



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΟΠΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΛΑΝΙΣΗ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ



ΖΟΥΡΕΛΛΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στον Ανδρέα και την Κλεοπάτρα

Με την παρούσα διπλωματική ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα για αυτό το λόγο να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με στήριξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου. Ιδιαίτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την καθοδήγησή του καθ' όλο το διάστημα της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο συνεργάτη και φίλο Δρ. Νίκο Ταπόγλου, καθώς χωρίς τη συνδρομή και την επίβλεψή του η πραγματοποίηση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη. Επιπροσθέτως, πολλά ευχαριστώ στα στελέχη του εργαστηρίου Ταξιάρχη Μπελή και Δημήτριο Βακόνδιο και για τη δική τους αρωγή. Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Δημήτρη και Βασιλική και την αδερφή μου Ειρήνη, για την ηθική στήριξη και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

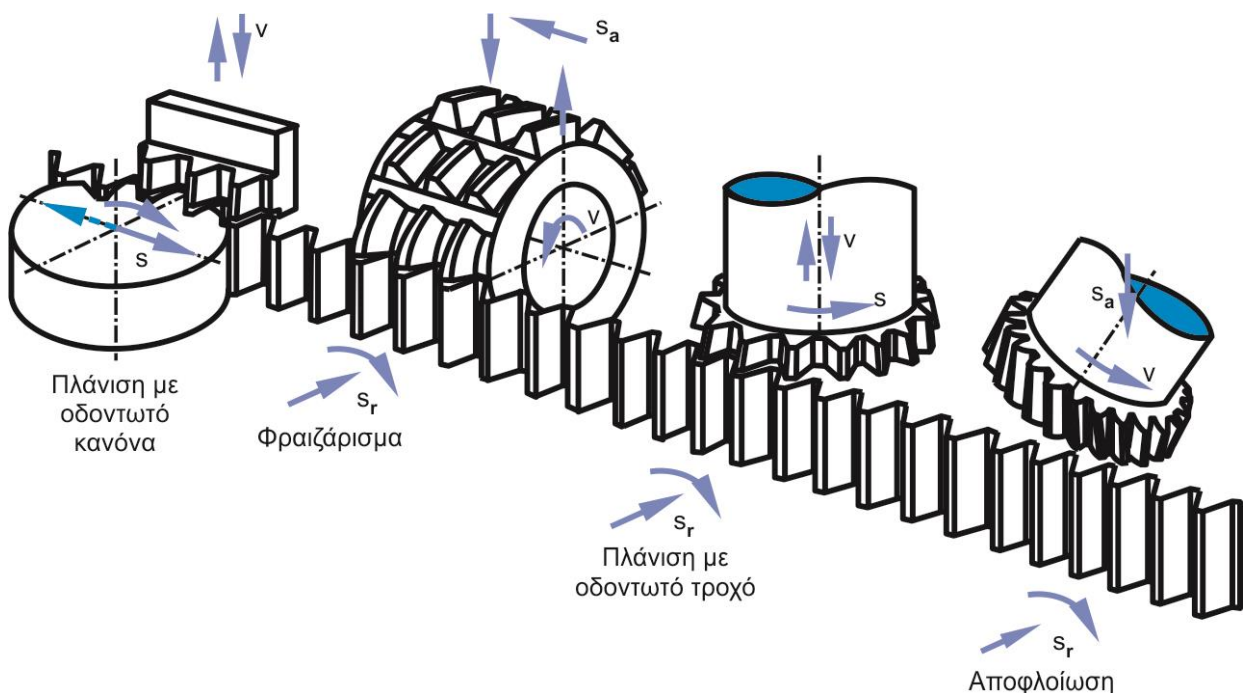
Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα	3
1. Εισαγωγή.....	4
2. Στάθμη των γνώσεων.....	6
2.1 Οδοντωτοί τροχοί	6
2.2 Πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων (gear shaping)	8
2.3 Επίδραση της εξελιγμένης του κύκλου στην πλάνιση με κύλιση	9
2.4 Προγενέστερα μοντέλα προσομοίωσης	9
2.4.1 Μοντέλο προσομοίωσης Sulzer	10
2.4.2 Μοντέλο προσομοίωσης Μπουζάκη	10
3. Περιγραφή λογισμικού	12
3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου	12
3.2 Κύρια συνάρτηση του λογισμικού	12
3.3 Σχεδιασμός κατατομής κοπτικού	13
3.4 Σχεδιασμός τροχιάς κοπτικού	15
3.5 Σχεδιασμός κατεργαζόμενου τροχού	19
3.6 Συναρμολόγηση	20
3.7 Παρουσίαση αποβλίπτων	21
3.8 Παρουσίαση αυλακώσεων	22
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	24
4.1 Παρουσίαση προσομοιώσεων	24
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 1”	24
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 2”	27
4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 3”	30
4.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 4”	32
4.6 Συσχετισμός αποβλίπτων - αυλάκωσης	35
5. Επαλήθευση μοντέλου	36
5.1 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case1”	36
5.2 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case2”	38
5.3 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case3”	39
5.4 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case4”	40
6. Σύνοψη - Αποτελέσματα	43
7. Βιβλιογραφία.....	44

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα και απαραίτητα στοιχεία μηχανών, λόγω της ικανότητας 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.

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

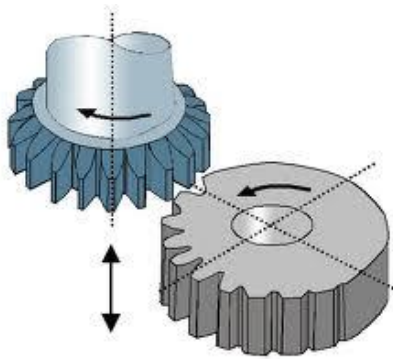
- Το φραιζάρισμα με κύλιση
- Η πλάνιση με κύλιση
- Η πλάνιση με κύλιση με οδοντωτό κανόνα
- Η αποφλοίσωση με κύλιση



Σχήμα 1.1 Οι διάφορες κατεργασίες οδοντωτών τροχών.

Στη σύγχρονη εποχή, η δημιουργία οδοντωτών τροχών με πλάνιση με κύλιση, πρόκειται για μια ευρέως διαδεδομένη και χρήσιμη κατεργασία. Στην κατεργασία πλάνισης με κύλιση, ένας οδοντωτός τροχός με συγκεκριμένη κατατομή οδόντωσης, χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο, αναπαράγοντας μια αντίστοιχων γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατατομή οδόντωσης σε ένα ακατέργαστο κύλινδρο. Το κοπτικό, με συγκεκριμένο αριθμό δοντιών περιστρέφεται με μια δεδομένη ταχύτητα, ενώ και το ακατέργαστο δοκίμιο με την σειρά του περιστρέφεται με ταχύτητα η οποία εξαρτάται από την σχέση μετάδοσης μεταξύ των δύο σωμάτων.

Γενικότερα, η πλάνιση με κύλιση αποτελεί ένα αρκετά ευέλικτο και ακριβές μέσο παραγωγής οδοντωτών τροχών τόσο ευθύγραμμης όσο και πλάγιας/ελικοειδούς οδόντωσης. Οι φορές της περιστροφής του κοπτικού και του κυλίνδρου είναι αντίρροπες για τη δημιουργία εξωτερικής οδόντωσης και ομόρροπες για εσωτερική.



Σχήμα 1.2 Τρισδιάστατη αναπαράσταση και πραγματική φωτογραφία, πλάνισης με κύλιση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιασθεί η ανάλυση της κατεργασίας οδοντωτών τροχών με πλάνιση με κύλιση και η κατασκευή ενός προσομοιωτικού μοντέλου σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Η μοντελοποίηση θα γίνει εξ' ολοκλήρου σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic όπως αυτή υποστηρίζεται στο λογισμικό Autodesk® Inventor® 2012.

Αρχικά θα γίνει ο σχεδιασμός της κατατομής αναφοράς της οδόντωσης του κοπτικού τροχού, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μαθηματικές σχέσεις και τα αριθμητικά μοντέλα που είναι απαραίτητα για την περιγραφή της γεωμετρίας της. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε στο σημείο αυτό, ότι η κατατομή που σχεδιάστηκε θα γίνει σύμφωνα με το πρότυπο DIN 3972 II. Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η κινηματική του κοπτικού, κατά την οποία, η κατατομή που θα σχεδιαστεί τοποθετείται σε διαδοχικά επίπεδα στο χώρο, που ισαπέχουν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα στερεό το οποίο όταν «συναρμολογηθεί» με τον κατεργαζόμενο τροχό. Η λογική αφαίρεση της τροχιάς από το αυλάκι θα παράξει το επιθυμητό αυλάκι, ενώ η τομή τους τα επιθυμητά απόβλιττα ανάλογα ποια θέση κύλιση εξετάζεται.

Ο λόγος που επιλέχθηκε να προσομοιωθεί η κατεργασία της πλάνισης με κύλιση είναι διότι υπερτερεί έναντι άλλων κατεργασιών σε συγκεκριμένα σημαντικά σημεία. Ένα από αυτά είναι ότι η πλάνιση με κύλιση μπορεί να κατεργαστεί εκτός από εξωτερικές οδοντώσεις και εσωτερικές, κάτι το οποίο γίνεται μόνο με την αποφλοίωση με κύλιση. Επιπρόσθετα, ένα ακόμα σημείο υπεροχής της είναι το γεγονός, ότι μπορούμε να κατεργαστούμε συγκεκριμένα τμήματα περιφέρειας ενός τροχού, αν αυτό μας εξυπηρετεί.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Οδοντωτοί τροχοί

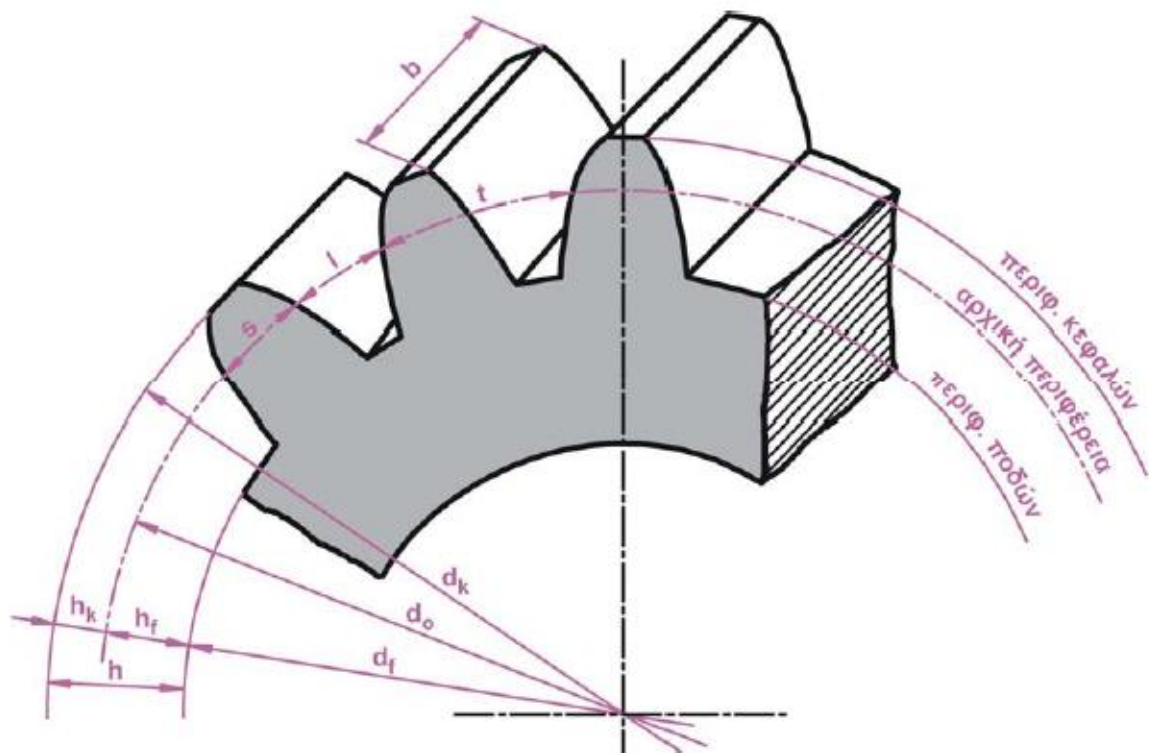
Ο οδοντωτός τροχός είναι συνήθως ένας ολόσωμος κύλινδρος ή δίσκος ή τροχός με βραχίονες. Πολλές φορές ο δίσκος έχει οπές για μείωση βάρους του γραναζιού. Στο κέντρο του γραναζιού υπάρχει η πλήμνη (ομφαλός σύνδεσης με την άτρακτο), που έχει κατάλληλο σφηναύλακα για τη σφήνα και στην περιφέρειά του, η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

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

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

Οι οδοντώσεις χρησιμοποιούνται στα κιβώτια ταχυτήτων των αυτοκινήτων και των εργαλειομηχανών, στο διαφορικό, το τιμόνι, τον εκκεντροφόρο και άλλους βοηθητικούς μηχανισμούς των αυτοκινήτων, στους μειωτήρες (διατάξεις μετατροπής στροφών – ροπής), στις συνεργασίες κινητήριων μηχανών – εργαλειομηχανών. Είναι κατάλληλες για απαιτήσεις μεγάλων ροπών, πολλών στροφών, ακρίβειας στην σχέση μετάδοσης, σχετικά χαμηλού θορύβου και μεγάλης διάρκειας ζωής με ελάχιστη συντήρηση.

Προκειμένου ένας οδοντωτός τροχός να συνεργαστεί με έναν άλλο, τα δόντια του πρέπει να έχουν το ίδιο μέτρο οδόντωσης καθώς και την ίδια γωνία πίεσης. Οι άξονες ως προς τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι παράλληλοι, τεμνόμενοι υπό γωνία ή ασύμβατοι. Ο πιο απλός γεωμετρικά οδοντωτός τροχός είναι ο μετωπικός τροχός με ευθεία δόντια. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός οδοντωτού τροχού παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Γεωμετρικά στοιχεία οδόντωσης

Όπου:

- Η περιφέρεια που διέρχεται από τις κεφαλές των δοντιών λέγεται περιφέρεια κεφαλών και η διάμετρος d_k ονομάζεται διάμετρος κεφαλής.
- Η περιφέρεια στην οποία γίνεται η εμπλοκή του κοπτικού εργαλείου και του οδοντωτού τροχού ονομάζεται διάμετρος d_o ή αλλιώς αρχική διάμετρος.
- Η διάμετρος d_f που αντιστοιχεί στη βάση των δοντιών ονομάζεται διάμετρος ποδών.
- Το τμήμα h_k του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται από την αρχική περιφέρεια έως την κεφαλή του δοντιού λέγεται ύψος κεφαλής.
- Το υπόλοιπο τμήμα h_f , που ξεκινάει από την αρχικής διάμετρο έως τη διάμετρο του κύκλου ποδός, ονομάζεται ύψους του δοντιού.
- Ως βήμα δοντιού, ορίζεται η απόσταση t ανάμεσα σε δύο αντίστοιχα σημεία δύο γειτονικών δοντιών, όταν αυτή η απόσταση μετρίεται πάνω στην αρχική περιφέρεια.
- Το τμήμα s , όπως φαίνεται στο σχήμα, λέγεται πάχος δοντιού και μετρίεται πάνω στην αρχική περιφέρεια.
- Η απόσταση b ονομάζεται μήκος του δοντιού.
- Ως διάκενο του δοντιού l , ορίζεται η διαφορά του βήματος από το πάχος του δοντιού.

Οι οδοντωτοί τροχοί ποικίλουν και ταξινομούνται με βασικό κριτήριο τη μορφή τους. Οι κυριότεροι είναι οι μετωπικοί, οι κωνικοί, οι οδοντωτοί κανόνες, τα συστήματα ατέρμονα – κορώνας και οι επικυκλικές οδοντώσεις. Στην παρούσα εργασία γίνεται λόγος για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς.

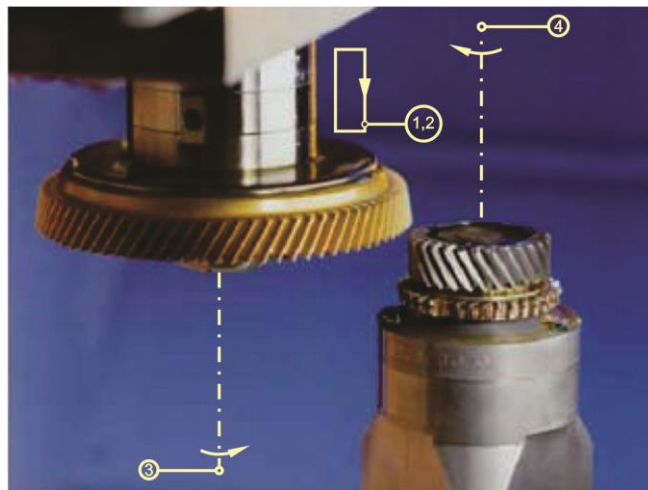
Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί μεταδίδουν την κίνηση μεταξύ παραλλήλων αξόνων. Ο οδοντωτός τροχός πριν την κατεργασία του έχει κυλινδρική μορφή. Τα δόντια των γραναζιών μπορούν να είναι είτε παράλληλα, είτε κεκλιμένα προς τον άξονά τους, είτε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία. Τα παράλληλα τοποθετημένα γρανάζια μπορούν να είναι σε επαφή είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά (δηλαδή το ένα να είναι μέσα στο άλλο), ενώ η κεκλιμένη οδόντωση μπορεί να είναι είτε απλή. Τα γρανάζια με κεκλιμένα ή ελικοειδή δόντια υπερτερούν των γραναζιών με ευθεία δόντια διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή, μεταδίδουν ομαλότερα την κίνηση και προκαλούν λιγότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους.

