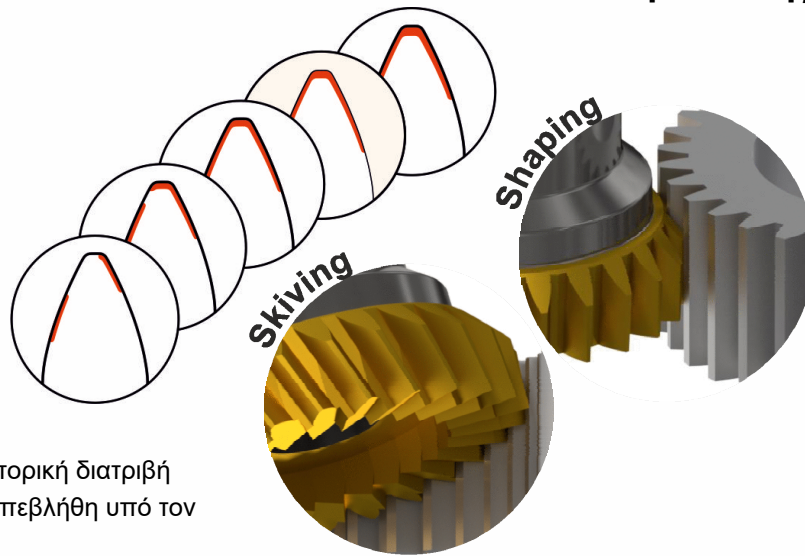


# Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις κατεργασίες οδοντώσεων πλάνισης και αποφλοίωσης με κύλιση



Διδακτορική διατριβή  
που υπεβλήθη υπό τον

Διπλ. Μηχ. Άγγελο Μαρινάκη

Χανιά, Σεπτέμβριος 2023

2023

Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις κατεργασίες οδοντώσεων πλάνισης και αποφλοίωσης με κύλιση



<http://www.m3.tuc.gr>



Μ3 Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

2

Βελτιστοποίηση των τεχνολογικών παραμέτρων για τις κατεργασίες οδοντώσεων πλάνισης και αποφλοίωσης με κύλιση

- 1: Εισαγωγή
- 2: Στάθμη των γνώσεων
- 3: Μοντέλο προσομοίωσης των κατεργασιών οδοντώσεων
- 4: Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής
- 5: Λογισμικό Oplitis
- 6: Διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών κ
- 7: Σύνοψη – Μελλοντικ

2023



Δομή της διατριβής

<http://www.m3.tuc.gr>



Μ3 Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

## Αντικείμενο της διατριβής:

Ανάπτυξη και επιβεβαίωση ενός ολοκληρωμένου λογισμικού προσομοίωσης των κατεργασιών της **πλάνισης** και της **αποφλοιώσης** με κύλιση οδοντώσεων με χρήση ενός εμπορικού πακέτου CAD.

## Σπουδαιότητα του αντικειμένου:

Οι κατεργασίες της πλάνισης και της αποφλοιώσης με κύλιση οδοντώσεων αποτελούν δύο από τις πιο σημαντικές κατεργασίες κοπής οδοντώσεων και τις κατεχοχόν κατεργασίες κατασκευής εσωτερικών οδοντωτών τροχών.

Ειδικά για την αποφλοιώση με κύλιση, το ερευνητικό ενδιαφέρον για μελέτη και βελτιστοποίηση έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της υψηλής παραγωγικότητας και ποιότητας που προσφέρει.

Ένα ολοκληρωμένο **μοντέλο προσομοίωσης** των κατεργασιών συμβάλλει:

- στην πρόβλεψη των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας.
- στην εξοικονόμηση χρόνου και κόστους της διαδικασίας επιλογής των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας.
- στη μείωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων που οφείλεται σε αστοχίες των συνθηκών κοπής.

2023



## Αντικείμενο της διατριβής

<http://www.m3.tuc.gr>


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

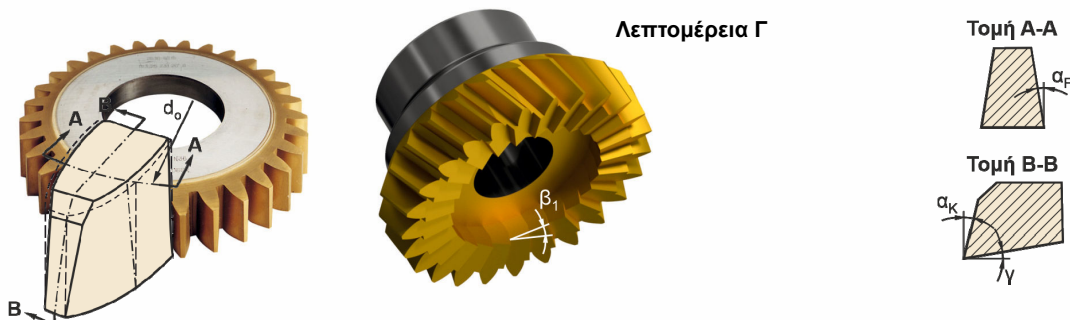
**Μορφή:** Εξωτερικός κυλινδρικός οδοντωτός τροχός με οδοντώσεις εξελιγμένης καμπύλης

