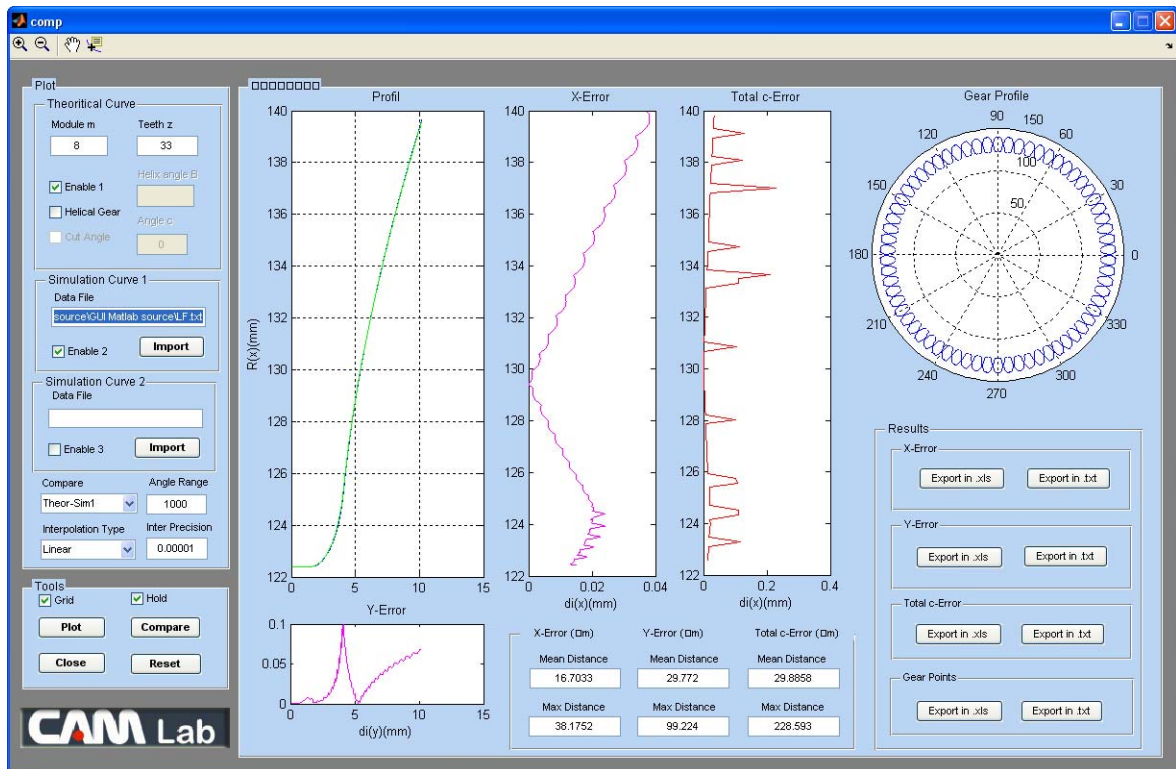
Εισερχόμενη παρειά



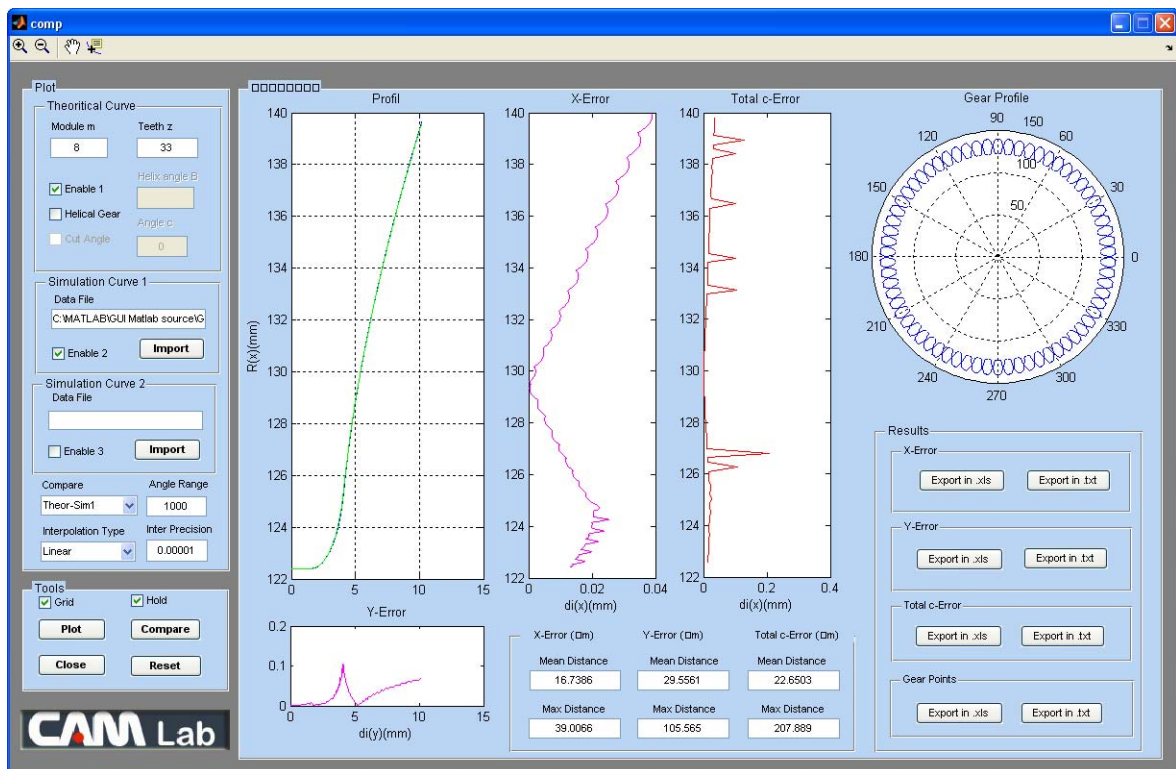
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