2.2 Πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων (gear shaping)

Η πλάνιση οδοντώσεων με κύλιση (gear shaping) στηρίζεται στην αρχή της κύλισης ανάμεσα σε δύο οδοντωτούς τροχούς που είναι σε εμπλοκή. Η κατατομή της οδόντωσης επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικών θέσεων πλάνισης. Η κινηματική της κατεργασίας, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.2 περιλαμβάνει:

1. Παλινδρομική κίνηση του εργαλείου κατακόρυφα ή με κλίση ανάλογα το αν κατεργάζεται ευθεία ή πλάγια οδόντωση.
2. Το κοπτικό εργαλείο κάνει μικρή παλινδρομική κίνηση εξόδου από την εμπλοκή, για να μπορεί να επιστρέψει ελεύθερα προς τα επάνω.
3. Περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονά του.
4. Περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

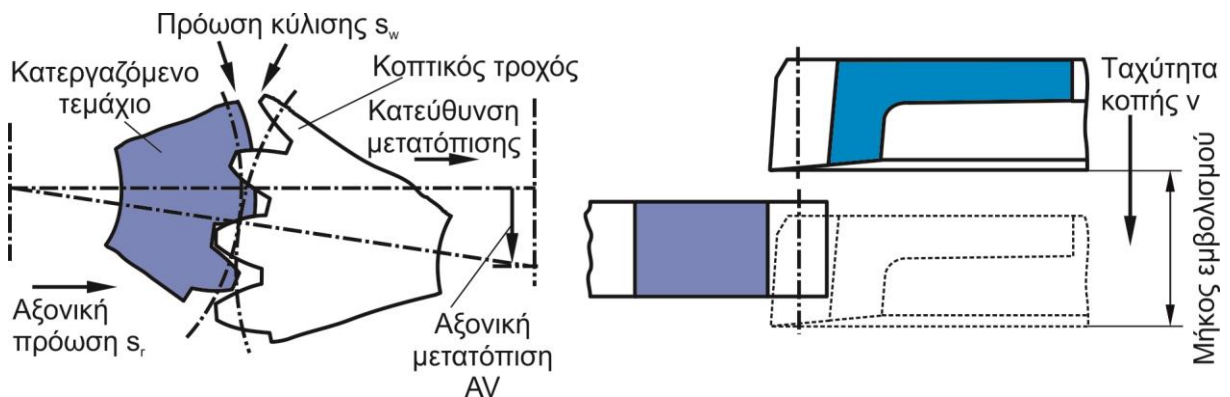
Οι περιστροφικές κινήσεις τόσο του κοπτικού εργαλείου όσο και του κατεργαζόμενου τροχού πραγματοποιούνται με σταθερό ρυθμό, με βάση τη σχέση μετάδοσής τους, ώστε να υπάρχει ορθή εμπλοκή των δύο οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 2.2 Κινηματική εργαλειομηχανής για πλάνιση με κύλιση

Η πλάνιση με κύλιση είναι από τις πιο ευέλικτες κατεργασίες οδοντωτών τροχών. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως πρόκειται για μια πραγματική διαδικασία γένεσης αφού δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του εργαλείου κατά τη διαδικασία κοπής. Επιπλέον η μέθοδος μέθοδος, μας επιτρέπει και τη δημιουργία εσωτερικών οδοντώσεων. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου της είναι, ότι κατεργάζεται και οδοντωτούς κανόνες, ενώ μπορεί να κατεργαστεί οδοντώσεις μόνο σε ένα τμήμα της περιφέρειας ενός τροχού. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως κάθε αυλάκι κόβεται με μια σειρά θέσεων κύλισης από συγκεκριμένο δόντι του εργαλείου και επομένως εάν κάποιο από αυτά έχει κάποιο ελάττωμα, αυτό μεταφέρεται αυτούσιο στην κατατομή του υπό κοπή οδοντωτού τροχού. Ως μειονέκτημά

της μπορεί επίσης να θεωρηθεί η ύπαρξη του νεκρού χρόνου κατά την επιστροφή του κοπτικού εργαλείου. Η πλάνιση με κύλιση αποτελεί αν όχι την οικονομικότερη, μια από τις πιο οικονομικές μεθόδους κοπής εσωτερικών οδοντώσεων των οποίων η διάμετρος του αρχικού κύκλου κυμαίνεται από 2,5 έως 500 εκατοστά.



Σχήμα 2.3 Αναλυτική κινηματική της κατεργασίας

Ελικοειδής οδόντωση προκύπτει με την βοήθεια ενός κοπτικού με ίδιο μέτρο οδόντωσης, γωνία πίεσης και γωνία ελίκωσης. Ο οδηγός του κοπτικού τροχού μεταδίδει μια περιστροφική κίνηση στο κοπτικό το οποίο με τη σειρά του περιστρέφεται και εμβολίζει το δοκίμιο. Ως εκ τούτου αμφότερες οι οδοντώσεις (εσωτερικές και εξωτερικές) μπορούν να υποστούν κατεργασία με πλάνιση με κύλιση. Τα κοπτικά που χρησιμοποιούνται στην πλάνιση με κύλιση είναι ως επί το πλείστον δίσκοι. Παραδείγματα κοπτικών παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.4](#).



Σχήμα 2.4 Κοπτικά εργαλεία για (α) ευθύγραμμη και (β) ελικοειδή οδόντωση

2.3 Επίδραση της εξελιγμένης του κύκλου στη πλάνιση με κύλιση

Οι οδοντωτοί τροχοί τόσο ευθείας όσο και ελικοειδούς οδόντωσης είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης μεταξύ παράλληλων αξόνων. Η χρήση της εξελιγμένης του κύκλου στις παρειές των οδοντωτών τροχών, επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η εύκολη και ευρεία βιομηχανική παραγωγή τους με όλες τις συμβατικές μεθόδους, καθώς επίσης προσφέρει ομοιομορφία στη μετάδοση της κίνησης. Επιπροσθέτως, οι μοντέρνες μέθοδοι γρανοζοκοπών, βοηθούν στην ύπαρξη αρκετά υψηλής αναλογίας ισχύος με βάρος και η χρήση της εξελιγμένης συμβάλει ιδιαίτερα σε αυτό.

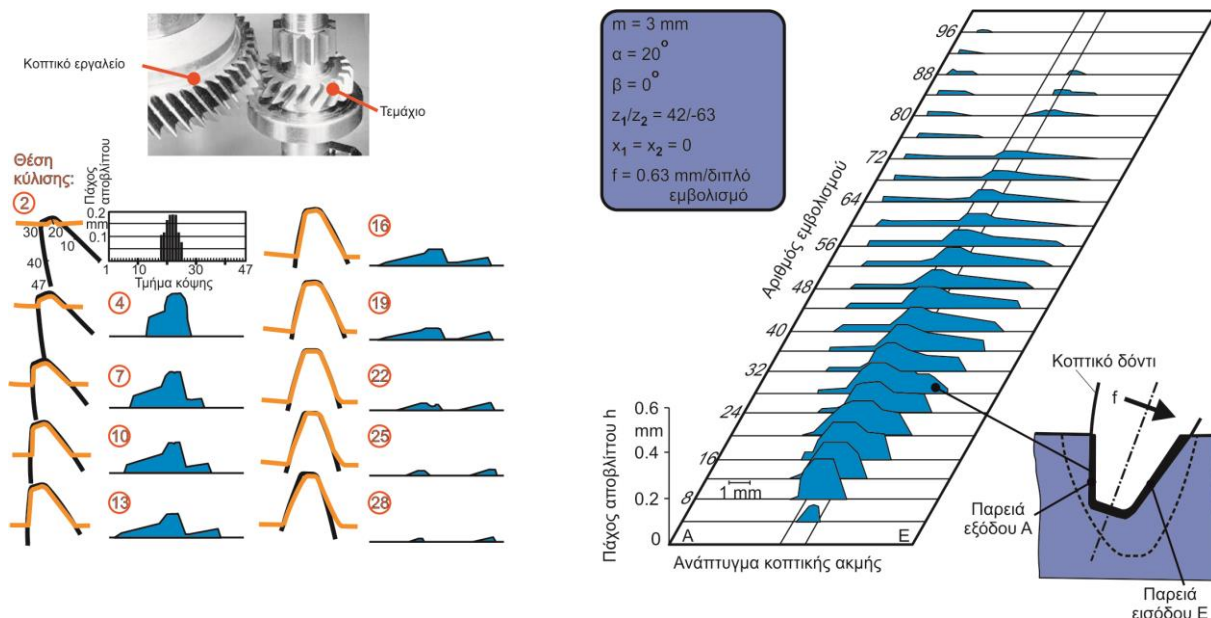
2.4 Προγενέστερα μοντέλα προσομοίωσης

Στο κομμάτι αυτό της εργασίας θα γίνει λόγος για μοντέλα προσομοίωσης που αφορούν την πλάνιση με κύλιση και έχουν μελετηθεί στο παρελθόν από συγκεκριμένους ερευνητές. Αυτό γίνεται για να έρθει η παρούσα εργασία σε αντιπαραβολή με τις συγκεκριμένες μελέτες ώστε να επαληθευθούν αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με γεωμετρίες των οδοντωτών

τροχών καθώς και των παραγόμενων αποβλήτων. Επιπρόσθετα, μπορούμε να αναφέρουμε, ότι λόγω της παλαιότητας αυτών των ερευνών και των περιορισμένων εποπτικών και υπολογιστικών μέσων που υπήρχαν τότε σε διαθεσιμότητα, η διπλωματική αυτή αποτελεί ένα μοντέλο προσομοίωσης που λαμβάνει στοιχεία από τα προγενέστερα αλλά ακολουθεί μια νέα διαφορετική προσέγγιση μέσα από λογισμικό CAD προβάλλοντας έτσι και τρισδιάστατα αποτελέσματα. Βέβαια, η βασική διαφορά που παρατηρείται είναι ότι στην παρούσα εργασία έγινε και παρουσίαση των αποτελεσμάτων πλάγιας εξωτερικής οδόντωσης, κάτι το οποίο δεν έχει ξαναμελετηθεί.

2.4.1 Μοντέλο προσομοίωσης Sulzer

Το 1973 ο Δρ. Gerd Sulzer του Πολυτεχνείου του Άαχεν στη Γερμανία, ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με προσομοιωτικά μοντέλα που αφορούν την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση. Η έρευνα που έκανε ο Sulzer ήταν πολύπλευρη και επικεντρώθηκε αρχικά στη φθορά που προκαλείται στο κοπτικό εργαλείο καθώς και την κινηματική αυτού, κατά τη διάρκεια της κοπής. Επιπλέον, μελέτησε τα απόβλητα που προκύπτουν από τη κατεργασία σχετικά με τη μορφή τους, την επιφάνειά τους και τον όγκο που καταλαμβάνουν στο χώρο. Εστίασε, επίσης και στις συγκρούσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των υπο-αποβλήτων στις διάφορες θέσεις κύλισης και το πώς αυτές επηρεάζουν την κατεργασία. Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran και αποτέλεσε βάση για τη μετέπειτα ανάπτυξη παρόμοιων εργαλείων. Για την προσομοίωσή του ο Sulzer, διακριτοποίησε τον οδοντωτό τροχό σε ένα αριθμό επιπέδων παράλληλων προς τον άξονά του. Το τελικό αυλάκι του οδοντωτού τροχού προέκυπτε σαν μια συλλογή πολυγωνικών γραμμών, οι οποίες δημιουργούνταν από την αφαίρεση της τροχιάς της κοπτικής ακμής, ως προβολή της σε κάθε ένα από τα επίπεδα από την πολυγωνική γραμμή του τρέχοντος οδοντωτού τροχού, για κάθε θέση κύλισης. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα απόβλητα διαφόρων θέσεων κύλισης, τα πάχη τους και το συνολικό ανάπτυσμά τους για συγκεκριμένα δεδομένα προσομοίωσης, σύμφωνα με το μοντέλο Sulzer.

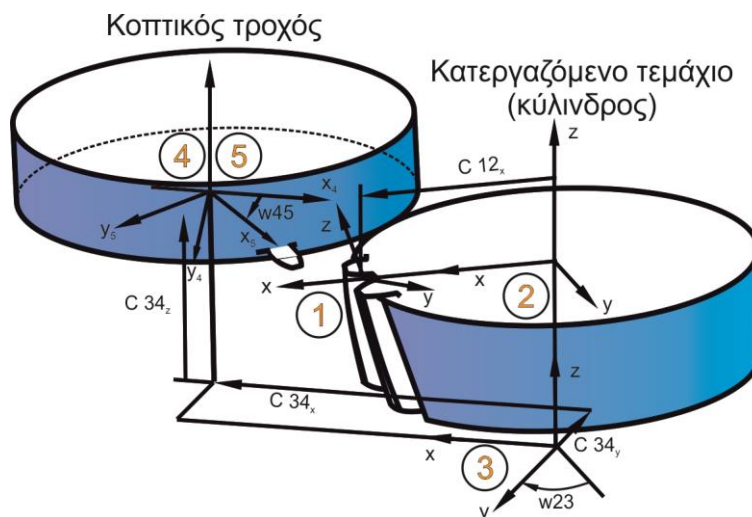


Σχήμα 2.5 Αποτελέσματα αποβλήτων σύμφωνα με το μοντέλο του Sulzer

2.4.2 Μοντέλο προσομοίωσης Μπουζάκη

Τρία χρόνια αργότερα στο ίδιο Πανεπιστημιακό Ίδρυμα, ο Δρ. Κωνσταντίνος Μπουζάκης ήταν αυτός που μελέτησε για δεύτερη φορά τις γριναζοκοπές και συγκεκριμένα τη πλάνιση με κύλιση. Ο Μπουζάκης έκανε μια επανάληψη όλων αυτών που μελέτησε ο Sulzer με τη

διαφορά ότι εκείνος εστίασε περισσότερο στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη κοπή. Μελέτησε τόσο τις δυνάμεις σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων (κοπτικό εργαλείο, οδοντωτός τροχός), όσο και σε ένα ενιαίο σύστημα όπου και εξήγαγε τη συνισταμένη δύναμη της κατεργασίας. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής ενσωματώθηκε στο υπόλοιπο πρόγραμμα και επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 2.6 Συστήματα συντεταγμένων κατά την πλάνιση με κύλιση

Σύμφωνα με το μοντέλο του Μπουζάκη στο σύστημα συντεταγμένων (1) δίνεται το περίγραμμα του αυλακιού που κατασκευάζεται σε ένα ή περισσότερα επίπεδα κοπής. Το σύστημα (2) χαρακτηρίζει τη θέση του αυλακιού ως προς τον κατεργαζόμενο τροχό. Με τη βοήθεια του συστήματος (3) περιγράφεται η περιστροφή του κατεργαζόμενου τροχού. Η μετατόπιση του συστήματος (3) ως προς το (4) χαρακτηρίζει την αξονική απόσταση καθώς και την μετακίνηση της τράπεζας της μηχανής. Μια μεταβολή της απόστασης $C 34_x$ ανά παλινδρόμηση αντιστοιχεί στην κίνηση της ακτινικής πρόωσης. Το εργαλείο περιγράφεται με τη βοήθεια ενός δοντιού στο σύστημα (5) το οποίο περιστρέφεται σε σχέση με το σταθερό στο χώρο σύστημα (4) κατά τη γωνία κύλισης $\varphi = w 45$. Η κίνηση κοπής προσομοιώνεται με την περιοδική μεταβολή της απόστασης $C 34_z$.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου

Η εφαρμογή η οποία επιλέχθηκε είναι το Autodesk Inventor 2011, το οποίο διαθέτει περιβάλλον API (Application Programming Interface). Ο όρος API χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργικότητα που παρέχεται από μια εφαρμογή η οποία της επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί μέσα από ένα προγραμματιστικό περιβάλλον. Μέσα από το API μπορούν να αυτοματοποιηθούν διαδικασίες και να δημιουργηθούν κώδικες οι οποίοι εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης όταν χρησιμοποιεί την εφαρμογή μέσα από το τυπικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης της. Με τη χρήση του API μπορούν, όμως, να δημιουργηθούν και πολλές άλλες διαδικασίες οι οποίες δεν είναι εύκολο να εκτελεστούν απ' ευθείας μέσα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής. Το περιβάλλον API είναι επίσης σημαντικό επειδή επιτρέπει εξωτερικές εφαρμογές να λειτουργήσουν παράλληλα με το Autodesk Inventor, όπως προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων (FEM), προγράμματα δημιουργίας γραφικών, προγράμματα εφαρμογών γραφείου καθώς επίσης και άλλα προγράμματα CAD/CAM/CAE. Μια από τις πιο σημαντικές είναι η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic for Applications. Συγγράφοντας το κατάλληλο κώδικα μπορούμε να εξάγουμε τα επιθυμητά προς εμάς αποτελέσματα όπως η κατατομή του κοπτικού μας εργαλείου, η τροχιά του, το παραγόμενο απόβλιττο καθώς και το τελικό αυλάκι του κατεργαζόμενου οδοντωτού τροχού. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η προσομοίωση τόσο για ευθεία όσο και για ελικοειδή οδόντωση καλύπτοντας έτσι όλο το φάσμα των περιπτώσεων παραγωγής οδοντωτών τροχών με πλάνιση με κύλιση.



Σχήμα 3.1 Τροχοί (α) ευθείας και (β) ελικοειδούς οδόντωσης.

3.2 Κύρια συνάρτηση λογισμικού

Ο κώδικας της κύριας συνάρτησης ξεκινάει με τη δήλωση από τον χρήστη των τιμών που επιθυμεί να περιγράψουν τη συγκεκριμένη κατεργασία. Οι τιμές αυτές είναι:

Κοπτικό Εργαλείο:

- Μέτρο οδόντωσης [mm] **m**
- Πλήθος δοντιών κοπτικού **z₁**
- Γωνία πίεσης **a** [deg]
- Αριθμός κάθετων τομών **e** στην τροχιά του κοπτικού
- Βήμα **δξ** γωνίας εξελιγμένης του κύκλου για την κατασκευή του κοπτικού εργαλείου [deg]

Οδοντωτός τροχός:

- Πλήθος δοντιών κοπτικού z_2
- Γωνία ελίκωσης β [deg],
- Πάχος του οδοντωτού τροχού b [mm]

Κατεργασία:

- Πρόωση s [mm/DH]
- Αξονική απόσταση AV [mm]

Στη συνέχεια η συνάρτηση χωρίζεται σε τέσσερα πολύ σημαντικά, για την υλοποίηση του προγράμματος, κομμάτια. Αρχικά καλείται η συνάρτηση **Create_Blank_Gear** κατά την οποία θα κατασκευαστεί ο οδοντωτός τροχός στην πρωταρχική του μορφή, χωρίς να έχει υποστεί καμία επεξεργασία. Έπειτα, ακολουθεί μια ομάδα συναρτήσεων που είναι απαραίτητες για να γίνει η προσομοίωση της κατεργασίας με πλάνιση με κύλιση για κοπτικές ακμές ευθείας οδόντωσης.

Στην ομάδα αυτή περιλαμβάνονται, η **Sketch_Profile_L** κατά την οποία κατασκευάζεται η κατατομή της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου, η **Trajectory_Points_L** όπου σχεδιάζεται η τροχιά που θα ακολουθήσει η κατατομή αυτή και τέλος η **Assemble_Cut_In_L** στην οποία συναρμολογούνται ο αρχικός ακατέργαστος δίσκος και η τροχιά που έχει δημιουργηθεί. Η συναρμολόγηση αυτή θα μας επιφέρει ως αποτελέσματα πολλά διαδοχικά απόβλητα, ένα για κάθε θέση κύλισης και το τελικό αυλάκι του οδοντωτού τροχού που έχει κοπεί.

Σε περίπτωση που στα δεδομένα προσομοίωσης η γωνία ελίκωσης τότε η κύρια συνάρτηση καλεί μια ομάδα συναρτήσεων που περιλαμβάνει τις **Sketch_Profile_H**, **Trajectory_Points_H** και **Assemble_Cut_In_H** όμοιες με τις προηγούμενες, με τη μόνη διαφορά ότι εμπλέκουν και τον όρο της γωνίας ελίκωσης στους υπολογισμούς τους.