Ύψος κεφαλής  $h_k = 1.25 \cdot m_n$  Ύψος ποδός  $h_f = m_n$

Γωνίες ελευθερίας  $\alpha_k, \alpha_f$  → Αποφυγή συγκρούσεων κατά την κοπή.

Γωνία αποβλίπτου  $\gamma$  → Διευκολύνει τον σχηματισμό και τη ροή των αποβλίπτων.

Γωνία ελίκωσης  $\beta_1$  → Απαραίτητη για κατεργασία πλάγιων οδοντώσεων.



2023



## Γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου στην πλάνιση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>

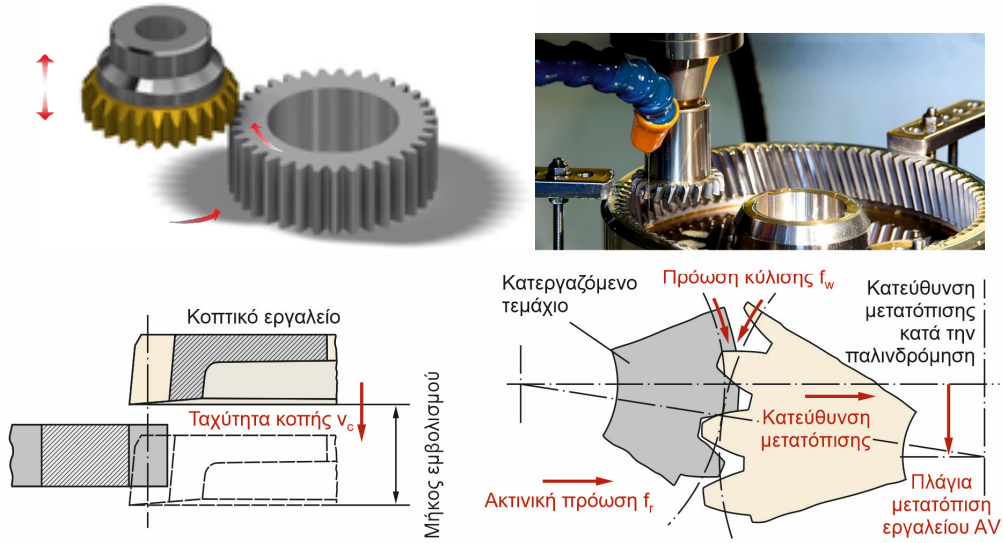

Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

Η βασική κίνηση κοπής στην κατεργασία εκτελείται από μία κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση του κοπτικού εργαλείου ίση με την **ταχύτητα κοπής  $v_c$** , που ονομάζεται **εμβολισμός**.

Σε κάθε εμβολισμό σχηματίζεται και αφαιρείται ένα **απόβλιττο** σε όλο το πλάτος της οδόντωσης, διαδικασία που ονομάζεται **θέση κύλισης**.

Σχέση μετάδοσης: 
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$



2023



**Κινηματική της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων**

<http://www.m3.tuc.gr>



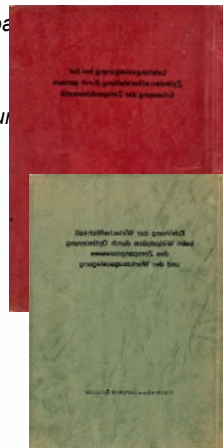
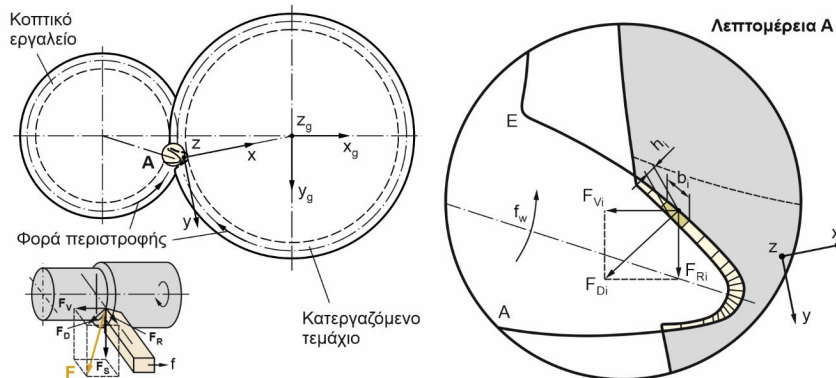
Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