Φραίζα

$m=8\text{mm}$

$a_{np}=5^\circ, a_{no}=20^\circ$

$d_h=169\text{mm}, n_1=12, z_1=1$

$\gamma_k=-30^\circ, \delta_k=3,1\text{mm}$

Τροχός

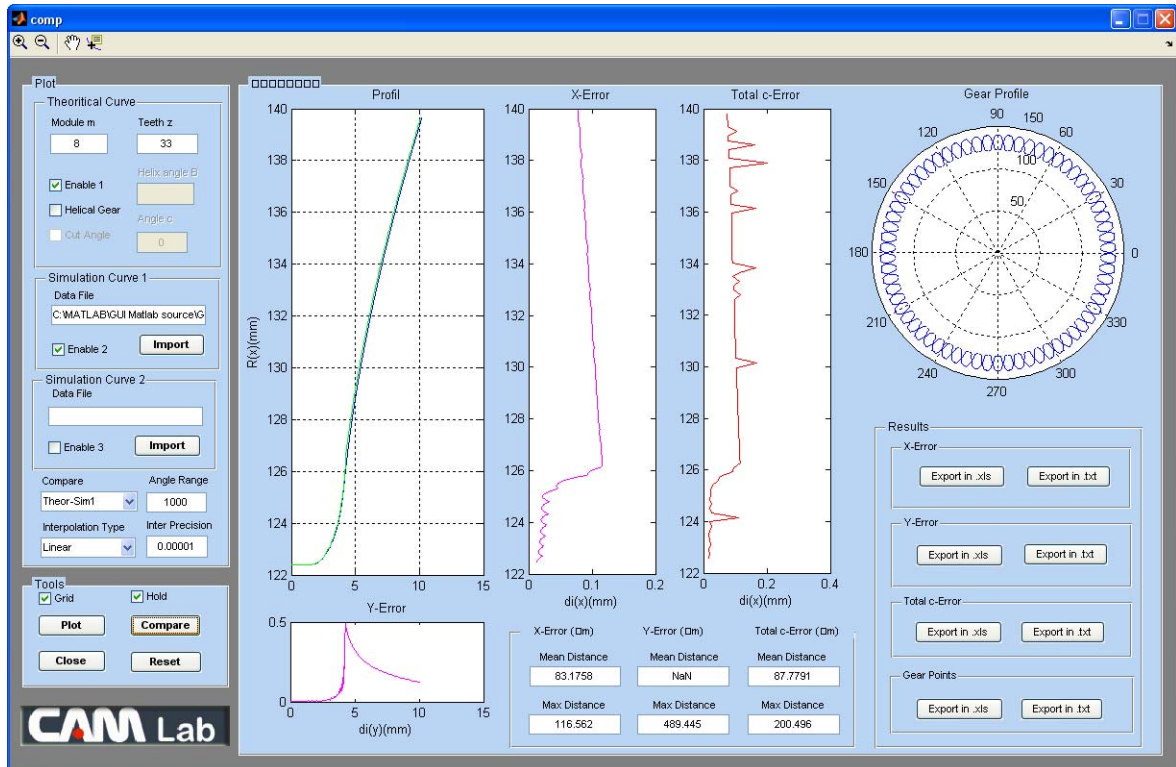
$z_2=33, h_a=0^\circ$

Κατεργασία

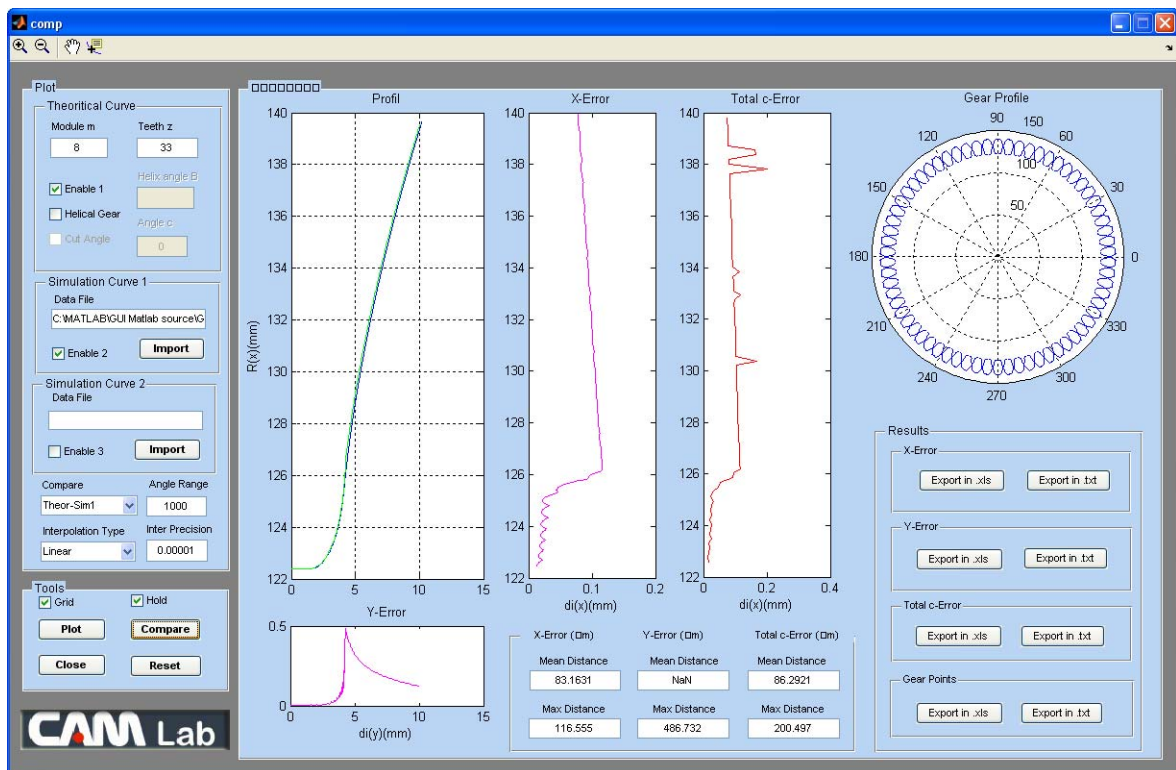
$dp=0,1\text{mm/παρειά}$

$f_a=-3\text{mm/wrev}$, Αντίρροπο

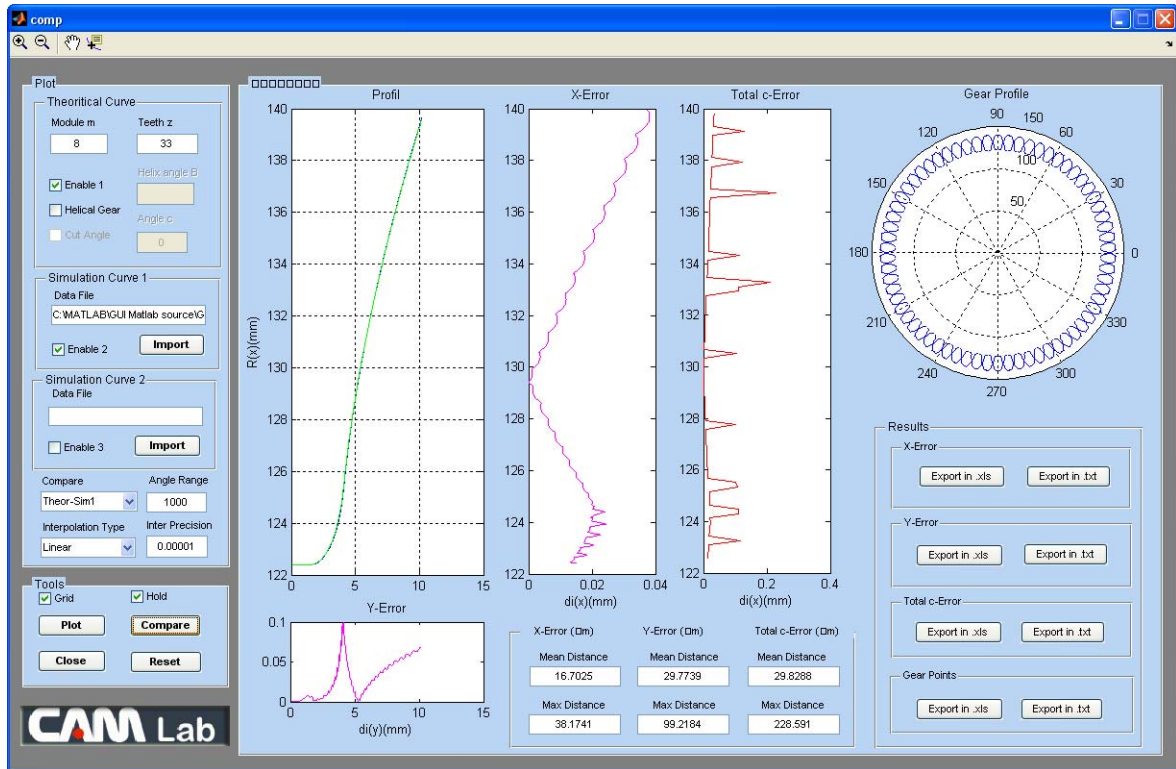
Εισερχόμενη παρειά



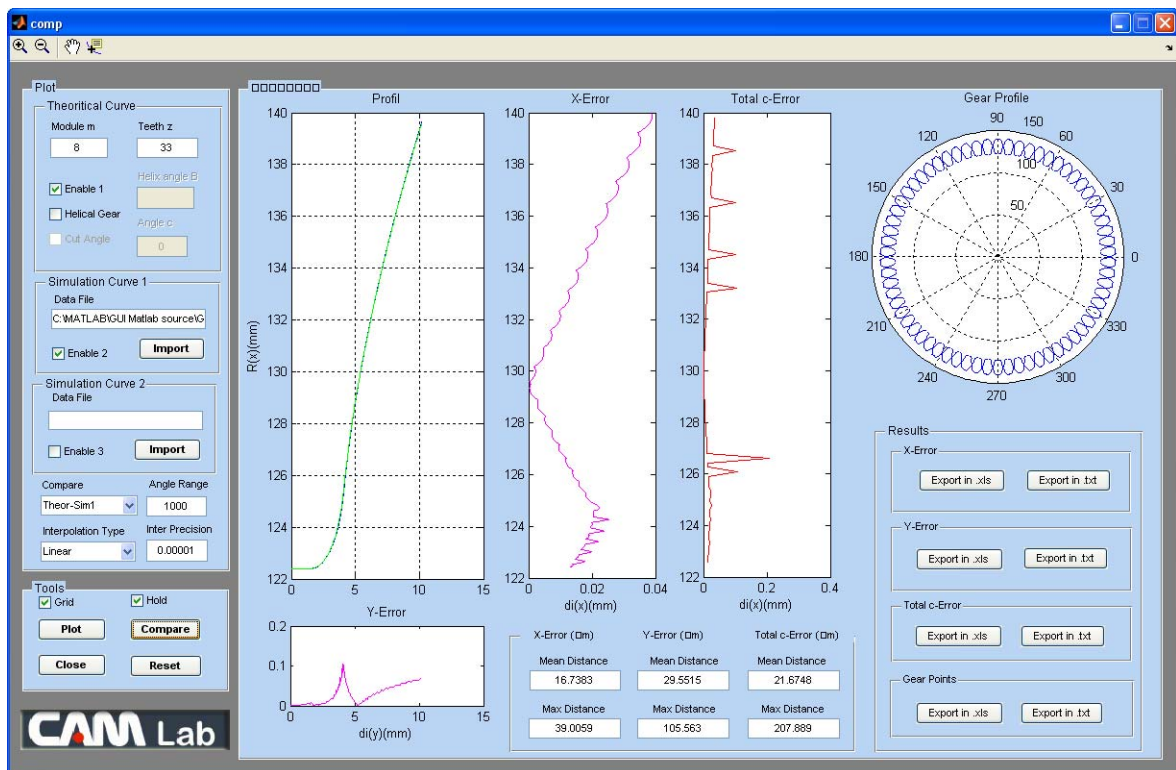
Εξερχόμενη παρειά



Εισερχόμενη παρειά



Εξερχόμενη παρειά



6. ΣΥΝΟΨΗ