Στο τέλος καλείται η συνάρτηση **InputData**, η οποία εξάγει ένα αρχείο τύπου .txt όπου αναγράφονται τα στοιχεία της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα του πιο εύκολα και πιο γρήγορα.

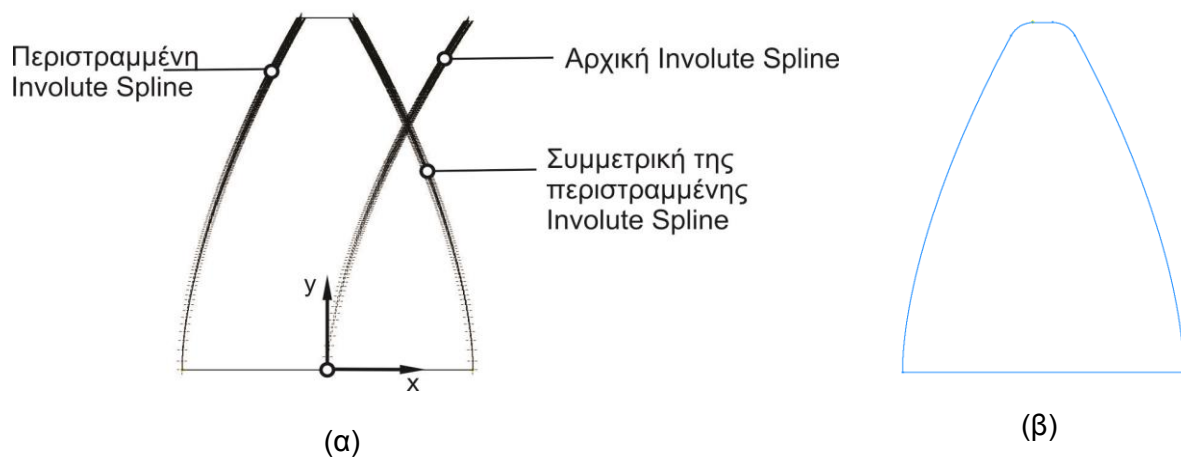
3.3 Σχεδιασμός κατατομής κοπτικού

Το πρώτο βήμα για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι ο σχεδιασμός της κατατομής του κοπτικού εργαλείου. Η μελέτη της εξελιγμένης του κύκλου είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των εκατέρωθεν παρειών του κάθε δοντιού του τροχού. Η χρήση της εξελιγμένης του κύκλου στο σχεδιασμό της κατατομής επιβάλλεται από το πρότυπο DIN 3972 II κατά το οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση. Εκτενέστερα, η εξελιγμένη του κύκλου είναι ένα σύνολο σημείων τα οποία υπακούν στις παρακάτω συναρτήσεις:

$$x(i)=r_b(\sin\xi-\xi\cos\xi) \quad \text{και} \quad y(i)=r_b(\cos\xi+\xi\sin\xi) \quad (3.1)$$

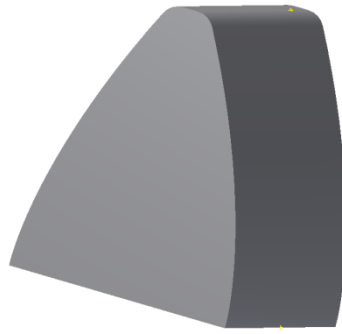
όπου r_b η ακτίνα βασικού κύκλου και ξ μια ακόμα παράμετρος υπολογισμένη σε rad, η οποία σε κάθε ζεύγος σημείων (x,y) αυξάνεται κατά $\delta\xi$, τιμή που την ορίζει ο χρήστης στην αρχή του προγράμματος. Πέραν των παραπάνω μεταβλητών, πρέπει να καθορίσουμε επιπλέον μεγέθη τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό της κατατομής του κοπτικού εργαλείου. Αρχικά πρέπει να οριστούν αριθμητικά από το χρήστη το μέτρο οδόντωσης m και το πλήθος των δοντιών του κοπτικού τροχού z_1 . Σε συνέχεια αυτών, ο χρήστης θέτει και μια

τιμή για την γωνία α ή αλλιώς **γωνία πίεσης**. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω μπορούν να γίνουν οι επιθυμητοί υπολογισμοί για την ακτίνα αρχικού κύκλου R , την ακτίνα βασικού κύκλου r_b , την ακτίνα κύκλου ποδιού r_f και την ακτίνα κύκλου κεφαλής r_a . Τόσο η συνάρτηση **Sketch_Profile_L** για ευθεία οδόντωση, όσο και η **Sketch_Profile_H** για ελικοειδή χρησιμοποιούν μια επανάληψη μέσα από την οποία παράγονται τα σημεία της εξελιγμένης του κύκλου. Φραγμός για τον επαναληπτικό αυτό βρόγχο αποτελεί το $R < r_a$. Ομοίως δεν παραλείπεται σε κάθε επανάληψη η αύξηση της γωνίας ξ κατά $\delta\xi$ για να γίνεται ορθά ο υπολογισμός των σημείων (x,y) . Σε αυτό το σημείο η συνάρτηση σχεδιασμού κατατομής κοπτικού τροχού καλεί μια υπορουτίνα **SplinePoints_Rotation** η οποία θα περιστρέψει το σύνολο των σημείων που μόλις έχουν δημιουργηθεί. Αυτό γίνεται για να τοποθετηθεί η καμπύλη σε τέτοιο σημείο πάνω στον άξονα έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί το αντίστοιχο συμμετρικό της που θα απεικονίζει την έτερη παρειά του δοντιού. Στη συνέχεια καλώντας την εντολή **Set oSpline = oSketch.SketchSplines.Add(oFitPoints)** γίνεται η ένωση των δύο συνόλων σημείων δημιουργώντας έτσι τις δυο παρειές. Με αντίστοιχες εντολές δημιουργούνται άλλα τέσσερα **SketchEntities**, ένα για τη βάση της κατατομής, ένα για την κεφαλή και άλλα δυο καμπύλα τμήματα για να ενωθεί το ευθύγραμμο τμήμα της κεφαλής με τις 2 παρειές.



Σχήμα 3.2 (α) Το σύνολο των σημείων της αρχικής εξελιγμένης και των δύο συμμετρικών που προκύπτουν από αυτή και (β) το τελικό περίγραμμα της κατατομής μετά τη συνένωση όλων των **SketchEntities**.

Στο τελικό στάδιο της **Sketch_Profile**, χρησιμοποιώντας την εντολή **Set oExtrude = oCompDef.Features.ExtrudeFeatures.AddByDistanceExtent(Profile,1,kSymmetricExtentDirection, kJoinOperation)**, προεκτείνουμε την κατατομή ισόποσα και προς τις δύο κατευθύνσεις με σκοπό να δημιουργήσουμε μια στερεή οντότητα η οποία αποτελεί ένα από τα δόντια του κοπτικού οδοντωτού τροχού. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Δόντι του κοπτικού εργαλείου.

Όσον αφορά την κατασκευή της κατατομής του κοπτικού στην ελικοειδή οδόντωση πρέπει να αναφέρουμε ότι αν και η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με εκείνη της ευθείας οδόντωσης έχουμε αλλαγή στους τύπους που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς σημαντικών μεγεθών. Αυτό που μας απασχολεί πλέον είναι ακόμη μία μεταβλητή που αφορά τη γωνία ελίκωσης h_a . Η επίδραση αυτής της μεταβλητής παρουσιάζεται στις παρακάτω σχέσεις: $module_h = module / \cos(h_a)$ για τον υπολογισμό του module του κοπτικού στην ελικοειδή, $rb = R * \cos(\text{Atn}(\tan(a) / \cos(h_a)))$ για τον υπολογισμό της ακτίνας του βασικού κύκλου του κοπτικού στην ελικοειδή και $\theta = (\pi / (2 * z)) + (\tan((\text{Atn}(\tan(a) / \cos(h_a)))) - (\text{Atn}(\tan(a) / \cos(h_a))))$ για τον υπολογισμό της γωνίας θ κατά την οποία θα περιστραφεί το σύνολο των σημείων της εξελιγμένης όπως έγινε και παραπάνω. Η υπόλοιπη διαδικασία δεν φέρει αλλαγές σε σύγκριση με την ευθεία οδόντωση.

3.4 Σχεδιασμός τροχιάς κοπτικού

Με την κοπτική ακμή πλέον έτοιμη, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της τροχιάς του δοντιού του κοπτικού εργαλείου. Πιο λεπτομερώς, αυτό που ακολουθεί είναι ο υπολογισμός των διαφορετικών θέσεων ενός δοντιού κατά τη διαδικασία της κοπής. Το πόσο δηλαδή περιστρέφεται σε σχέση με τον ακατέργαστο κύλινδρο. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι τόσο κατά την ευθύγραμμη οδόντωση όσο και κατά την πλάγια το κοπτικό εργαλείο και ο οδοντωτός τροχός περιστρέφονται διαρκώς ταυτόχρονα με τον εμβολισμό του πρώτου, σύμφωνα με τη σχέση μετάδοσης. Εξαιτίας αυτού, έγινε μια συγκεκριμένη παραδοχή στον κώδικα που δημιουργήθηκε κατά την οποία ο οδοντωτός τροχός θεωρείται ακίνητος και στη γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου συνυπολογίζεται και η γωνία περιστροφής του τεμαχίου. Για την υλοποίηση όλων των παραπάνω είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση της κατατομής του κοπτικού όπως αυτή σχεδιάστηκε σε ευθεία και ελικοειδή οδόντωση.

Για να ορίσουμε τις διαδοχικές θέσεις που θα λαμβάνει η κοπτική ακμή καθώς και το πλήθος αυτών, πρέπει να ορίσουμε ένα μετρητή, ο οποίος θα μεταβάλει τη τιμή του μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία. Η συνάρτηση που υπολογίζει τις τιμές του μετρητή αυτού είναι η **calculation_metritis**, η οποία κάνει χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$module_h = module / \cos(h_a) \quad (3.2)$$

$$r_1 = (z_1 \cdot module_h) / 2 \quad (3.3)$$

$$r_2 = (z_2 \cdot module_h) / 2 \quad (3.4)$$

$$A = r_1 + r_2 \quad (3.5)$$

$$r_{k1} = r_1 + (1.25 \cdot \text{module}_h) \quad (3.6)$$

$$r_{k2} = r_2 + (1.25 \cdot \text{module}_h) \quad (3.7)$$

$$\psi = 2 \cdot \arccos((z_1 + z_2) / (2 \cdot z_2)) \quad (3.8)$$

$$\text{angle} = (2 \cdot s) / (z_1 \cdot \text{module}_h) \quad (3.9)$$

$$N = (\psi / \text{angle}) + (1 / 10 \cdot (\psi / \text{angle})) \quad (3.10)$$

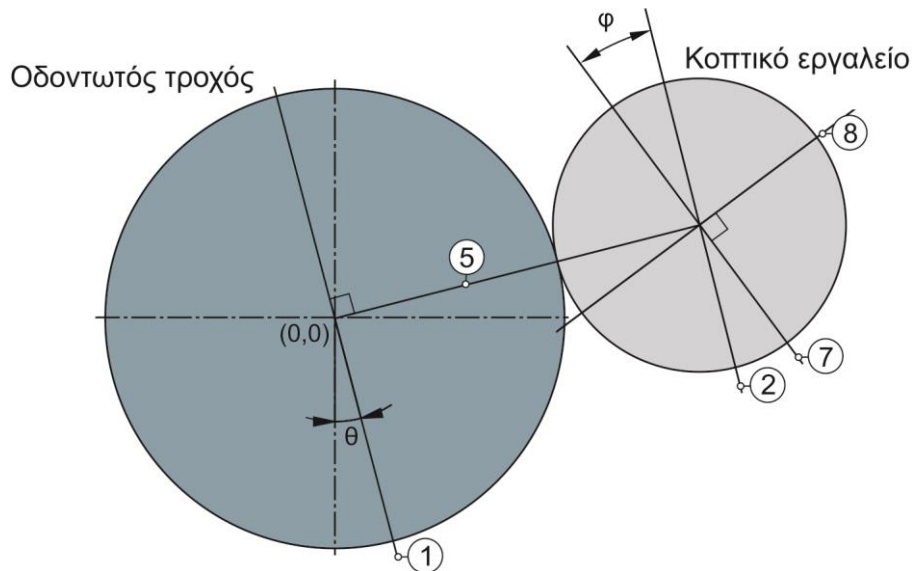
όπου:

h_a :	η γωνία ελίκωσης στην ελικοειδή οδόντωση
module_h :	το μέτρο οδόντωσης που περιλαμβάνει τη γωνία ελίκωσης
z_1, z_2 :	το πλήθος των δοντιών στον κοπτικό και στον υπό κατεργασία τροχό
r_1, r_2 :	η ακτίνα βασικού κύκλου του κοπτικού και του κατεργαζόμενου τροχού
A :	η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο τροχών
r_{k1}, r_{k2} :	η ακτίνα κύκλου κεφαλής του κοπτικού και του κατεργαζόμενου τροχού
ψ :	γωνία έναρξης κατεργασίας
s :	πρόωση
angle :	γωνία βήματος
N :	αριθμός παλινδρομήσεων ανά αυλάκι

Από τη στιγμή που θα οριστεί το πλήθος των μετρητών, δηλαδή των διαφόρων θέσεων κύλισης, ξεκινάει μια περισσότερο πολύπλοκη διαδικασία. Επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθεί το περίγραμμα της κατατομής που περιγράφηκε προηγουμένως σε παράλληλα επίπεδα στο χώρο τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους και η απόσταση μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου να είναι κατ' ελάχιστο ίση με το πάχος του οδοντωτού τροχού που θα κατασκευαστεί. Η φιλοσοφία αυτής της διαδικασίας είναι, ότι μέσω μιας ακολουθίας εντολών στη Visual Basic for Applications, δημιουργούνται επίπεδα, άξονες και σημεία εργασίας τα οποία σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κύκλων που ορίζουν το κοπτικό εργαλείο και τον κατεργαζόμενο τροχό, μας δίνουν ένα τελικό επίπεδο, όπου και θα τοποθετηθεί η τελική κατατομή. Όλα τα παραπάνω, φαίνονται και στο σχήμα 3.4 με την ίδια αρίθμηση που ακολουθεί:

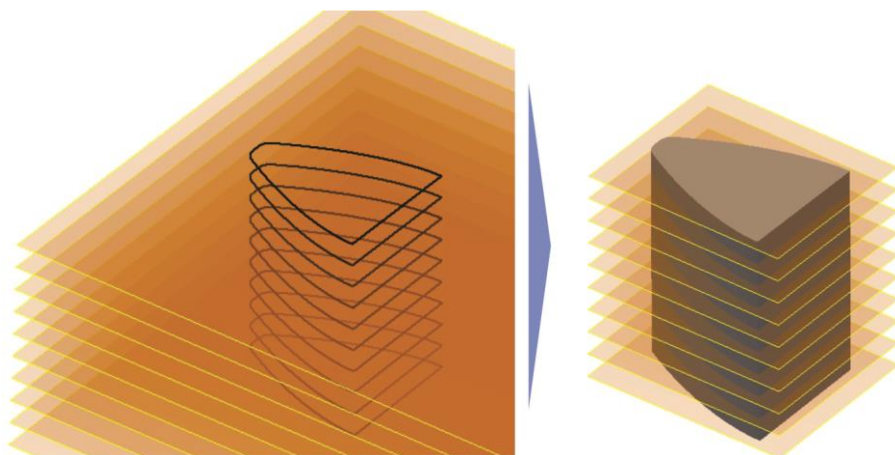
1. Ένα επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του ακατέργαστου δίσκου το οποίο διέρχεται από τον άξονα περιστροφής του (δηλ. τον άξονα Z) και σχηματίζει γωνία θ με το επίπεδο YZ.
2. Ένα παράλληλο επίπεδο στο προηγούμενο, απομακρυσμένο κατά A, όσο και το άθροισμα των ακτινών των βασικών κύκλων των δύο τροχών, έτσι ώστε να συμπίπτει και αυτό με τον άξονα περιστροφής του κοπτικού τροχού.
3. Ένα παράλληλο επίπεδο στο XY, ανυψωμένο από αυτό κατά $b/2$, όπου b το πάχος του οδοντωτού τροχού.
4. Έναν άξονα που προκύπτει από την τομή των δύο προηγούμενων επιπέδων.
5. Ένα επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στο XY και διέρχεται από τα κέντρα των δύο τροχών.
6. Έναν άξονα που προκύπτει από την τομή των επιπέδων (2) και (5), και απεικονίζει τον άξονα του κοπτικού τροχού.

7. Ένα επίπεδο με άξονα περιστροφής τον (6) το οποίο θα σχηματίζει γωνία φ με το επίπεδο (2).
8. Ένα επίπεδο κάθετο στο προηγούμενο με τον ίδιο άξονα περιστροφής.
9. Έναν άξονα, παραγόμενο από την τομή των επιπέδων (2) και (7).
10. Έναν άξονα, παραγόμενο από την τομή των επιπέδων (2) και (8).
11. Το επίπεδο που προκύπτει από τους άξονες (9) και (10), το οποίο θα είναι και το τελικό πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί το περίγραμμα της κοπτικής ακμής.



Σχήμα 3.4 Μια γενική εικόνα των επιπέδων και των αξόνων που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία του τελικού επιπέδου τοποθέτησης του περιγράμματος κατατομής του κοπτικού εργαλείου.

Μετά από έναν επαναληπτικό βρόγχο θα κατασκευαστούν παράλληλα επίπεδα προς το τελικό (11), τα οποία θα φέρουν και αυτά το ίδιο περίγραμμα, έτσι ώστε με την κατάλληλη εντολή Loft να κατασκευάζεται ένα συνεχές στερεό το οποίο περιγράφει την κίνηση ενός δοντιού στη συγκεκριμένη θέση κύλισης.



Σχήμα 3.5 Η κατατομή της κοπτικής ακμής, τοποθετημένη στα ισαπέχοντα επίπεδα και το στερεό που δημιουργείται από τη εντολή Loft, σε τρισδιάστατη όψη.

Στο τέλος της κάθε επανάληψης για κάθε τιμή της μεταβλητής **metritis** εξάγεται ένα αρχείο με όνομα **Trajectory_metritis**, το οποίο παρουσιάζει τη τροχιά της κατατομής της κοπτικής ακμής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Όλα τα παραπάνω για να μπορούν να εφαρμοστούν και στην κατεργασία οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδόντωσης θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και μια επιπλέον παράμετρο. Κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία η ακμή του κοπτικού εργαλείου σε αντίθεση με την ευθεία οδόντωση, στρέφεται ταυτόχρονα με τον εμβολισμό του. Άρα, γίνεται αναγκαία η προσθήκη της μεταβλητής **d_helix** η οποία υπολογίζει το βήμα με το οποίο θα στρέφεται κάθε φορά το νέο επίπεδο τοποθέτησης της κατατομής του δοντιού. Συνεπώς, αν θ η γωνία περιστροφής του οδοντωτού τροχού, φ η γωνία περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και **d_helix** το βήμα περιστροφής σε κάθε νέα επανάληψη, τότε θα ισχύει η σχέση.