**Άγγελος Μαρινάκης**

**Sulzer, G. /1973**  
“Leistungssteigerung Bei Der Zylinderradherstellung Durch Genaue Erfassung Der Zerspankinematik,”  
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

**Bouzakis, K.-D. /1976**  
“Erhöhung Der Wirtschaftlichkeit Beim Wälzstossen Durch Optimierung Des Zerspanwerkzeugauslegung,” Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

**Bouzakis, K.-D., and König, W. /1978**  
“Ermittlung Der Zerspantparameterkomponenten Beim Walzstossen,” Verein Dtsch. Ingenieure



2023



**Προσομοιωτικά μοντέλα της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων**

<http://www.m3.tuc.gr>

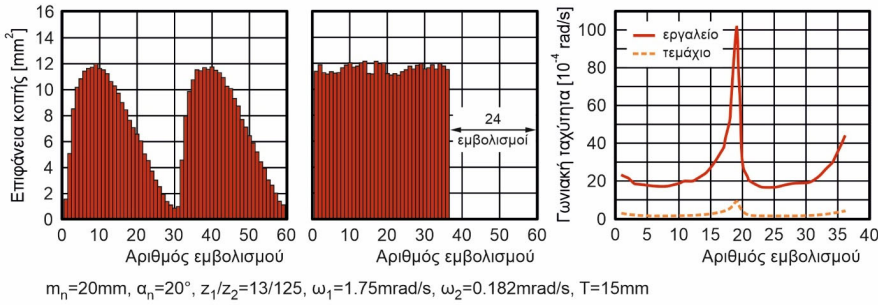


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

**Άγγελος Μαρινάκης**

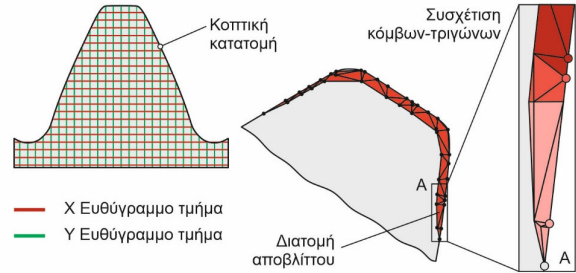
Li, L., Zhang, L., Yu, B., Wang, K., and Liu, F. /2015

“An Efficient Spur Gear Shaping Method Based on Homogenizing Cutting Area through Variational Circular Feed Rate,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 231(9), pp. 1587–1598.



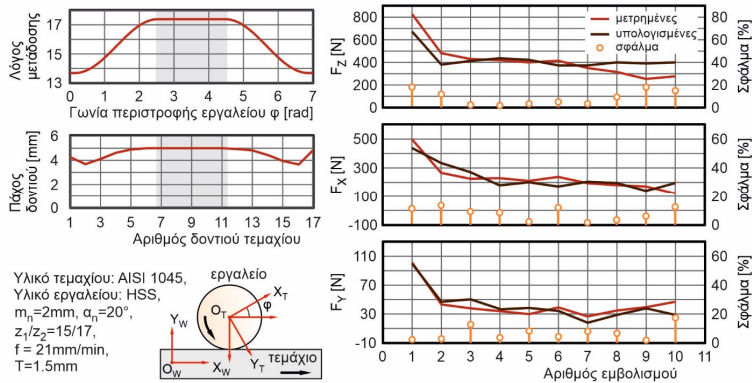
Katz, A., Erkorkmaz, K., and Ismail, F. /2018  
 “Virtual Model of Gear Shaping-Part I: Kinematics, Cutter-Workpiece Engagement, and Cutting Forces,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, 140(7).

Erkorkmaz, K., Katz, A., Hosseinkhani, Y., Plakhotnik, D., Stautner, M., and Ismail, F. /2016  
 “Chip Geometry and Cutting Forces in Gear Shaping,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 65(1), pp. 133–136.



Xu, M., Han, X., Hua, L., and Zheng, F. /2020

“Modeling and Methods for Gear Shaping Process and Cutting Force Prediction of Variable Transmission Ratio Rack,” *In. J. Mech. Sci.*, 171(December 2019).



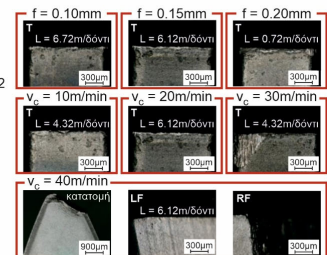
Κατασκευή οδοντού κανόνα μεταβλητού λόγου μετάδοσης με τη χρήση του λογισμικού Matlab.

Επαλήθευση δυνάμεων μέσω πειραμάτων.