Ο ακριβής υπολογισμός της μορφής των αποβλήτων είναι απαραίτητος για την ορθή εκτίμηση της καταλληλότητας των χρησιμοποιούμενων εργαλείων και των συνθηκών κοπής.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια προσομοίωση της κατεργασίας αποφλοίωσης οδοντώσεων με κύλιση σε περιβάλλον CAD. Η διαδικασία για την ολοκλήρωση της τελικής μορφής της οδόντωσης στον κατεργαζόμενο τροχό πραγματοποιήθηκε σε δυο διαδοχικές προσομοιώσεις, αρχικά έγινε η προσομοίωση της κατεργασίας φραιζαρίσματος κύλισης με εργαλείο με διορθωμένη κεφαλή (προφραιζάρισμα) ενώ στη συνέχεια ακολούθησε η προσομοίωση της κατεργασίας αποφλοίωσης οδοντώσεων με κύλιση (αποφλοίωση) πάνω στον ήδη κατεργασμένο τροχό.

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του λογισμικού FRSSKIV που είχε αναπτυχθεί από άλλους ερευνητές και δίνει μια καλή προσέγγιση για τη μορφή που πρέπει να έχουν τα παραγόμενα απόβλιττα της κοπής ανάλογα με τα δεδομένα και τη θέση κύλισης.

Μετά την ολοκλήρωση του λογισμικού για την προσομοίωση της κατεργασίας και τον προσδιορισμό του απαραίτητου αποβλήτου δίνεται η δυνατότητα για μια περεταίρω ανάλυση, προκειμένου να υπολογιστούν μέσω του CAD οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής της κατεργασίας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A simulation model of gear skiving.
A. Antoniadis, N. Vidakis, N. Bilalis
- CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears.
V. Dimitriou, A. Antoniadis
- Προσδιορισμός κρουστικών καταπονήσεων των εργαλείων στο φραιζάρισμα κυλίσσεως οδοντώσεων και προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής κατά την αποφλοίωση στην αυτή κατεργασία μορφοποίησης οδοντώσεων.
Διδακτορική διατριβή του κ. Αριστομένη Αντωνιάδη