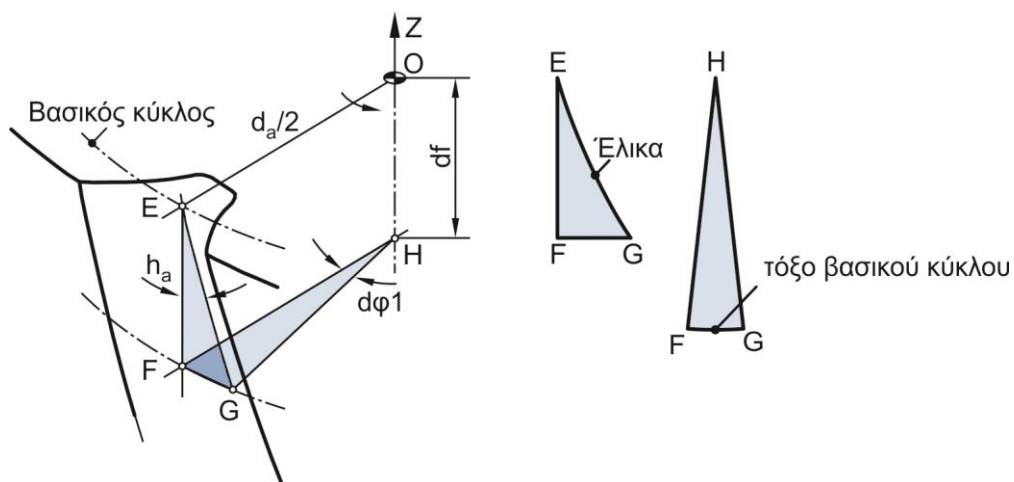
$$\varphi = \theta \cdot (z_2 / z_1) - d_helix \quad (3.11)$$

Πιο αναλυτικά ο όρος **d_helix** πρόκειται για ένα συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης. Στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης πρέπει να εισαχθεί μια επιπλέον διόρθωση στην παράμετρο φ , η οποία επιταχύνει ή επιβραδύνει τη μεταβολή της παραμέτρου προκειμένου να προσομοιωθεί η κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος της έλικας του οδοντωτού τροχού. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή της ελικοειδούς οδόντωσης. Γνωρίζοντας το ποσό της μετακίνησης κατά μήκος του άξονα του οδοντωτού τροχού και με τη βοήθεια της γωνίας ελίκωσης, υπολογίζεται από το τρίγωνο EFG το μήκος του τόξου στο βασικό κύκλο του οδοντωτού τροχού, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται στη μεταβολή της γωνίας θ . Ο υπολογισμός του συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης (3.11).

$$d_helix = 2 \cdot \text{atan} (df \cdot \sin(ha) / m \cdot z) \quad (3.12)$$

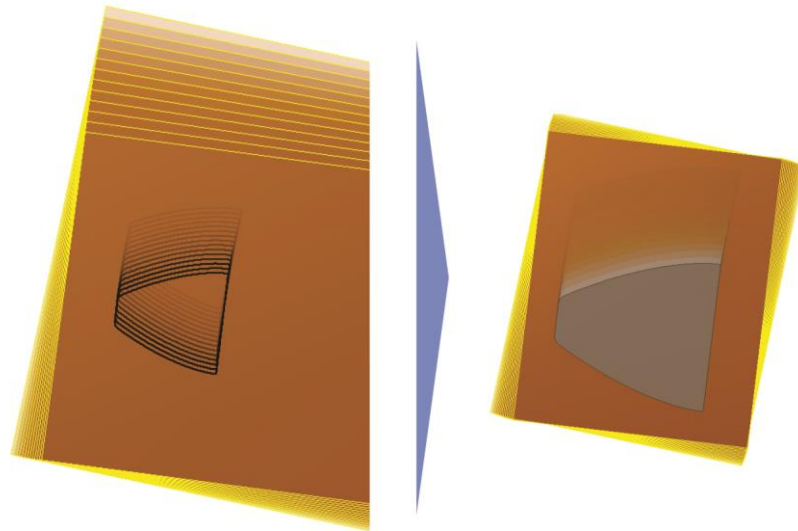
όπου:

- df: αξονική απόσταση [mm]
- ha: γωνία ελίκωσης του οδοντωτού τροχού [rad]
- m: μέτρο οδόντωσης του οδοντωτού τροχού
- z₂: αριθμός δοντιών οδοντωτού τροχού



Σχήμα 3.6 Τρόπος υπολογισμού του συντελεστή ελικοειδούς οδόντωσης

Οι σχέσεις (3.11) και (3.12) διευκολύνουν τον προγραμματιστή να σχεδιάσει ένα αυλάκι ελικοειδούς οδόντωσης με δεδομένο ότι ο οδοντωτός τροχός παραμένει ακίνητος και το κοπτικό εργαλείο στρέφεται κατά φ και εμβολίζει κατά b/e (όπου e ο αριθμός των επίπεδων τομών στο δοκίμιο) σε κάθε θέση κύλισης.



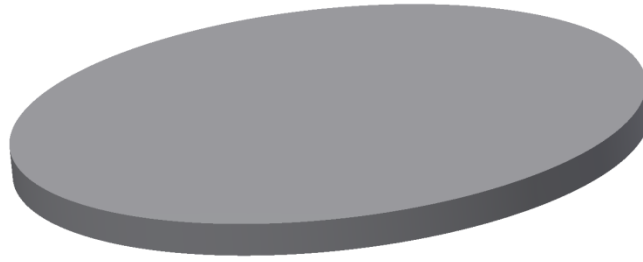
Σχήμα 3.7 Κάτοψη των επιπέδων τομής της και της παραγόμενης στερεής τροχιάς της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου για την κατεργασία οδοντωτού τροχού με ελικοειδή οδόντωση.

3.5 Σχεδιασμός κατεργαζόμενου τροχού

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής του αρχικού κυλινδρικού δοκιμίου που θα τεθεί προς κατεργασία από το κοπτικό εργαλείο. Για την δημιουργία του είναι απαραίτητη η εισαγωγή των παρακάτω μεταβλητών:

- Ακτίνα βασικού κύκλου οδοντωτού τροχού, r .
- Ακτίνα κύκλου κεφαλής οδοντωτού τροχού, r_a .
- Ύψος οδοντωτού τροχού, b .
- Αριθμός κοπτικών ακμών, z_1 .
- Μέτρο οδόντωσης του οδοντωτού τροχού, m .
- Γωνία ελίκωσης β

Το στερεό αποτέλεσμα που θα εξαχθεί, θα είναι όπως στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Ο οδοντωτός τροχός χωρίς αυλακώσεις, όπως δημιουργείται λίγο πριν την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση.

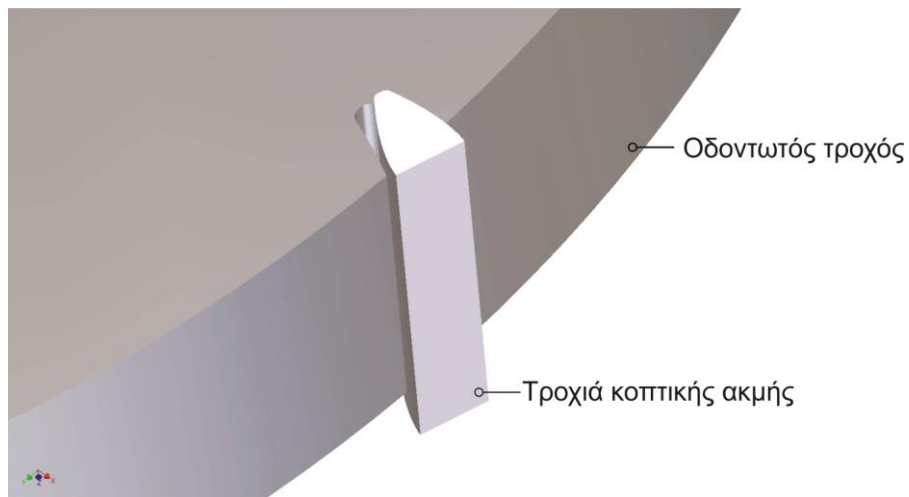
Το παραπάνω αποτέλεσμα αποθηκεύεται μαζί με τα υπόλοιπα αρχεία αυλακώσεων καθώς αποτελεί την πρώτη θέση κύλισης προτού ξεκινήσει να τίθεται υπό κατεργασία από την κοπτική ακμή.

3.6 Συναρμολόγηση

Η προσομοίωση συνεχίζεται με τη δημιουργία των αποβλίπτων καθώς και όλων των ενδιαμέσων αυλακώσεων της παραγόμενης οδόντωσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία βήματα τα οποία επαναλαμβάνονται για όλα τα δόντια τα οποία συμμετέχουν στην κοπή:

- η συναρμολόγηση της τροχιάς με τον οδοντωτό τροχό που παράχθηκε όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.5.
- η δημιουργία της γεωμετρίας του απαραμόρφωτου αποβλίπτου.
- η δημιουργία της γεωμετρίας του οδοντωτού τροχού μετά από αυτό το βήμα.

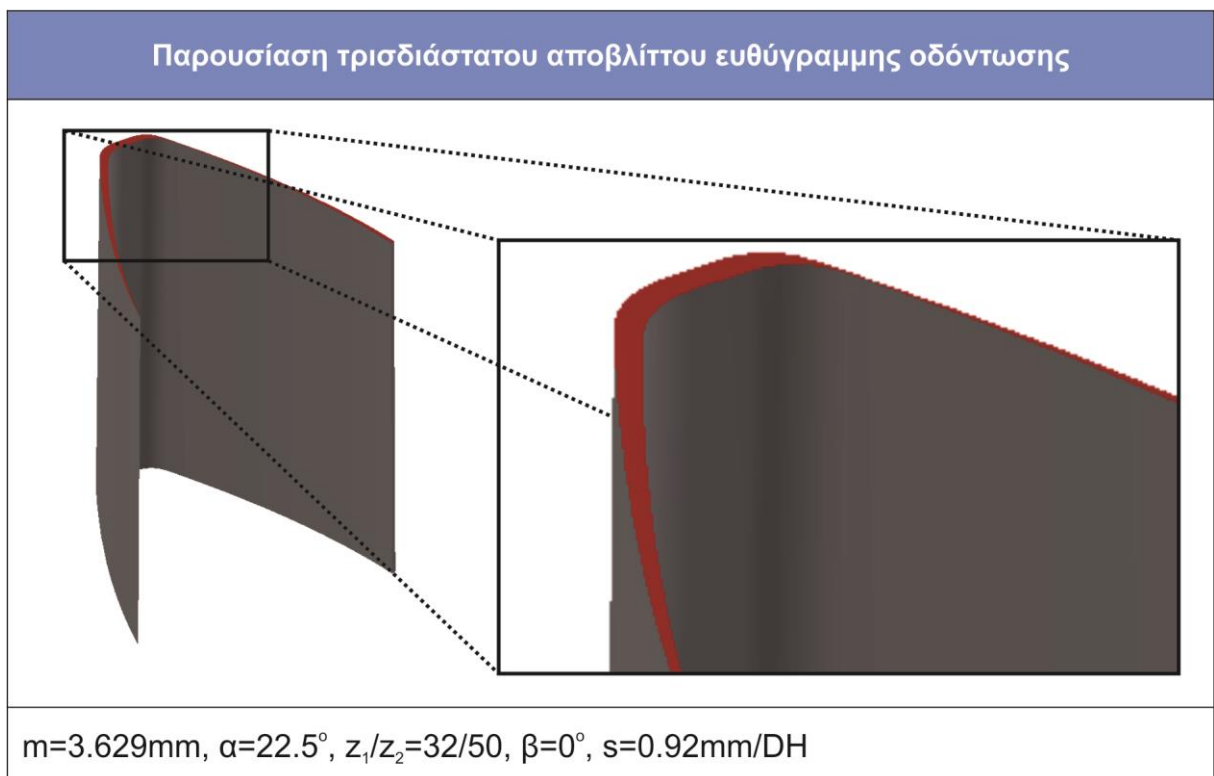
Για τη συναρμολόγηση των δύο τεμαχίων, του οδοντωτού τροχού προς κατεργασία και της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, απαιτείται η σωστή τοποθέτησή τους. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία περιορίζεται στην ταύτιση των δύο συστημάτων συντεταγμένων των δύο επιμέρους αντικειμένων, μιας και η τοποθέτηση της τροχιάς έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια παραγωγής τους. Μετά τη δημιουργία της συναρμολόγησης, το στερεό που περιγράφει τον εμβολισμό του κοπτικού τροχού χρησιμοποιείται για να χωρίσει τον όγκο του οδοντωτού τροχού σε δύο μέρη, τη γεωμετρία του οδοντωτού τροχού μετά από αυτή τη θέση κύλισης καθώς και τη γεωμετρία του παραγόμενου αποβλίπτου. Κάθε μια από τις διάφορες θέσεις κύλισης κατεργάζεται με διαφορετικό τρόπο το αυλάκι παράγοντας μια μοναδική γεωμετρία του αποβλίπτου και συμβάλλοντας στη δημιουργία της τελικής αυλάκωσης.



Σχήμα 3.9 Συναρμολόγηση οδοντωτού τροχού – τροχιάς κοπτικής ακμής κατά την πλάνιση με κύλιση για οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση

3.7 Παρουσίαση αποβλίττων

Άμεσα παράγωγα της προσομοίωσης της συναρμολόγησης είναι δύο αρχεία .ipt για κάθε θέση κύλισης, ένα με το απαραμόρφωτο απόβλιττο καθώς και ένα με το παραγόμενο αυλάκι. Για παράδειγμα, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10 ένα χαρακτηριστικό απόβλιττο συνοδευόμενο από τα δεδομένα προσομοίωσής του.

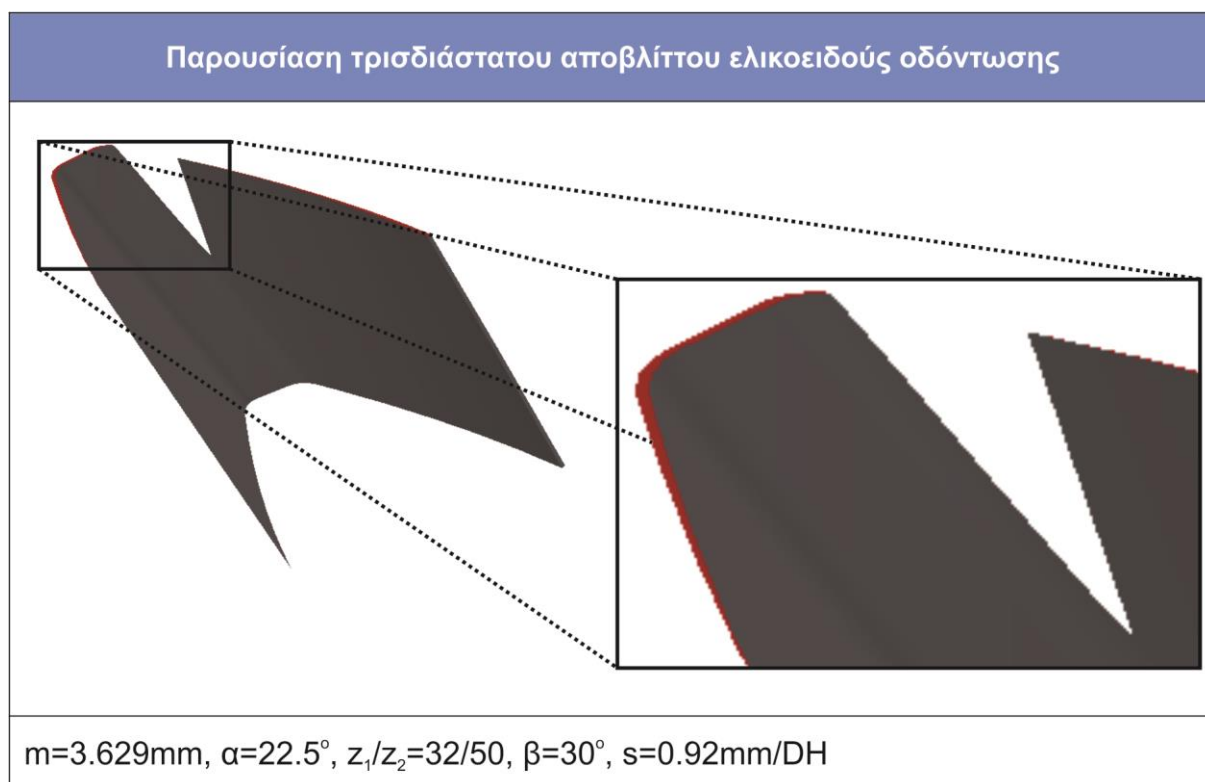


Σχήμα 3.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίττου ευθείας οδόντωσης

Το παραπάνω απόβλιττο αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αποβλίττου πλάνισης με κύλιση για ευθεία οδόντωση. Το συγκεκριμένο παράγεται από τη θέση κύλισης -15 όπου ο όγκος του αποβλίττου φτάνει στη μέγιστη τιμή του. Φαίνεται επίσης ότι συμμετέχουν στην

κοπή, τόσο η κεφαλή του κοπτικού εργαλείου όσο και οι δύο παρειές του, με την εισερχόμενη να κόβει λίγο παραπάνω από ότι η εξερχόμενη. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι η εξερχόμενη παρειά μόλις έχει κάνει τα πρώτα της «περάσματα», για αυτό το απόβλιπτο είναι ιδιαίτερος λεπτό από την πλευρά αυτή. Στη συνέχεια, γίνεται μελέτη αποβλίπτου ελικοειδούς οδόντωσης.

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό απόβλιπτο πλάνισης με κύλιση ελικοειδούς οδόντωσης. Είναι εμφανές ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας συμμετέχουν στην κοπή οι εκατέρωθεν παρειές του κοπτικού καθώς και η κεφαλή του. Παρατηρείται επίσης και η επίδραση της γωνίας ελίκωσης ($\beta=30^\circ$) καθώς το απόβλιπτο δεν είναι πλέον κάθετο στο ΧΥ επίπεδο όπως συμβαίνει με το απόβλιπτο της ευθείας οδόντωσης. Στην αρχή της θέσης κύλισης -8, που παρατίθεται παρακάτω, το δεξί τμήμα της κεφαλής και ένα μέρος της εξερχόμενης παρειάς, δεν κόβουν καθ' όλο τον εμβολισμό. Αυτό δικαιολογείται από το «σχίσσιμο» που εμφανίζεται το επάνω μέρος του αποβλίπτου.