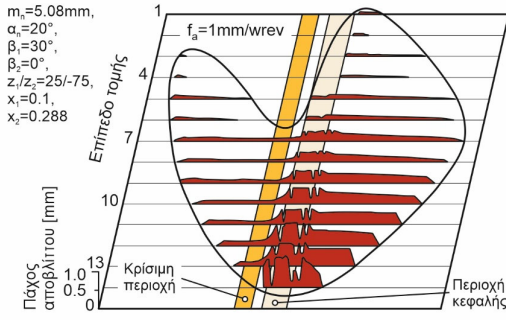
Εργαλειομηχανή: YHZ5132  
 Δυναμόμετρο Kistler: 9257B

Kühn, F., Brimmers, J., and Bergs, T. /2021

“Process Design for Gear Shaping of Austempered Ductile Iron (ADI) Components,” *Procedia CIRP*, 99, pp. 214–219.



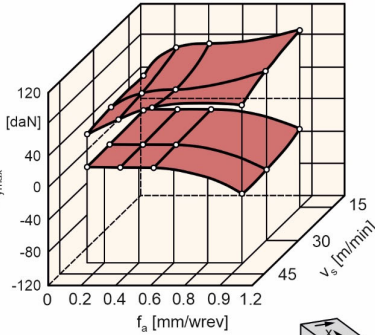
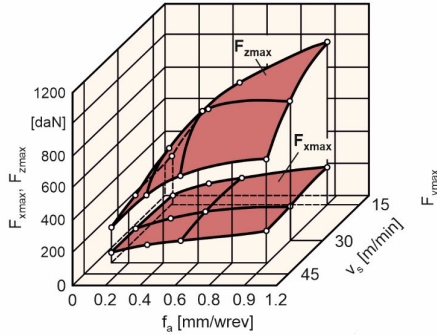




**Jansen, W. /1980**  
 "Leistungssteigerung Und Verbesserung Der Fertigungsgenauigkeit Beim Wälzschälen von Innenverzahnungen," Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Πρώτο μοντέλο προσομοίωσης της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων.

Μεθοδολογία βασισμένη στο μοντέλο του **G. Sulzer** για τον προσδιορισμό των αποβλίπτων.



Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής σύμφωνα με το μοντέλο του **K. Μπουζάκη**.

Επαλήθευση των δυνάμεων κοπής μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων.

$m_n=3\text{mm}, \alpha_n=20^\circ, \beta_1=30^\circ, \beta_2=0^\circ, \tau=30^\circ, z_1/z_2=42/-126$   
 $16 \text{ Mn Cr 5 N}, R_m=450\text{N/mm}^2, \text{S 6-5-2}$

Κατεργαζόμενος τροχός με ένα αυλάκι

2023



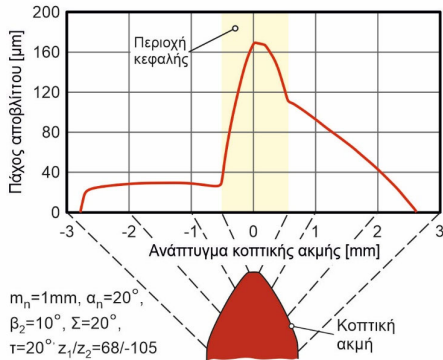
Προσομοιωτικά μοντέλα της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



**Klocke, F., Brecher, C., Löpenhaus, C., Ganser, P., Staudt, J., and Krömer, M. /2016**  
 "Technological and Simulative Analysis of Power Skiving," *Procedia CIRP*, 50, pp. 773–778.



Προσομοίωση της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων με τη χρήση του λογισμικού Matlab.

Προσδιορισμός πάχους και μήκους των απαραίμφωτων αποβλίπτων. Εξέταση σχέσης μέγιστους πάχους του αποβλίπτου και φθοράς κοπτικού εργαλείου μέσω πειραματικών μετρήσεων.

$m_n=1\text{mm}, \alpha_n=20^\circ, \beta_2=10^\circ, \Sigma=20^\circ, \tau=20^\circ, z_1/z_2=68/-105$

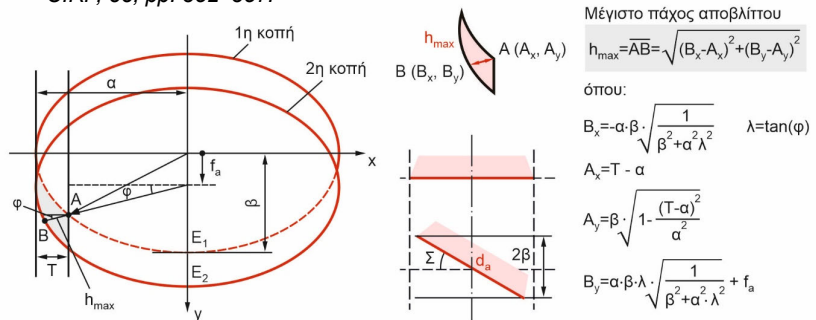
**Bergs, T., Georgoussis, A., and Löpenhaus, C. /2020**

"Development of a Numerical Simulation Method for Gear Skiving," *Procedia CIRP*, 88, pp. 352–357.