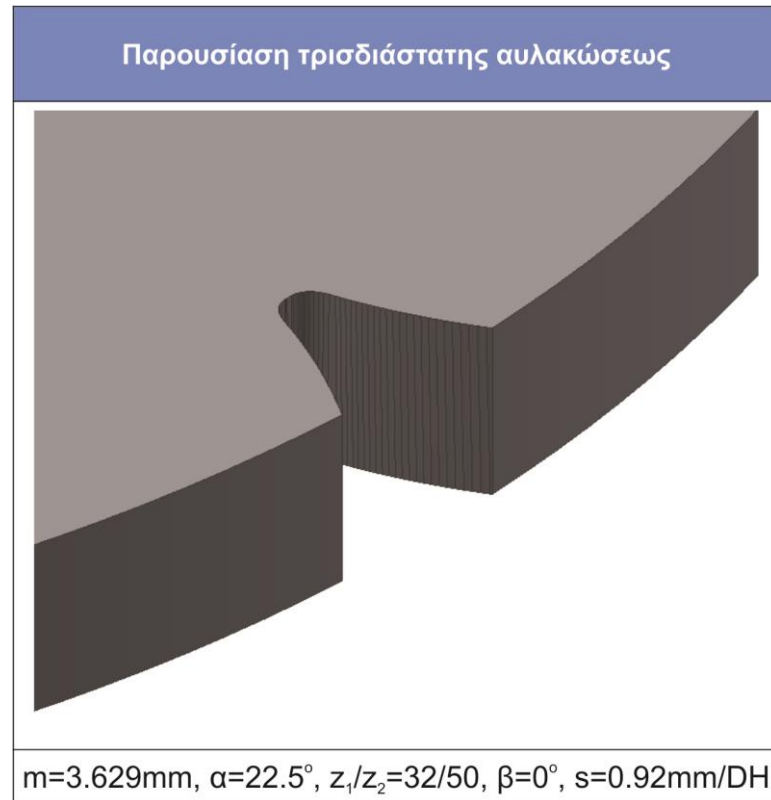


Σχήμα 3.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίπτου ευθείας οδόντωσης

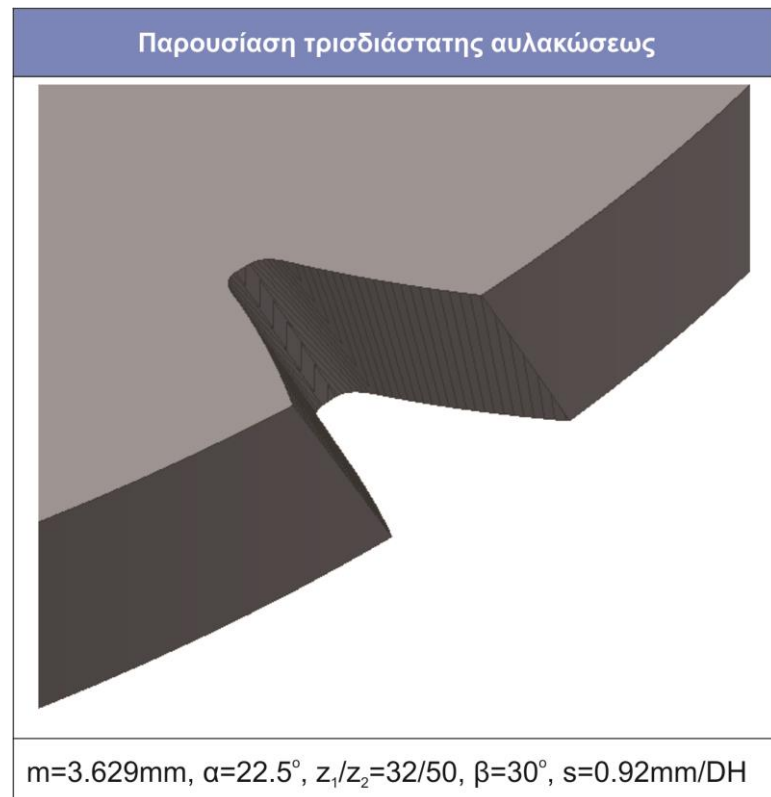
3.8 Παρουσίαση αυλακώσεων

Όπως προαναφέρθηκε, ταυτόχρονα με την παραγωγή αποβλίπτων, άμεσο επακόλουθο της συναρμολόγησης είναι και η δημιουργία αυλάκωσης σε κάθε θέση κύλισης. Λαμβάνει χώρα, δηλαδή, μια λογική αφαίρεση στερεού λόγω της διέλευσης της τροχιάς από τον οδοντωτό τροχό που κατεργάζεται. Στο σχήμα 3.12, γίνεται παρουσίαση της τελικής αυλακώσεως της ευθείας οδόντωσης με τα αντίστοιχα δεδομένα προσομοίωσης.

Ομοίως με παραπάνω, στο σχήμα 3.13, παρουσιάζεται η τελική αυλάκωση κατά την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση, αυτή τη φορά για ελικοειδή οδόντωση. Τα δεδομένα προσομοίωσης είναι ίδια με προηγουμένως με μόνη διαφορά τη γωνία ελίκωσης όπου έχουμε $\beta=30^\circ$. Η επίδραση της γωνίας ελίκωσης είναι εμφανής στην τελική αυλάκωση.



Σχήμα 3.12 Τρισδιάστατη απεικόνιση αυλακώσεως ευθείας οδόντωσης



Σχήμα 3.13 Τρισδιάστατη απεικόνιση αυλακώσεως ελικοειδούς οδόντωσης

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Παρουσίαση προσομοιώσεων

Για να υπάρξει μια συνολική εικόνα του κώδικα που παρήχθη, έγιναν αρκετές προσομοιώσεις για διάφορα δεδομένα κατεργασίας, έτσι ώστε να ελεγχθεί ότι το μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι λειτουργικό για διαφορετικές συνθήκες κοπής καθώς και για οποιοδήποτε μέγεθος οδοντωτών τροχών. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1 τέσσερις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Πίνακας προσομοιώσεων			
	Κοπτικό εργαλείο	Οδοντωτός τροχός	Δεδομένα προσομοίωσης
Case 1	$m=3.629\text{mm}$ $z_1=32$ $\alpha=22.5^\circ$	$m=3.629\text{mm}$ $z_2=50$ $\beta=0^\circ$	$s=0.92\text{mm/DH}$ $AV=-8\text{mm}$ $\delta\xi=5^\circ$
Case 2	$m=3.629\text{mm}$ $z_1=32$ $\alpha=22.5^\circ$	$m=3.629\text{mm}$ $z_2=50$ $\beta=30^\circ$	$s=0.92\text{mm/DH}$ $AV=-8\text{mm}$ $\delta\xi=5^\circ$
Case 3	$m=1\text{mm}$ $z_1=40$ $\alpha=22.5^\circ$	$m=1\text{mm}$ $z_2=100$ $\beta=0^\circ$	$s=0.35\text{mm/DH}$ $AV=0\text{mm}$ $\delta\xi=5^\circ$
Case 4	$m=1\text{mm}$ $z_1=40$ $\alpha=22.5^\circ$	$m=1\text{mm}$ $z_2=100$ $\beta=30^\circ$	$s=0.35\text{mm/DH}$ $AV=0\text{mm}$ $\delta\xi=5^\circ$

Σχήμα 4.1 Περιπτώσεις κατεργασιών που προσομοιώθηκαν

Ο λόγος που εκτελέστηκαν οι παραπάνω προσομοιώσεις ήταν διότι στο παρελθόν έχουν εκτελεστεί με τα ίδια δεδομένα κατεργασίας και από άλλους ερευνητές και οι συγκρίσεις με τις προγενέστερες προσομοιώσεις ήταν χρήσιμες για τη συνέχεια της εργασίας.

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 1”

Εν συνεχεία, γίνεται παρουσίαση των αποβλήτων σε ευθύγραμμη οδόντωση, όπως αυτή ορίζεται από τα δεδομένα της προσομοίωσης “Case 1”. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη, τα απόβλητα όλων των θέσεων κύλισης απεικονίζονται σε κάτοψη, ώστε να είναι εμφανής η διαφορά τους τόσο στη μορφή τους όσο και στο εμβαδό της διατομής τους.

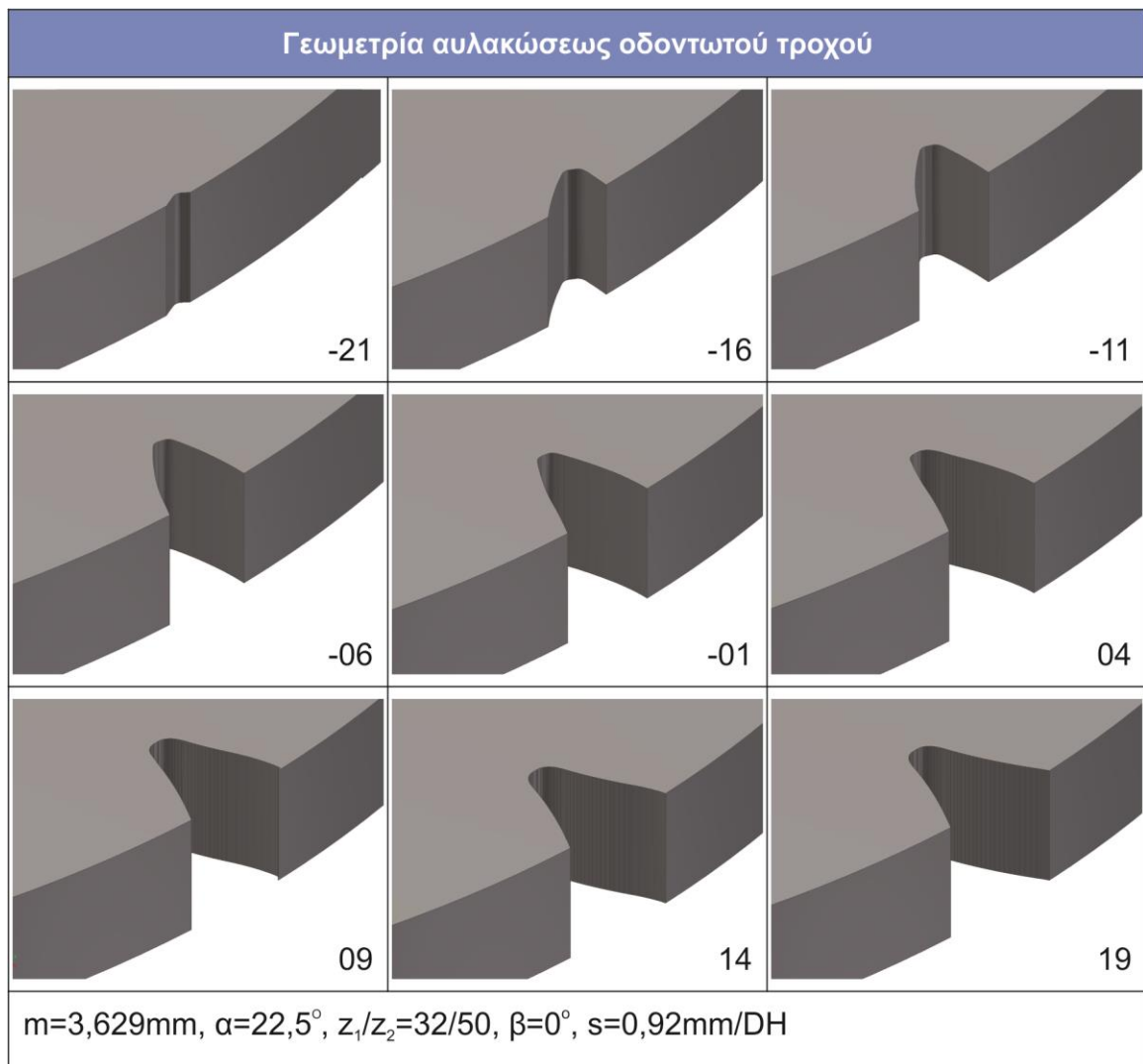
Γεωμετρία Στερεών Αποβλήτων Ευθύγραμμης Οδόντωσης				
-21 4mm	-20 	-19 	-18 	-17
-16 	-15 	-14 	-13 	-12
-11 	-10 	-09 	-08 	-07
-06 	-05 	-04 	-03 	-02
-01 	0 	01 	02 	03

Γεωμετρία Στερεών Αποβλήτων Ευθύγραμμης Οδόντωσης				
04 	05 	06 	07 	08 
09 	10 	11 	12 	13 
$m=3.629\text{mm}$, $\alpha=22.5^\circ$, $z_1/z_2=32/50$, $\beta=0^\circ$, $s=0.92\text{mm/DH}$				

Σχήμα 4.2 Παρουσίαση αποβλήτων για την κατεργασία ευθείας οδόντωσης

Από τα απόβλιττα τα οποία προκύπτουν από την κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά την ευθύγραμμη οδόντωση, εξάγονται αρκετά ενδιαφέροντα συμπεράσματα και λεπτομέρειες για την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση. Όσον αφορά τα ίδια τα απόβλιττα παρατηρείται, ότι κατά τη θέση κύλισης -15, το συγκεκριμένο απόβλιττο έχει το μεγαλύτερο εμβαδό διατομής. Το ίδιο απόβλιττο έχει και το μεγαλύτερο όγκο από τα υπόλοιπα, καθώς πρόκειται για κατεργασία ευθύγραμμης οδόντωσης (δηλ. $\beta=0^\circ$) και το ύψος δοντιού είναι σταθερό για όλες τις θέσεις κύλισης (δηλ. $b=10\text{mm}$). Αναφορικά με τη κατεργασία, παρατηρείται ότι αυτή ξεκινά στη θέση κύλισης -21, με την κεφαλή της κοπτικής ακμής να είναι η πρώτη που έρχεται σε επαφή με το υπό επεξεργασία τεμάχιο, όπως φαίνεται στο επάνω αριστερά τμήμα του σχήματος 4.2. Από την ακριβώς επόμενη θέση κύλισης λαμβάνει μέρος στην κοπή και η εισερχόμενη (αριστερή) παρειά του κοπτικού. Η κατεργασία συνεχίζεται τόσο στην εισερχόμενη παρειά όσο και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Η εξερχόμενη παρειά ξεκινά την κατεργασία του οδοντωτού τροχού στη θέση κύλισης -18. Η κατεργασία συνεχίζεται με τα απόβλιττα να μεγαλώνουν σε μέγεθος μέχρι και τη θέση κύλισης -15 όπου όπως προαναφέρθηκε, ο όγκος του αποβλήτου φτάνει στη μέγιστη τιμή του. Από τη θέση κύλισης -21 μέχρι και τη θέση κύλισης 0, τα απόβλιττα έχουν την ίδια μορφή με το πάχος τους να είναι μεγαλύτερο κοντά στην κεφαλή. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο προχωράει η κατεργασία η συμμετοχή της εισερχόμενης παρειάς μειώνεται και αυτή της εξερχόμενης αυξάνεται. Από τη θέση κύλισης -1 έως και τη τελευταία θέση κύλισης, τα απόβλιττα χωρίζονται σε δύο επιμέρους υποαπόβλιττα. Το μεγαλύτερο από τα δύο είναι αυτό που παράγεται από την εξερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου. Τέλος η κατεργασία ολοκληρώνεται με τη θέση κύλισης 21.

Στο σημείο αυτό, γίνεται παρουσίαση των αυλακώσεων της ίδιας προσομοίωσης. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη, οι αυλακώσεις όλων των θέσεων κύλισης απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη, ώστε να είναι εμφανής η διαφορά στη μορφή τους, καθώς τόσο η κάτοψη όσο και η πρόοψη δεν μπορούν από μόνες τους να μας δώσουν μια ολοκληρωτική εικόνα για τα αποτελέσματα της κατεργασίας.



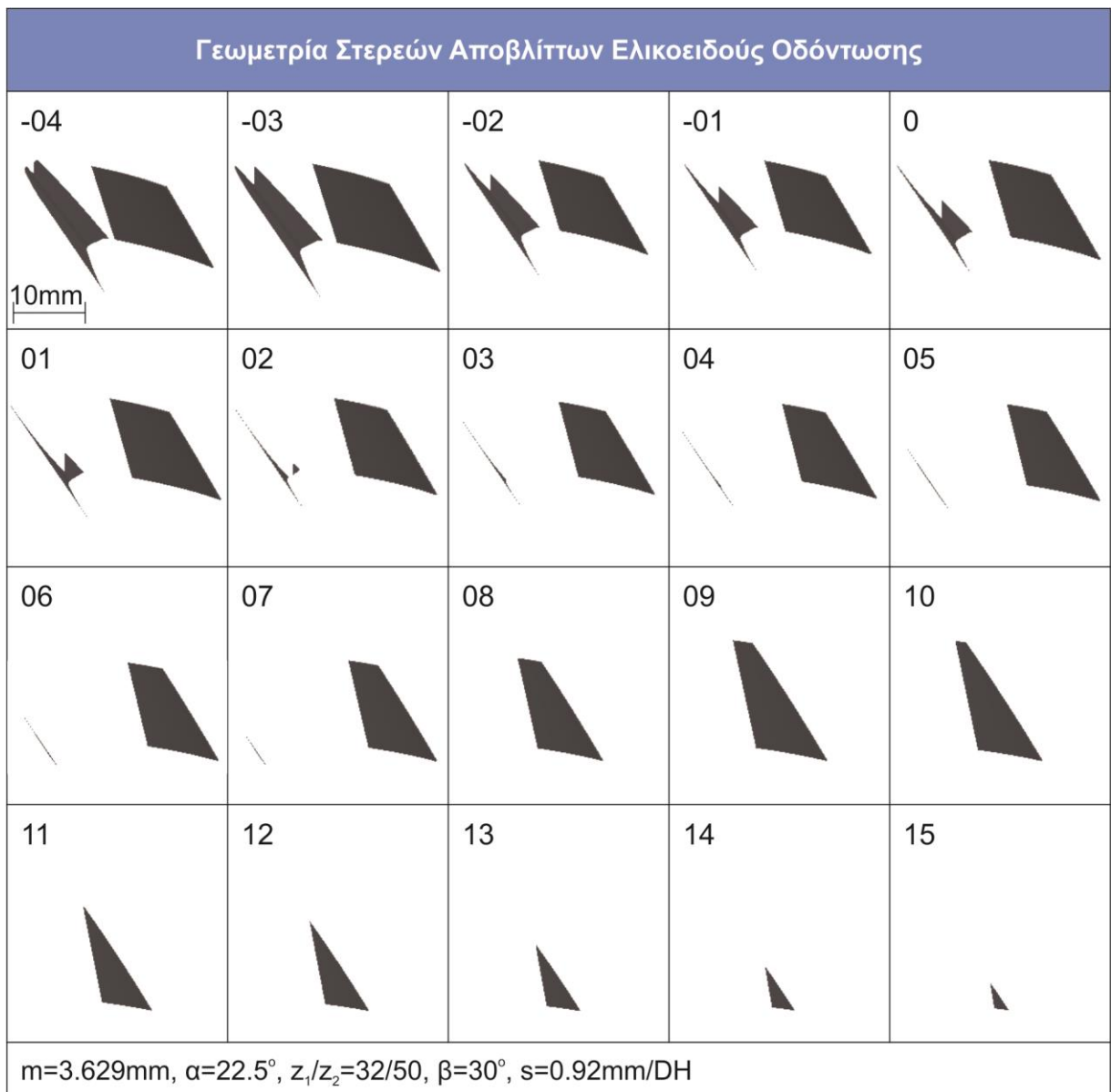
Σχήμα 4.3 Παρουσίαση αυλακώσεων για την κατεργασία ευθείας οδόντωσης

Παρατηρώντας το σχήμα 4.3 μπορούμε να εξάγουμε αρκετά συμπεράσματα για την κοπή. Η κεφαλή του κοπτικού μας εργαλείου ξεκινάει να κόβει από τη θέση κύλισης -21, ενώ μέχρι και τη θέση κύλισης -16 το αυλάκι έχει αρχίσει να παίρνει την πρώιμη μορφή του με τη συμμετοχή της εισερχόμενης παρειάς. Στη θέση κύλισης 4 το κοπτικό εργαλείο έχει εισχωρήσει στο μέγιστο σημείο και το αυλάκι ξεκινά να παίρνει τη τελική του μορφή. Η τελική αυλάκωση σχηματίζεται, όπως φαίνεται στο κάτω δεξιό μέρος του παραπάνω σχήματος, στη θέση κύλισης 19. Τα παραπάνω στιγμιότυπα παρουσιάζονται ανά 5 θέσεις κύλισης, διότι είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς δια γυμνού οφθαλμού τις διαφορές στο σχήμα της αυλάκωσης μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων.

4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 2”

Ακολουθεί, παρουσίαση των αποβλήτων σε πλάγια οδόντωση, όπως αυτή ορίζεται από τα δεδομένα της προσομοίωσης “Case 2”.

Γεωμετρία Στερεών Αποβλήτων Ελικοειδούς Οδόντωσης				
-34  10mm	-33 	-32 	-31 	-30 
-29 	-28 	-27 	-26 	-25 
-24 	-23 	-22 	-21 	-20 
-19 	-18 	-17 	-16 	-15 
-14 	-13 	-12 	-11 	-10 
-09 	-08 	-07 	-06 	-05 

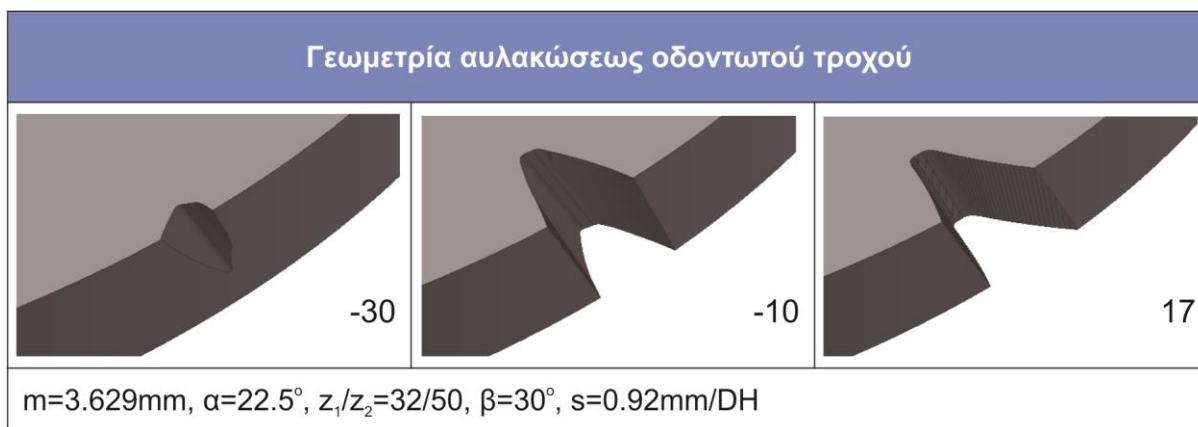


Σχήμα 4.4 Παρουσίαση αποβλήτων για την κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης

Όσον αφορά τα απόβλιττα του σχήματος 4.4 παρατηρείται ότι η κοπή ξεκινά στη θέση κύλισης -34, με την κεφαλή της κοπτικής ακμής να είναι η πρώτη που έρχεται σε επαφή με το υπό επεξεργασία τεμάχιο, όπως φαίνεται στο επάνω αριστερά τμήμα του ίδιου σχήματος. Από την ακριβώς επόμενη θέση κύλισης λαμβάνει μέρος στην κοπή και η εισερχόμενη (αριστερή) παρειά του κοπτικού. Η κατεργασία συνεχίζεται τόσο στην εισερχόμενη παρειά όσο και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Η εξερχόμενη παρειά ξεκινά την κατεργασία του οδοντωτού τροχού στη θέση κύλισης -28. Η κατεργασία συνεχίζεται με τα απόβλιττα να μεγαλώνουν σε μέγεθος. Στη θέση κύλισης -10 φαίνεται για πρώτη φορά ότι στα πρώτα επίπεδα κοπής η κεφαλή δεν έρχεται σε επαφή με τον οδοντωτό τροχό, παρά μόνο όταν κατεβεί λίγα επίπεδα παρακάτω. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει και στις επόμενες θέσεις κύλισης με μεγαλύτερη ένταση κάθε φορά έως ότου φτάσουμε στη θέση κύλισης -4 όπου το απόβλιττο χωρίζεται σε 2 επιμέρους υποαπόβλιττα. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο προχωράει η κατεργασία η συμμετοχή της εισερχόμενης παρειάς μειώνεται και αυτή της εξερχόμενης αυξάνεται. Το μεγαλύτερο από τα δύο είναι αυτό που παράγεται από την εξερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου. Τέλος η κατεργασία ολοκληρώνεται με τη θέση

κύλισης 17. Οι τελευταίες δύο θέσεις κύλισης δεν εμφανίζονται λόγω του πολύ μικρού μεγέθους του στερεού, γεγονός που θα τις καθιστούσε δυσανάγνωστες.

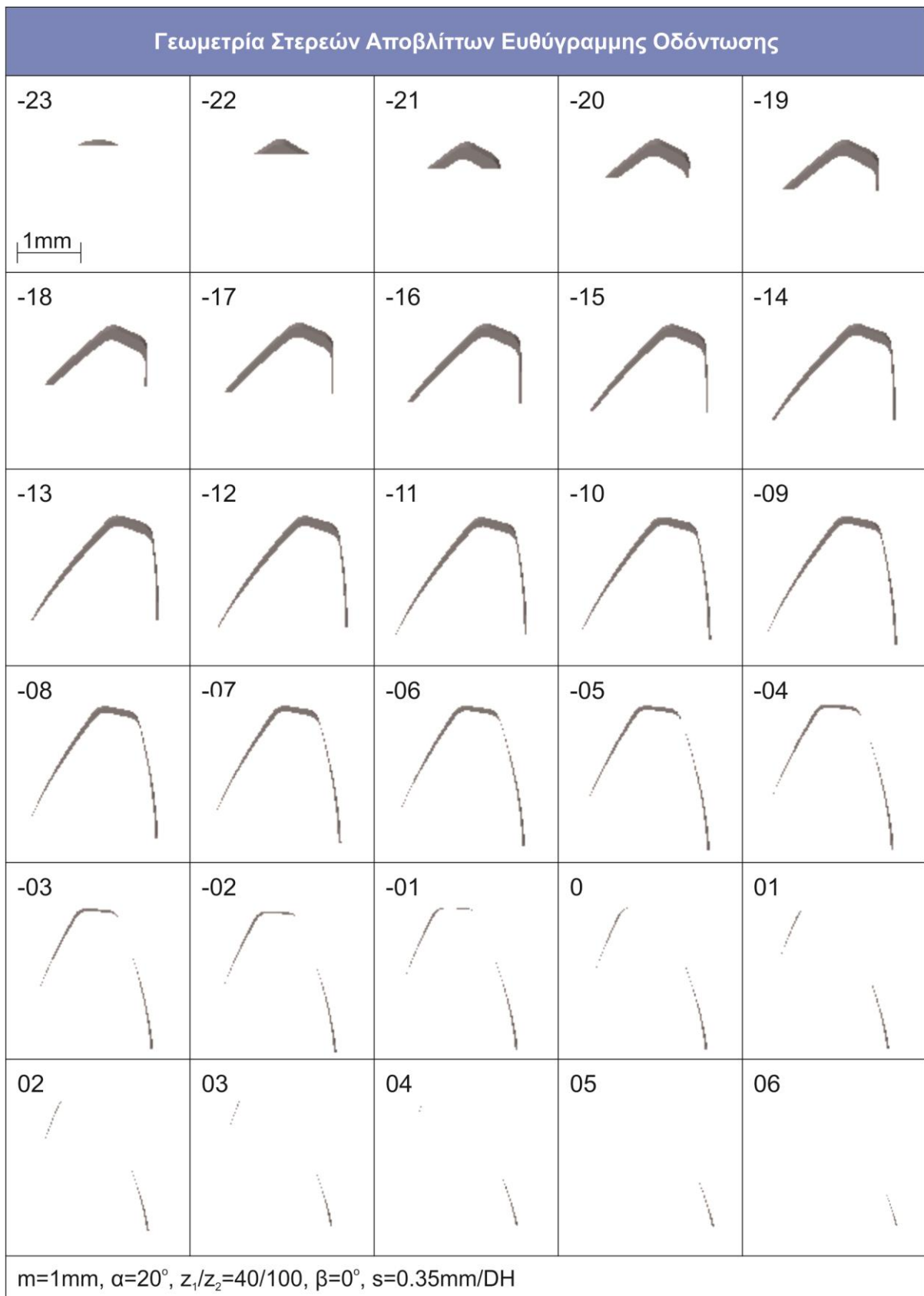
Στο σημείο αυτό, γίνεται παρουσίαση των αυλακώσεων της ίδιας προσομοίωσης. Για την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας, παρουσιάζεται η αυλάκωση για τρεις διαφορετικές θέσεις κύλισης, την πρώτη, την τελευταία καθώς και μια ενδιάμεση. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Παρουσίαση αυλακώσεων για την κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης

4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 3”

Εν συνεχεία, γίνεται παρουσίαση των αποβλίπτων σε ευθύγραμμη οδόντωση, όπως αυτή ορίζεται από τα δεδομένα της προσομοίωσης “Case 3”. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη, τα απόβλιττα όλων των θέσεων κύλισης απεικονίζονται ως προς τη κάτωσή τους, ώστε να είναι εμφανής η διαφορά τους τόσο στη μορφή τους όσο και στο εμβαδό της διατομής τους.

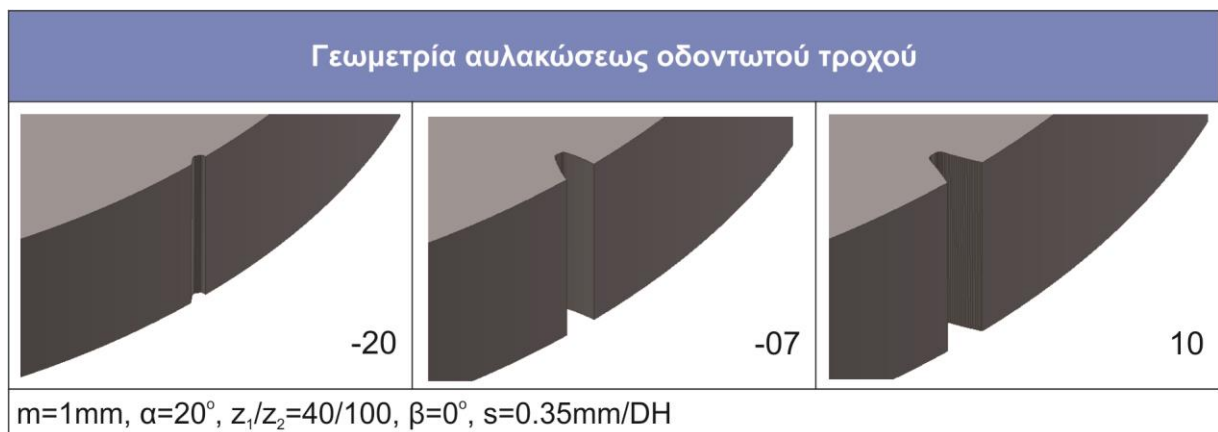


Σχήμα 4.6 Παρουσίαση αποβλήτων για την κατεργασία ευθείας οδόντωσης

Από τα απόβλιττα τα οποία προκύπτουν από την κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά την ευθύγραμμη οδόντωση, εξάγονται αρκετά ενδιαφέροντα συμπεράσματα και λεπτομέρειες για

την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση. Όσον αφορά τα ίδια τα απόβλιττα παρατηρείται, ότι κατά τη θέση κύλισης -16, το συγκεκριμένο απόβλιττο έχει το μεγαλύτερο εμβαδό διατομής. Το ίδιο απόβλιττο έχει και το μεγαλύτερο όγκο από τα υπόλοιπα, καθώς πρόκειται για κατεργασία ευθύγραμμης οδόντωσης (δηλ. $\beta=0^\circ$) και το ύψος δοντιού είναι σταθερό για όλες τις θέσεις κύλισης (δηλ. $b=10\text{mm}$). Αναφορικά με τη κατεργασία, παρατηρείται ότι αυτή ξεκινά στη θέση κύλισης -23, με την κεφαλή της κοπτικής ακμής να είναι η πρώτη που έρχεται σε επαφή με το υπό επεξεργασία τεμάχιο, όπως φαίνεται στο επάνω αριστερά τμήμα του σχήματος 4.6. Μετά από δύο θέσεις κύλισης λαμβάνει μέρος στην κοπή και η εισερχόμενη (αριστερή) παρειά του κοπτικού. Η κατεργασία συνεχίζεται τόσο στην εισερχόμενη παρειά όσο και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Η εξερχόμενη παρειά ξεκινά την κατεργασία του οδοντωτού τροχού στη θέση κύλισης -19. Η κατεργασία συνεχίζεται με τα απόβλιττα να μεγαλώνουν σε μέγεθος μέχρι και τη θέση κύλισης -16 όπου όπως προαναφέρθηκε, ο όγκος του αποβλίττου φτάνει στη μέγιστη τιμή του. Από τη θέση κύλισης -23 μέχρι και τη θέση κύλισης -7, τα απόβλιττα έχουν την ίδια μορφή με το πάχος τους να είναι μεγαλύτερο κοντά στην κεφαλή. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο προχωράει η κατεργασία η συμμετοχή της εισερχόμενης παρειάς μειώνεται και αυτή της εξερχόμενης αυξάνεται. Από τη θέση κύλισης -6 έως και τη τελευταία θέση κύλισης, τα απόβλιττα χωρίζονται σε δύο επιμέρους υποαπόβλιττα. Το μεγαλύτερο από τα δύο είναι αυτό που παράγεται από την εξερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου. Τέλος η κατεργασία ολοκληρώνεται με τη θέση κύλισης 06.

Στο σημείο αυτό, γίνεται παρουσίαση των αυλακώσεων της ίδιας προσομοίωσης. Για την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας, παρουσιάζεται η αυλάκωση για τρεις διαφορετικές θέσεις κύλισης, την πρώτη, την τελευταία καθώς και μια ενδιάμεση. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Παρουσίαση αυλακώσεων για την κατεργασία ευθύγραμμης οδόντωσης

4.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης “Case 4”

Ακολουθεί, παρουσίαση των αποβλίπτων σε πλάγια οδόντωση, όπως αυτή ορίζεται από τα δεδομένα της προσομοίωσης “Case 4”.

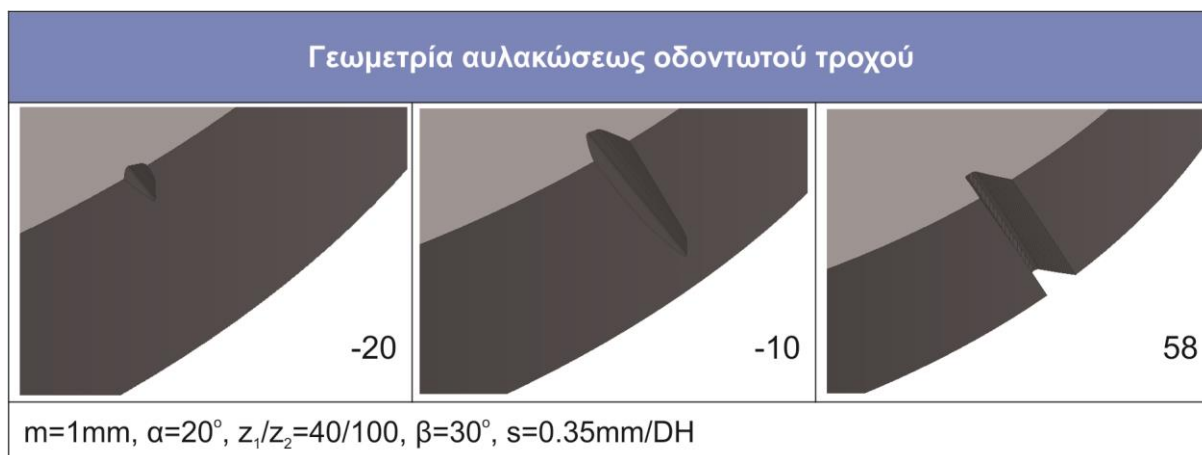
Γεωμετρία Στερεών Αποβλήτων Ελικοειδούς Οδόντωσης				
-22  7mm	-21 	-20 	-19 	-18 
-17 	-16 	-15 	-14 	-13 
-12 	-11 	-10 	-09 	-08 
-07 	-06 	-05 	-04 	-03 
-02 	-01 	0 	01 	02 
03 	04 	05 	06 	07 

Γεωμετρία Στερεών Αποβλήτων Ελικοειδούς Οδόντωσης				
08  7mm	09 	10 	11 	12 
13 	14 	15 	16 	17 
18 	19 	20 	21 	22 
23 	24 	25 	26 	27 
m=1mm, $\alpha=20^\circ$, $z_1/z_2=40/100$, $\beta=30^\circ$, $s=0.35\text{mm/DH}$				

Σχήμα 4.8 Παρουσίαση αποβλήτων για την κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης

Όσον αφορά τα απόβλιττα του σχήματος 4.8 παρατηρείται ότι η κοπή ξεκινά στη θέση κύλισης -22, με την κεφαλή της κοπτικής ακμής να είναι η πρώτη που έρχεται σε επαφή με το υπό επεξεργασία τεμάχιο, όπως φαίνεται στο επάνω αριστερά τμήμα του ίδιου σχήματος. Από την ακριβώς επόμενη θέση κύλισης λαμβάνει μέρος στην κοπή και η εισερχόμενη (αριστερή) παρειά του κοπτικού. Η κατεργασία συνεχίζεται τόσο στην εισερχόμενη παρειά όσο και στην κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Η εξερχόμενη παρειά ξεκινά την κατεργασία του οδοντωτού τροχού στη θέση κύλισης -18. Η κατεργασία συνεχίζεται με τα απόβλιττα να μεγαλώνουν σε μέγεθος. Στη θέση κύλισης -03 φαίνεται για πρώτη φορά ότι στα πρώτα επίπεδα κοπής η κεφαλή δεν έρχεται σε επαφή με τον οδοντωτό τροχό («σχίσισμο»), παρά μόνο όταν κατεβεί λίγα επίπεδα παρακάτω. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει και στις επόμενες θέσεις κύλισης με μεγαλύτερη ένταση κάθε φορά έως ότου φτάσουμε στη θέση κύλισης 13 όπου το απόβλιττο χωρίζεται σε 2 επιμέρους υποαπόβλιττα. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο προχωράει η κατεργασία η συμμετοχή της εισερχόμενης παρειάς μειώνεται και αυτή της εξερχόμενης αυξάνεται. Το μεγαλύτερο από τα δύο είναι αυτό που παράγεται από την εξερχόμενη παρειά του κοπτικού εργαλείου. Τέλος η κατεργασία ολοκληρώνεται με τη θέση κύλισης 27.