Ανάπτυξη γεωμετρικής σχέσης για τον υπολογισμό του μέγιστου πάχους του αποβλίπτου.

Επαλήθευση μέσω του λογισμικού SPARTApro.

Προσέγγιση τιμών κατά 98% έως 99.9%.



2023



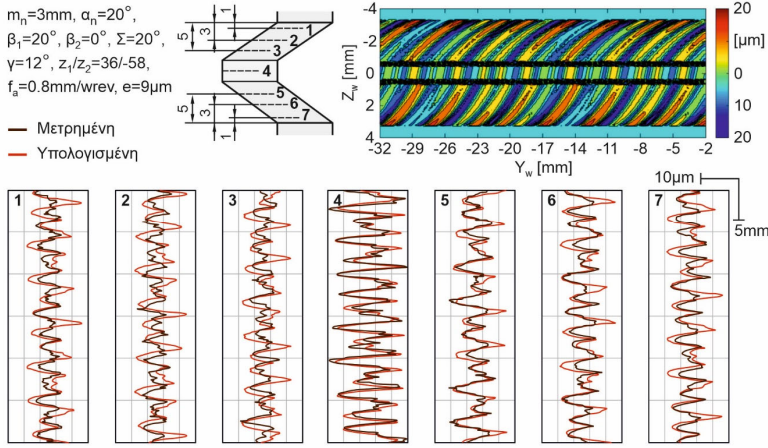
Προσομοιωτικά μοντέλα της αποφλοίωσης με κύλιση οδοντώσεων

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

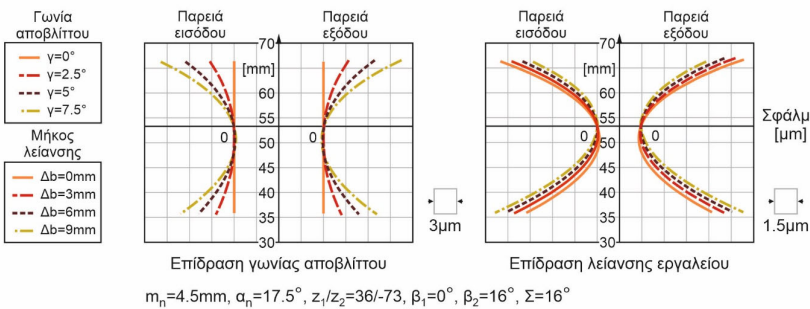
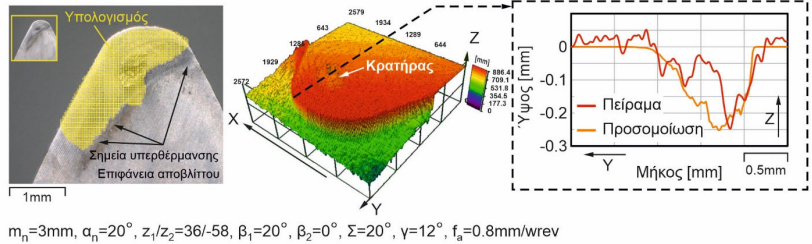
Άγγελος Μαρινάκης



Ren, Z., Fang, Z., Kobayashi, G., Kizaki, T., Sugita, N., Nishikawa, T., Kugo, J., and Nabata, E. /2020 "Influence of Tool Eccentricity on Surface Roughness in Gear Skiving," *Precis. Eng.*, 63, pp. 170–176.

Ανάπτυξη μοντέλου για την ανάλυση της επίδρασης του σφάλματος εκκεντρότητας του κοπτικού εργαλείου και της αξονικής πρόωσης στην τραχύτητα των παρειών του τελικού αυλακίου.

Ren, Z., Fang, Z., Arakane, T., Kizaki, T., Nishikawa, T., Feng, Y., Kugo, J., Nabata, E., and Sugita, N. /2021 "Parametric Modeling of Uncut Chip Geometry for Predicting Crater Wear in Gear Skiving," *J. Mater. Process. Technol.*, 290(May 2020), p. 116973.

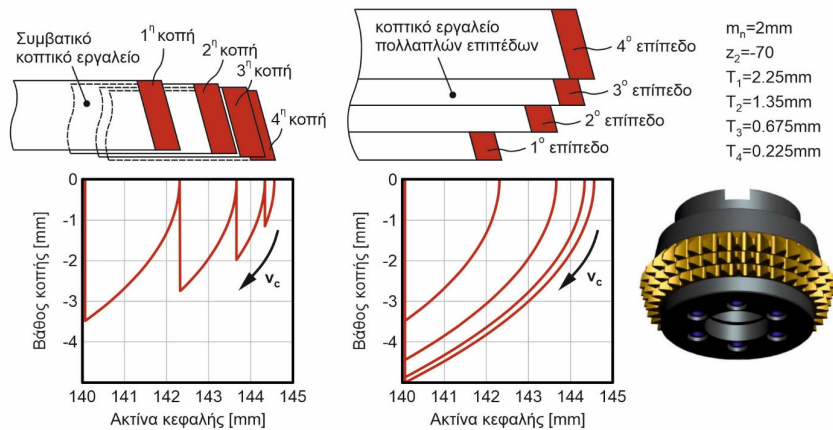


Guo, Z., Mao, S. M., Li, X. E., and Ren, Z. Y. /2016 "Research on the Theoretical Tooth Profile Errors of Gears Machined by Skiving," *Mech. Mach. Theory*, 97, pp. 1–11.

Guo, E., Ren, N., Ren, X., and Liu, C. /2019 "An Efficient Tapered Tool Having Multiple Blades for Manufacturing Cylindrical Gears with Power Skiving," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102(9–12), pp. 2823–2832.

Πρόταση για κοπτικό εργαλείο πολλαπλών επιπέδων δοντιών.

Ένα μόνο πέρασμα για την κατεργασία ενός αυλακίου

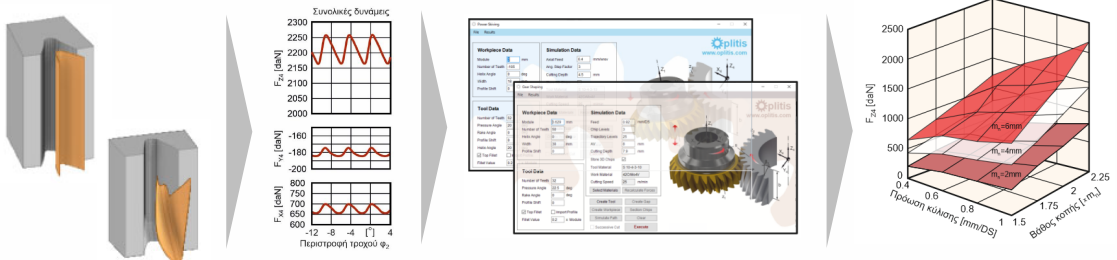


**Συνεισφορά της διατριβής:**

Αξιοποίηση των υπολογιστικών δυνατοτήτων ενός εμπορικού πακέτου CAD για την προσομοίωση των δύο κατεργασιών κοπής οδοντώσεων μέσω ενός ολοκληρωμένου λογισμικού.

**Στόχοι της διατριβής:**

- ✓ Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης για την πλάνιση και την αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων.
- ✓ Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής.
- ✓ Ανάπτυξη του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος γραφικής διεπαφής χρήστη Orlitis.
- ✓ Διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας στις δυνάμεις κοπής.



2023



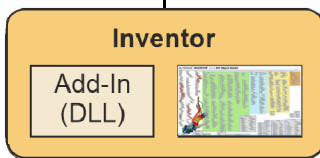
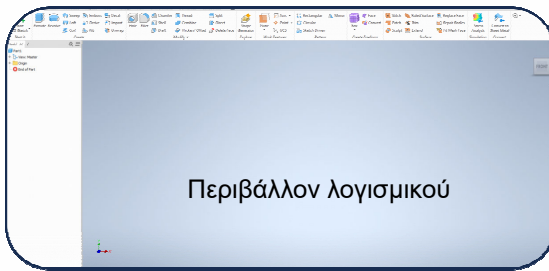
**Συνεισφορά και στόχοι της διατριβής**

<http://www.m3.tuc.gr>

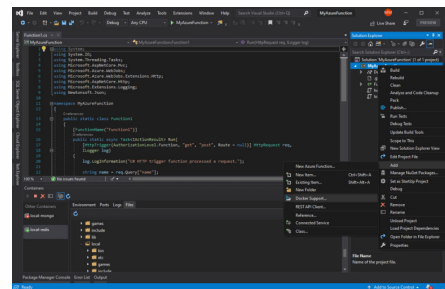
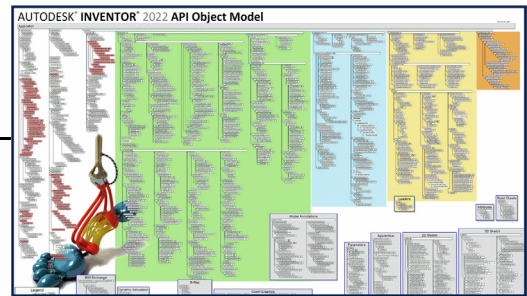