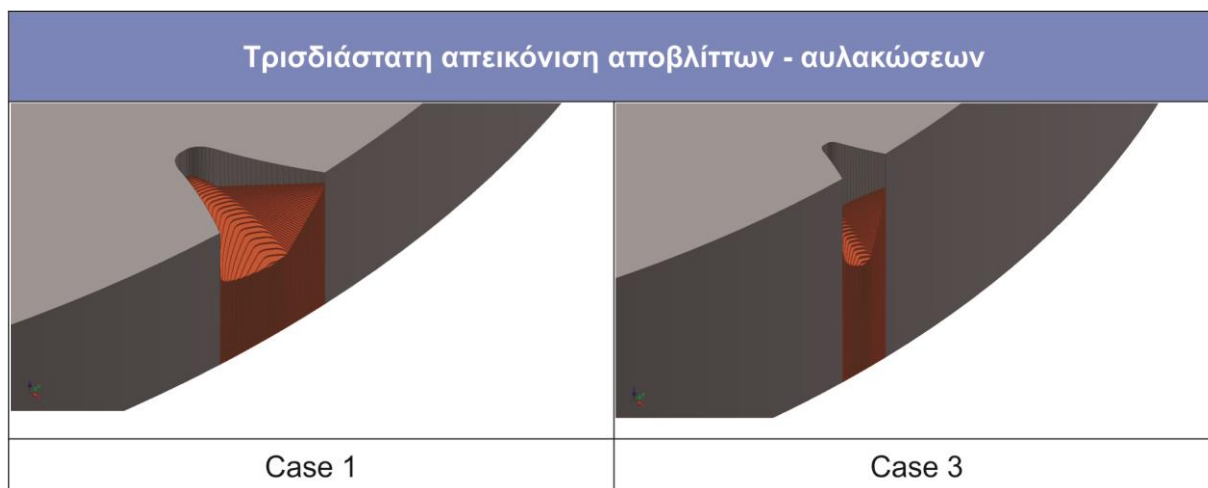
Στο σημείο αυτό, γίνεται παρουσίαση των αυλακώσεων της ίδιας προσομοίωσης. Για την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας, παρουσιάζεται η αυλάκωση για τρεις διαφορετικές θέσεις κύλισης, την πρώτη, την τελευταία καθώς και μια ενδιάμεση. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Παρουσίαση αυλακώσεων για την κατεργασία ελικοειδούς οδόντωσης

4.6 Συσχετισμός αποβλίπτων – αυλακώσεως

Ακολουθεί το σχήμα 4.10, το οποίο απεικονίζει τις αυλακώσεις στις δύο περιπτώσεις ευθύγραμμης οδόντωσης να έχουν γεμίσει το κενό τους με όλα τα απόβλιττα που προήλθαν από όλες τις θέσεις κύλισης. Αυτό δίνει στον αναγνώστη μια πολύπλευρη κατανόηση της κατεργασίας και συγκεκριμένα με το πώς κινείται το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με τον οδοντωτό τροχό, πόσο απόβλιττο αποκόπτεται σε κάθε θέση κύλισης και ποια είναι η ακριβής θέση του μέσα στην αυλάκωση.



Σχήμα 4.10 Συσχετισμός αποβλίπτων - αυλακώσεων

5. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την επαλήθευση της ορθότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν αναλυτικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία καθώς και αποτελέσματα προηγούμενων μοντέλων προγενέστερων ερευνητών.

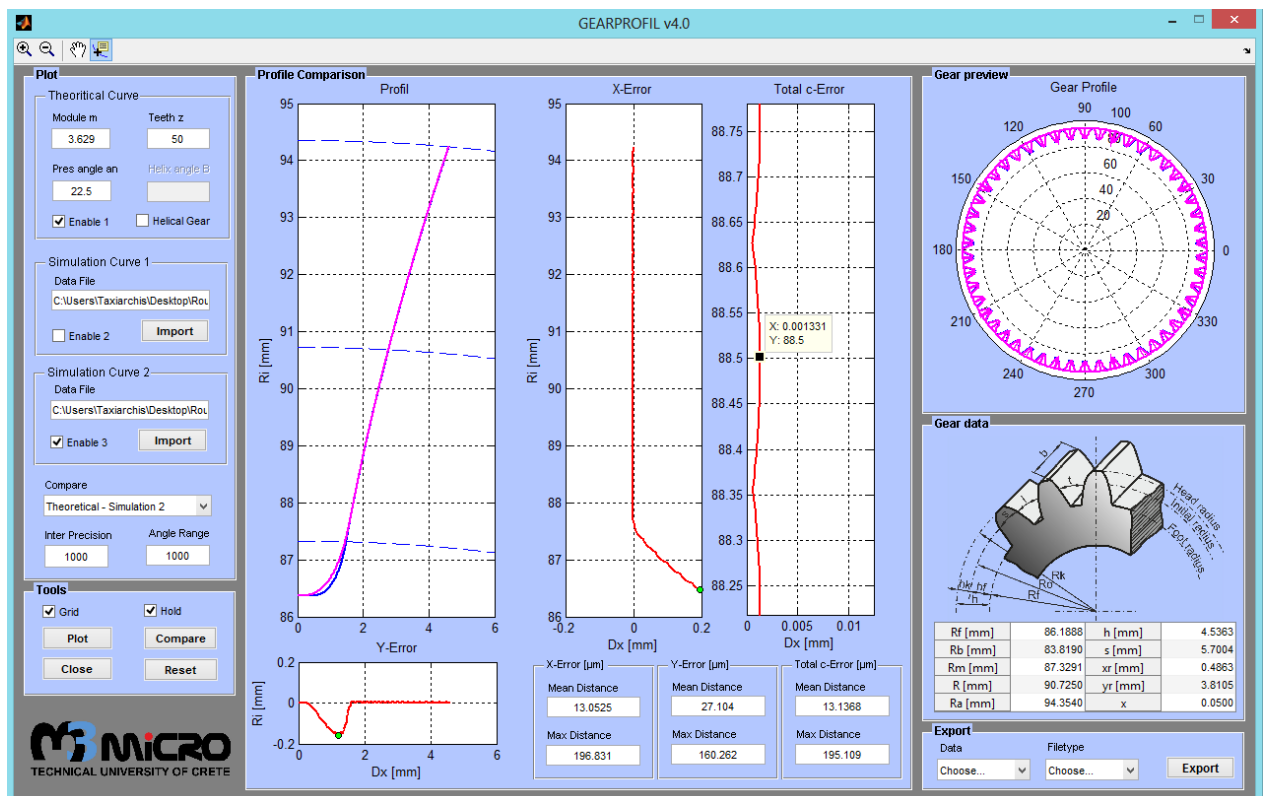
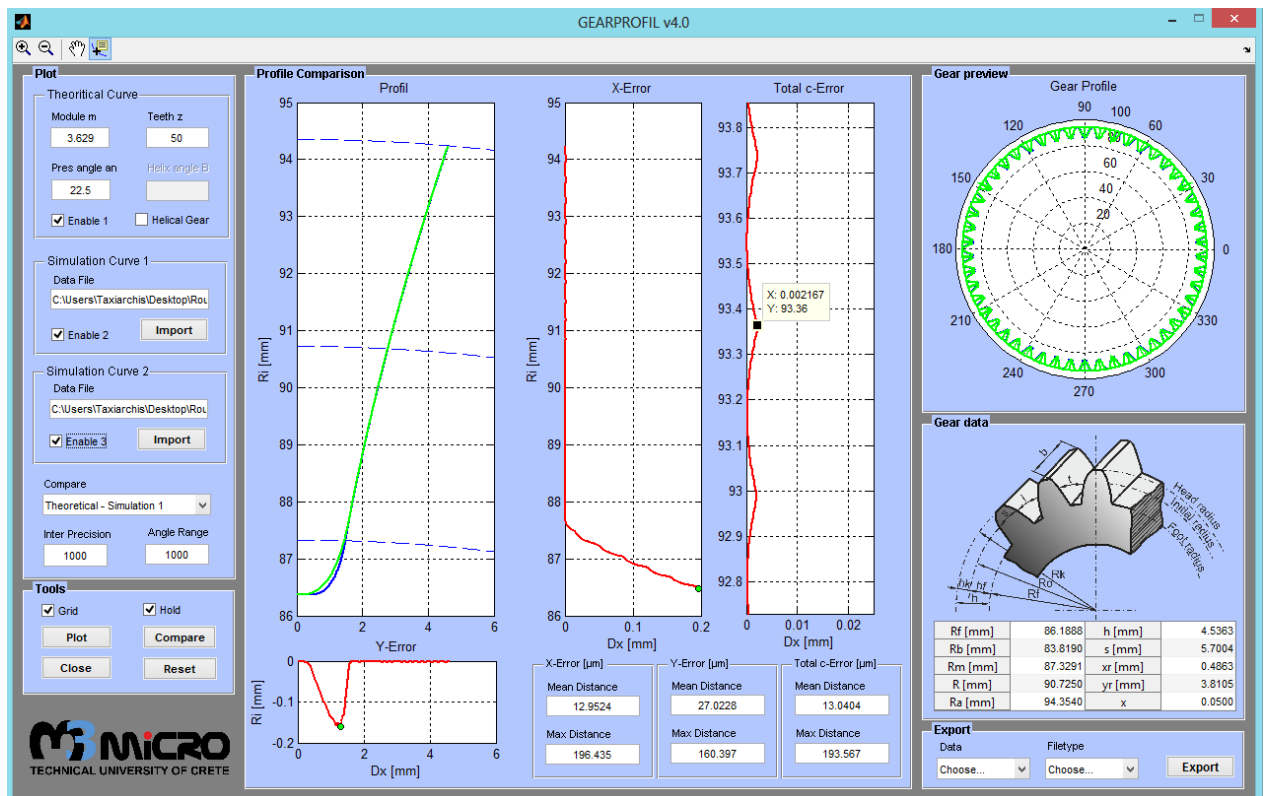
Σε αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό που δημιουργήθηκε στο εργαστήριο μικροκοπής και κατασκευαστικής προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ορθή επαλήθευση. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει μετρήσεις της ποιότητας των οδοντωτών τροχών που δημιουργήθηκαν με το μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε. Στα αριστερά της φόρμας συμπλήρωσης, ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα του οδοντωτού τροχού που θα εξετασθεί και τις παραμέτρους της κατεργασίας. Επίσης, η εφαρμογή δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες του αυλακιού μιας οποιασδήποτε οδόντωσης και τις συγκρίνει με τις συντεταγμένες ενός πρότυπου αυλακιού με ίδιο μέτρο οδόντωσης και αριθμό δοντιών.

Μετά το τέλος των υπολογισμών, στα δεξιά της φόρμας παρουσιάζονται τρία διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη διαφορά μεταξύ των δύο. Αναλυτικότερα το λογισμικό υπολογίζει τη θεωρητική κατατομή του αυλακιού και συγκρίνει τα σημεία της με αυτά της κατατομής προς έλεγχο, υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο τα σφάλματα στους άξονες X και Y. Για όλα τα σημεία της κατατομής προς έλεγχο υπολογίζεται η απόσταση των δύο κατατομών ως το μήκος του τόξου του κύκλου (c-error).

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης ενός προτύπου αυλακιού με ένα αυλάκι που παράγεται από το πρόγραμμα προσομοίωσης, τόσο για την εισερχόμενη όσο και για την εξερχόμενη παρειά, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η κατατομή του αυλακιού που προκύπτει από την προσομοίωση διαφέρει ελάχιστα από το πρότυπο αυλάκι και από τις δύο πλευρές. Το σφάλμα προσομοιωμένου και θεωρητικού αυλακιού καθ' όλες τις προσομοιώσεις οφείλεται σε μια σειρά από παράγοντες που περιλαμβάνουν την κινηματική της κατεργασίας, τη μορφή του κοπτικού εργαλείου καθώς και τις συνθήκες της κατεργασίας.

5.1 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case 1”

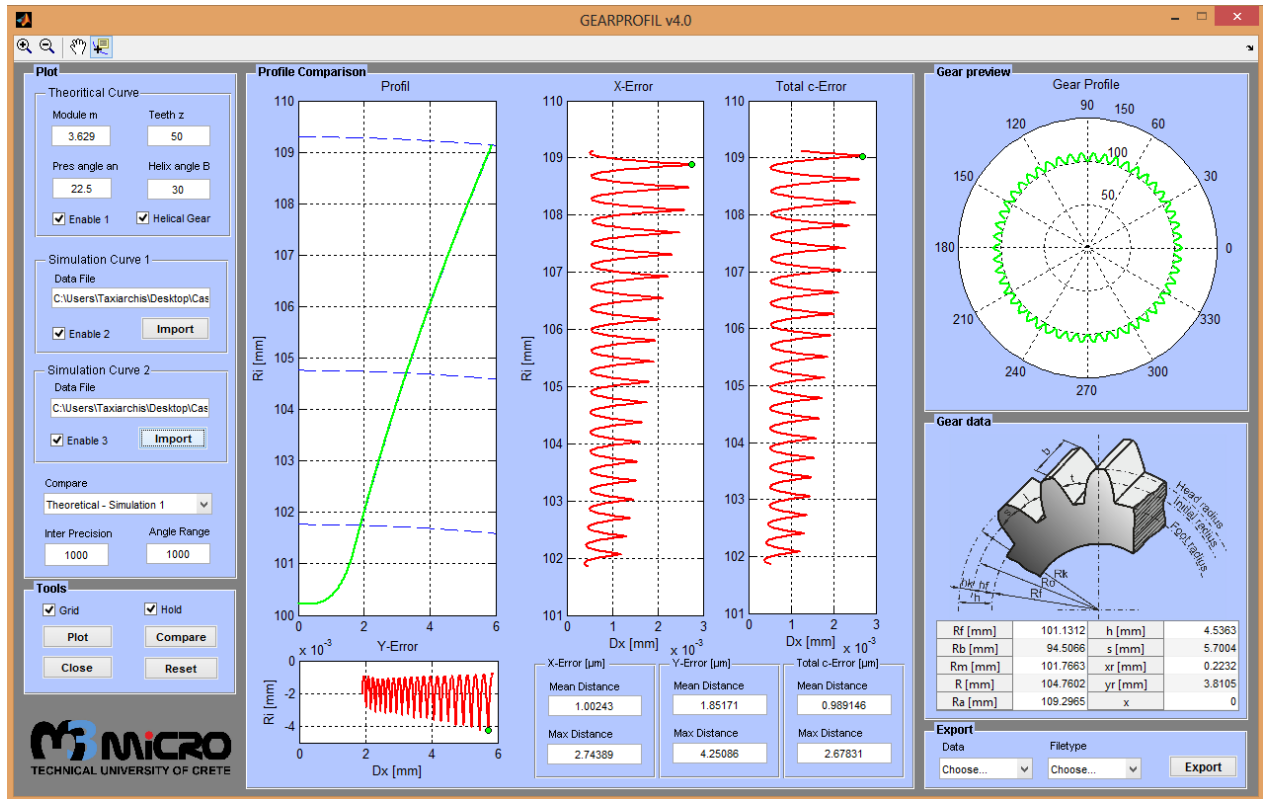
Παρακάτω παρατίθεται για την προσομοίωση “Case 1” η επαλήθευση της παραγόμενης αυλάκωσης και για της δύο παρειές. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1 το σφάλμα που προκύπτει μεταξύ υπολογισμένη και θεωρητικής παρειάς είναι αμελητέο. Η μη πλήρη ταύτιση που παρατηρείται στο πόδι της εξελεγμένης οφείλεται στις ιδιαιτερότητες της κινηματικής της κατεργασίας.



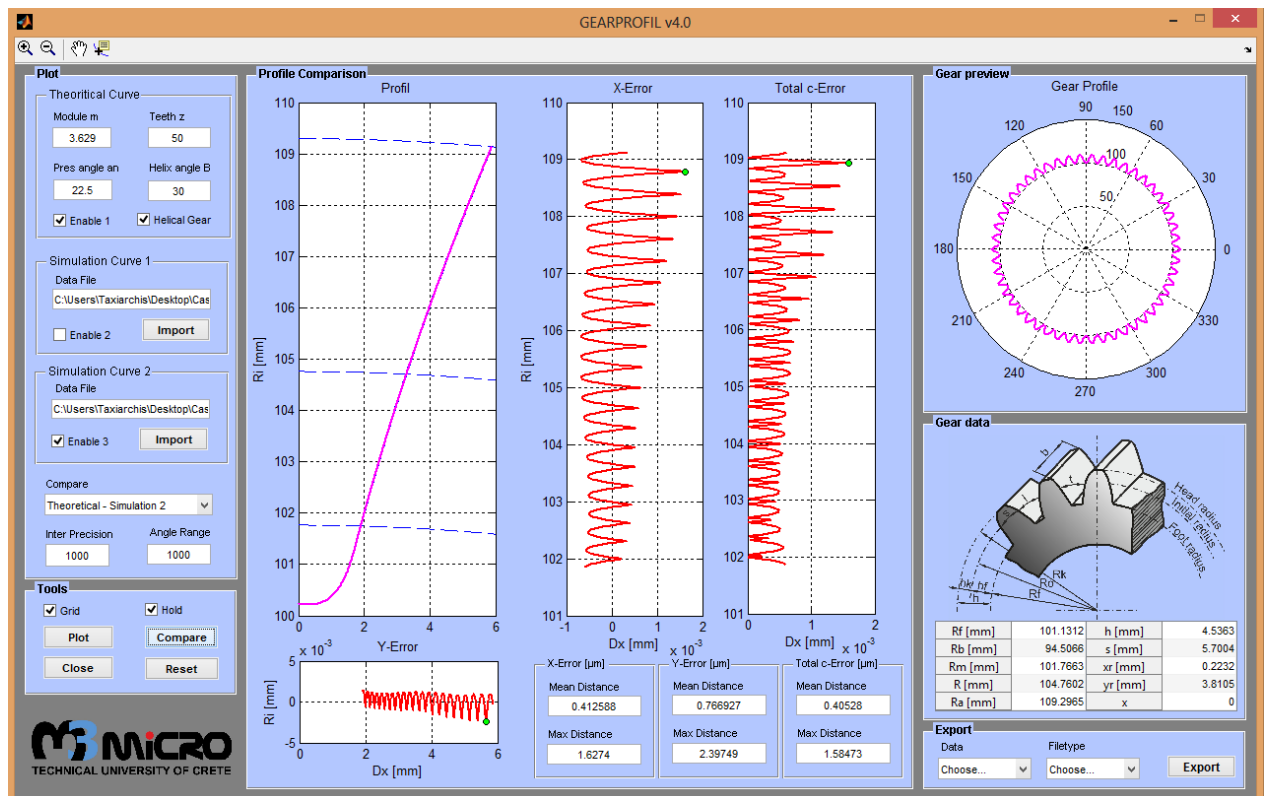
Σχήμα 5.1 Επαλήθευση εισερχόμενης και εξερχόμενης παρειάς

5.2 Επαλήθευση του αυλακίου της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case 2”

Παρακάτω παρατίθεται για την προσομοίωση “Case 2” η επαλήθευση της παραγόμενης αυλάκωσης και για της δύο παρειές. Στα σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνεται ότι τόσο στην εισερχόμενη όσο και στην εξερχόμενη παρειά η τραχύτητα είναι μεγαλύτερη προς το τέλος της εξελιγμένης ενώ εν αντιθέσει στην αρχή της η τραχύτητα είναι μικρή λόγω των περισσότερων εμβολισμών που λαμβάνουν χώρα στο συγκεκριμένο σημείο.