**M3** Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

**Άγγελος Μαρινάκης**



**API (Application Programming Interface)**



2023



**Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου**

<http://www.m3.tuc.gr>



**M3** Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

**Άγγελος Μαρινάκης**



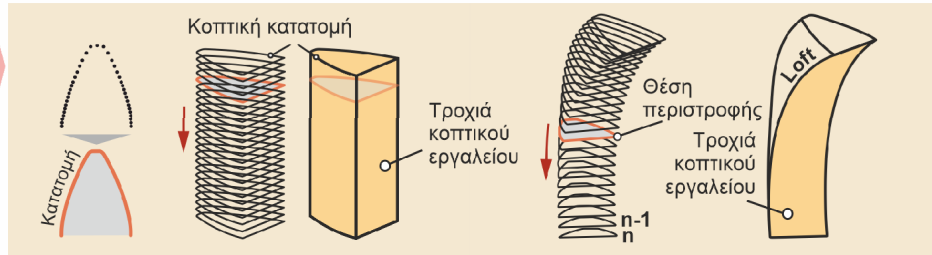
Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης

Δημιουργία εργαλείου - τροχιάς

Πλάνιση με κύλιση

Αποφλοίωση με κύλιση

Δεδομένα τροχού	Δεδομένα εργαλείου	Συνθήκες κατεργασίας
$m_n$ : μέτρο οδόντωσης [mm] $z_2$ : αριθμός δοντιών $\beta_2$ : γωνία ελίκωσης [°] $b$ : πλάτος [mm] $x_2$ : μετατόπιση κατατομής	$z_1$ : αριθμός δοντιών $\beta_1$ : γωνία ελίκωσης [°] $\alpha_n$ : γωνία πίεσης [°] $\gamma$ : γωνία αποβλίπτου [°] $x_1$ : μετατόπιση κατατομής	$f$ : πρόωση [mm/wrev] $T$ : βάθος κοπής [mm] $v_c$ : ταχύτητα κοπής [m/min]



2023



Δομή του μοντέλου προσομοίωσης

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

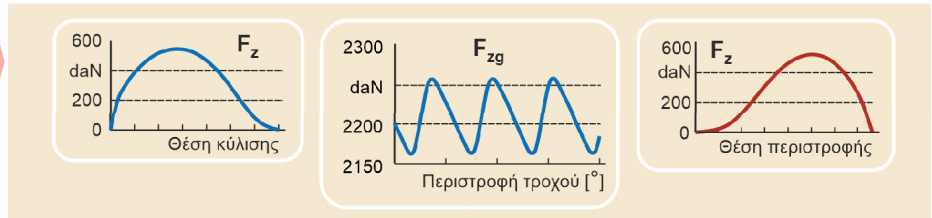


Προσδιορισμός απαραμόρφωτων αποβλίπτων

Υπολογισμός δυνάμεων κοπής

Πλάνιση με κύλιση

Αποφλοίωση με κύλιση



2023



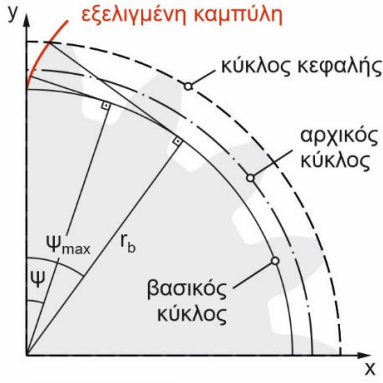
Δομή του μοντέλου προσομοίωσης

<http://www.m3.tuc.gr>

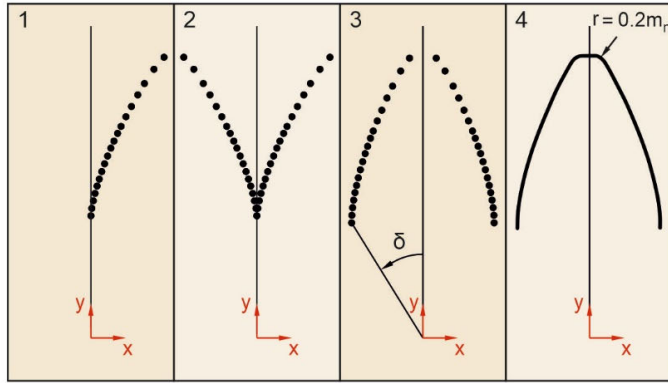


Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



$$\psi_{\max} = \frac{\sqrt{r_k^2 - r_b^2}}{r_b} \quad \delta = \frac{s_0}{d_0} + \tan(\alpha_0) - \alpha_0$$