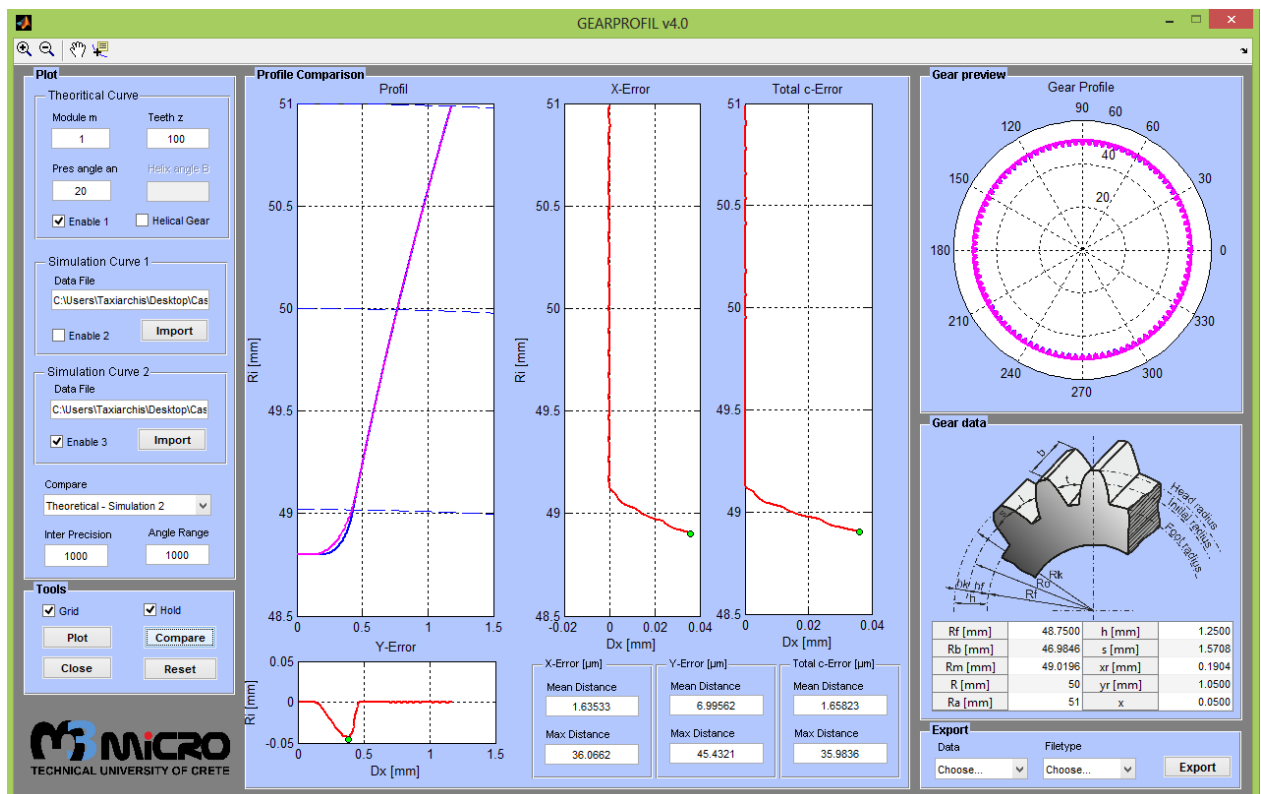
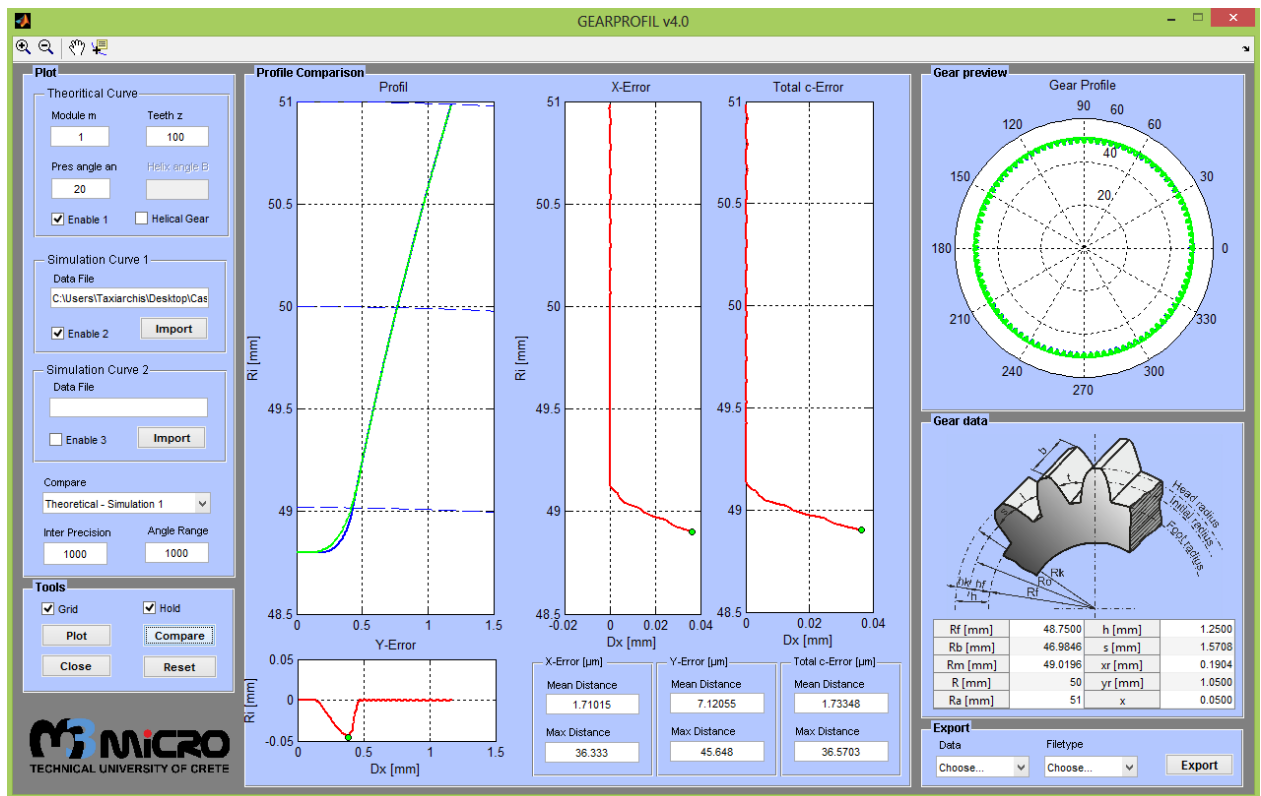
Σχήμα 5.2 Επαλήθευση εισερχόμενης παρειάς



Σχήμα 5.3 Επαλήθευση εξερχόμενης παρειάς

5.3 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case 3”

Στη συνέχεια παρατίθεται για την προσομοίωση “Case 3” η επαλήθευση της παραγόμενης αυλάκωσης και για της δύο παρειές. Στο σχήμα 5.4 φαίνεται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ευθύγραμμης οδόντωσης οι δύο υπολογισμένες παρειές δεν συμπίπτουν ακριβώς στην αρχή της εξελεγμένης αλλά αυτό όπως διατυπώθηκε και προηγουμένως συμβαίνει εξαιτίας της κινηματικής της κατεργασίας.

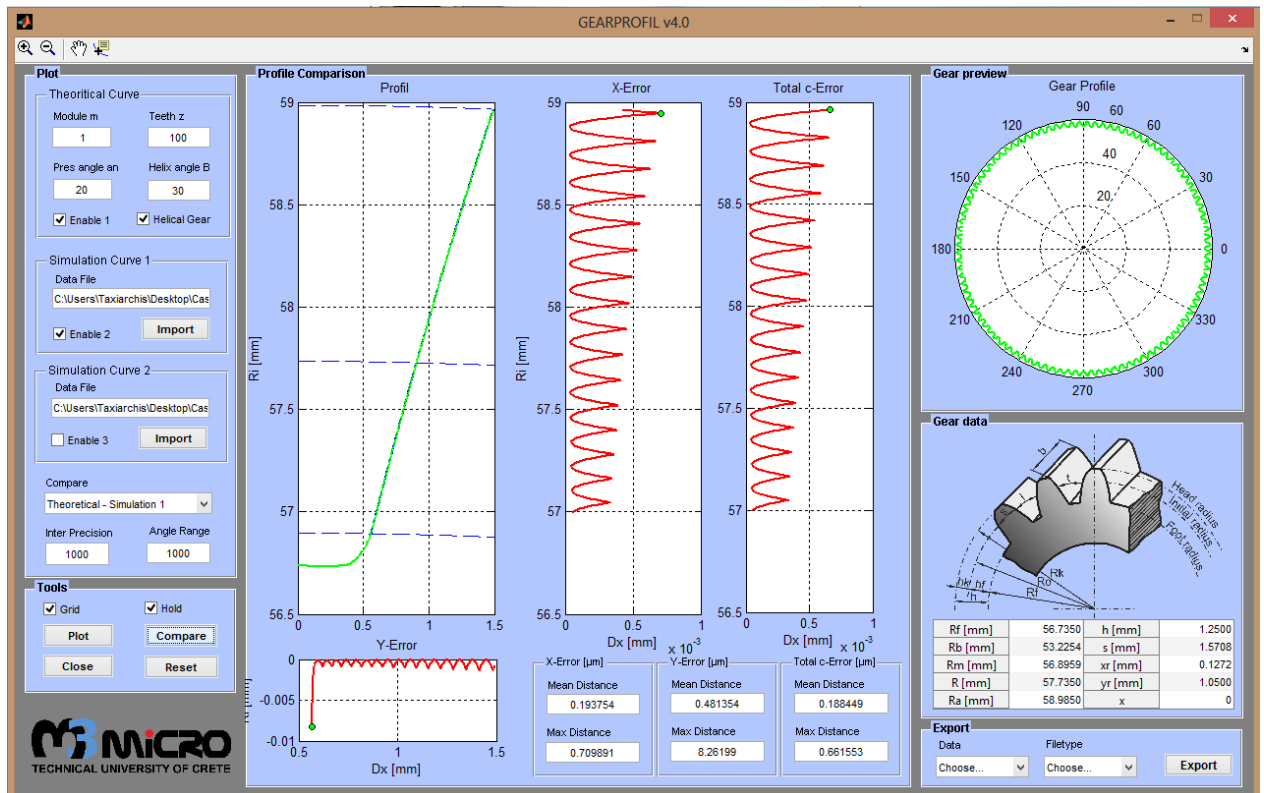


Σχήμα 5.4 Επαλήθευση της εισερχόμενης και εξερχόμενης παρειάς

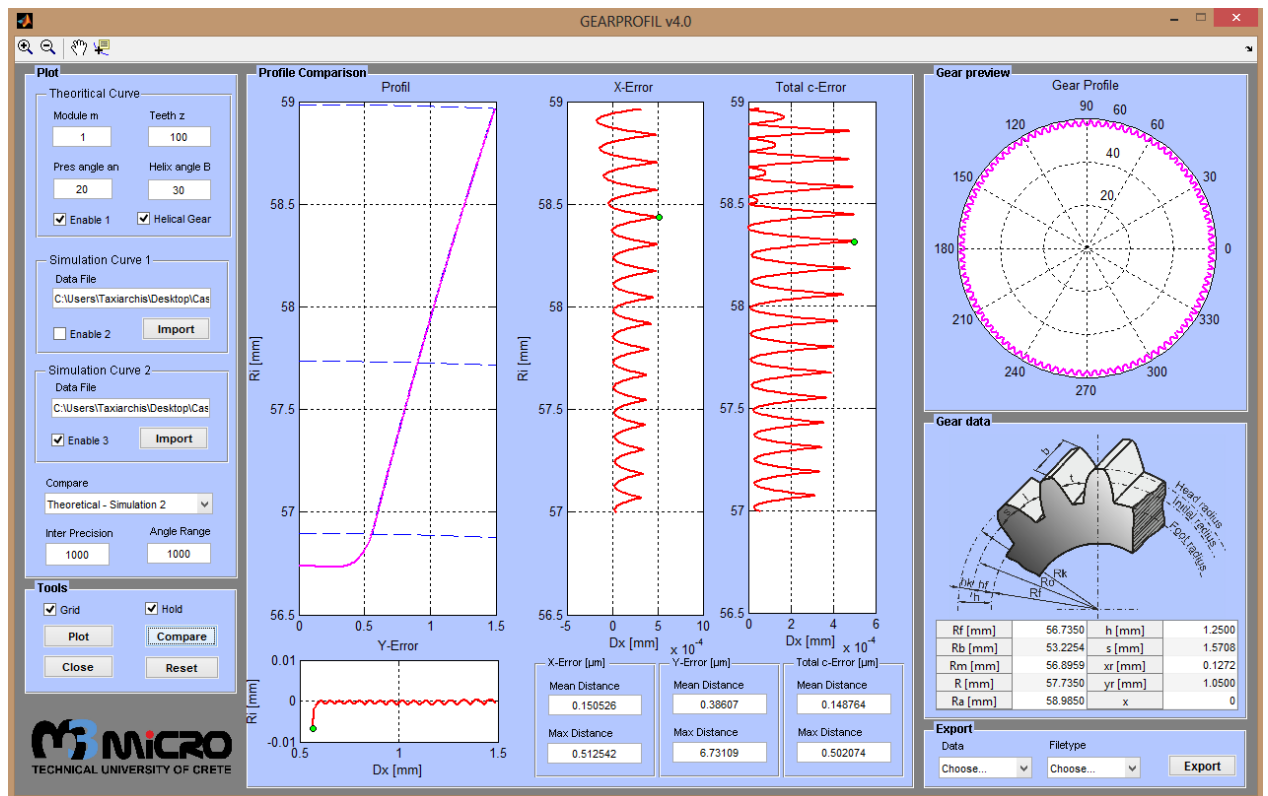
5.4 Επαλήθευση του αυλακιού της οδόντωσης της προσομοίωσης “Case 4”

Ακολουθεί η επαλήθευση της αυλάκωσης για την προσομοίωση “Case 2”, για της δύο παρειές. Στα σχήματα 5.5 και 5.6 φαίνεται ότι τόσο στην εισερχόμενη όσο και στην

εξερχόμενη παρειά η τραχύτητα είναι μεγαλύτερη προς το τέλος της εξελεγμένης ενώ εν αντιθέσει στην αρχή της η τραχύτητα είναι μικρή λόγω των περισσότερων εμβολισμών που λαμβάνουν χώρα στο συγκεκριμένο σημείο.



Σχήμα 5.5 Επαλήθευση εισερχόμενης παρειάς



Σχήμα 5.6 Επαλήθευση εισερχόμενης και εξερχόμενης παρειάς

6. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας ήταν η τρισδιάστατη μοντελοποίηση μιας εκ των πολλών κατεργασιών οδοντωτών τροχών, της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Η μοντελοποίηση αυτή έγινε εξ' ολοκλήρου σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic όπως αυτή υποστηρίζεται στο λογισμικό Autodesk® Inventor® 2012.

Πρωταρχικός στόχος ήταν ο σχεδιασμός της κατατομής του κοπτικού εργαλείου σύμφωνα με το DIN 3972 και ακολούθως με τη δημιουργία κατάλληλων επιπέδων, αξόνων και σημείων, ορίσθηκε η τροχιά πάνω στην οποία κινήθηκε το προφίλ του κοπτικού εργαλείου που σχεδιάστηκε σε προηγούμενο στάδιο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του ακατέργαστου κυλίνδρου που με την κατάλληλη συναρμολόγησή του με το κοπτικό εργαλείο, παρήγαγε τα αντίστοιχα απόβλιπτα. Για όλη την παραπάνω μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις, οι οποίες καλύπτουν περιπτώσεις τόσο ευθύγραμμης όσο και πλάγιας οδόντωσης. Τέλος, όλες οι προσομοιώσεις επαληθεύτηκαν ως προς τη γεωμετρία των παραγόμενων αυλακώσεων με πρόγραμμα του εργαστηρίου μικροκοπής και κατασκευαστικής προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ως μελλοντική επέκταση του μοντέλου μπορεί να ορισθεί η δημιουργία κώδικα ο οποίος θα προσομοιώνει κοπή οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση για εσωτερική οδόντωση. Επιπλέον, μια ακόμα βελτιωτική κίνηση που μπορεί να γίνει είναι η δημιουργία περιβάλλοντος χρήστη ο οποίος θα καταχωρεί σε ένα Interface τα δεδομένα της προσομοίωσης της κοπής και πατώντας ένα κουμπί να παίρνει τα επιθυμητά αποτελέσματα και αρχεία.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αντωνιάδης Αριστομένης, Μηχανουργική Τεχνολογία Τόμος Β': Κατεργασίες Κοπής, 2010.
- [2] Ταπόγλου Νικόλαος, Προσομοίωση οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση και διερεύνηση των τεχνολογικών της παραμέτρων, Ph.D. Thesis, 2012.
- [3] Sulzer Gerd, Leistungssteigerung bei der Zylinderradherstellung durch genaue Erfassung der Zerspankinematik, Ph.D. Thesis, 1973.
- [4] Bouzakis Konstantinos-Dionysios, Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Wälzstoßen durch Optimierung des Zerspanprozesses und der Werkzeugauslegung, Ph.D. Thesis 1976.
- [5] Βαλούς Αθανάσιος, Υπολογισμός δυνάμεων κοπής κατά την πλάνιση οδοντώσεων με κύλιση, Διπλωματική εργασία 1987.
- [6] Müller H. Dieter, Zahnradbetriebe, 1998.
- [7] König W., Bouzakis K., Handbuch zur Ermittlung der Zerspankraftkomponenten beim Wälzstoßen, 1976.
- [8] Thämer Reinhard, Untersuchung der Hauptschnittkraft beim Wälzstoßen von Geradstirnrädern, 1963.
- [9] Bouzakis Konstantinos-Dionysios, Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Wälzfräsen, 1981.
- [10] König W., Weck M., Zahnrad und Getriebeuntersuchungen, 1975.