αριστερή παρειά      δεξιά παρειά      περιστροφή σημείων      κοπτική κατατομή

**Εξισώσεις εξελιγμένης**

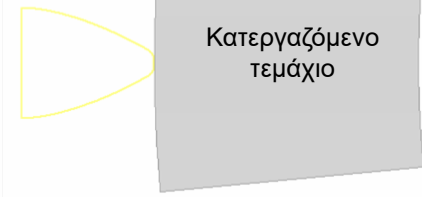
$$x = r_b \cdot (\sin\psi - \psi \cdot \cos\psi)$$

$$y = r_b \cdot (\cos\psi + \psi \cdot \sin\psi)$$

**Πλάγιες οδοντώσεις**

$$z_v = \frac{z_1}{\cos^3\beta_1}$$

**Κοπτική κατατομή**



2023



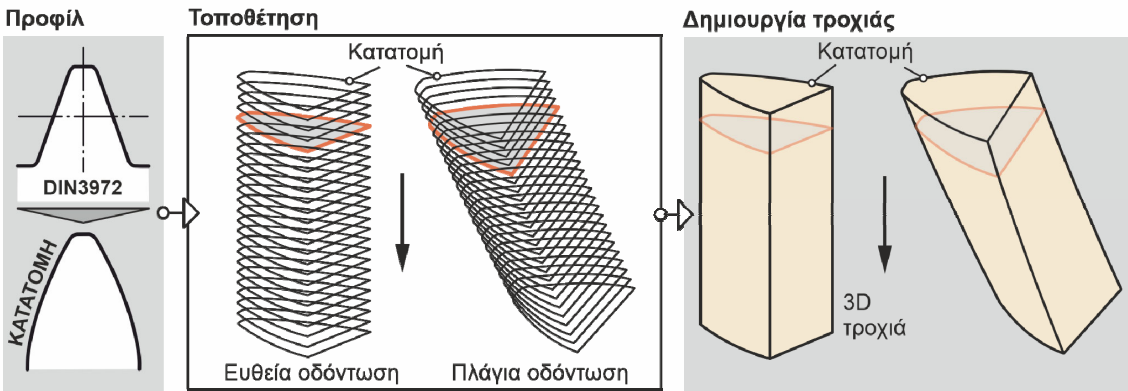
Δημιουργία της κατατομής του κοπτικού εργαλείου

<http://www.m3.tuc.gr>

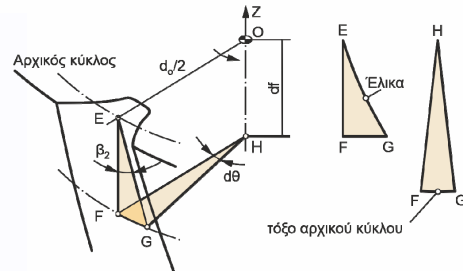


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



Inventor



$$d\theta = \frac{2 \cdot df \cdot \sin\beta_2}{m_n \cdot z_1}$$

2023



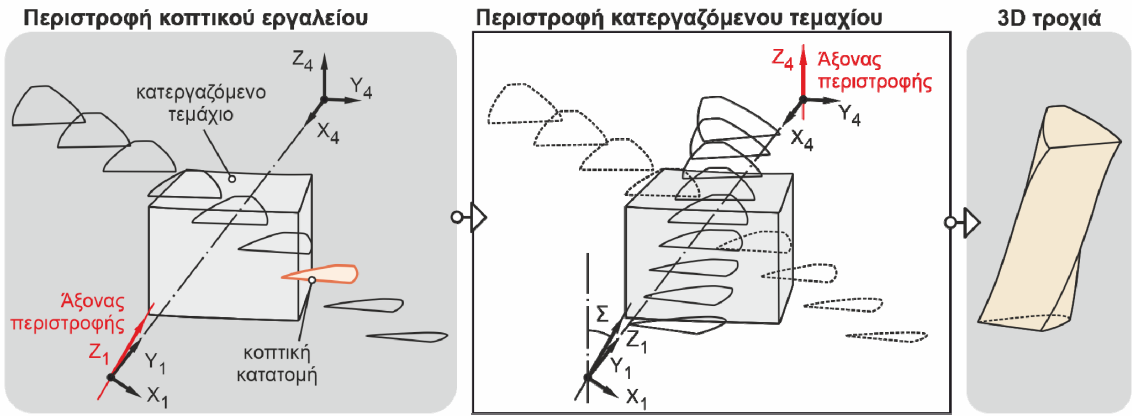
Δημιουργία της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου – Πλάνιση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



Η γωνία περιστροφής  $\varphi_1$  του κοπτικού εργαλείου προσδιορίζεται από τον χρήστη.

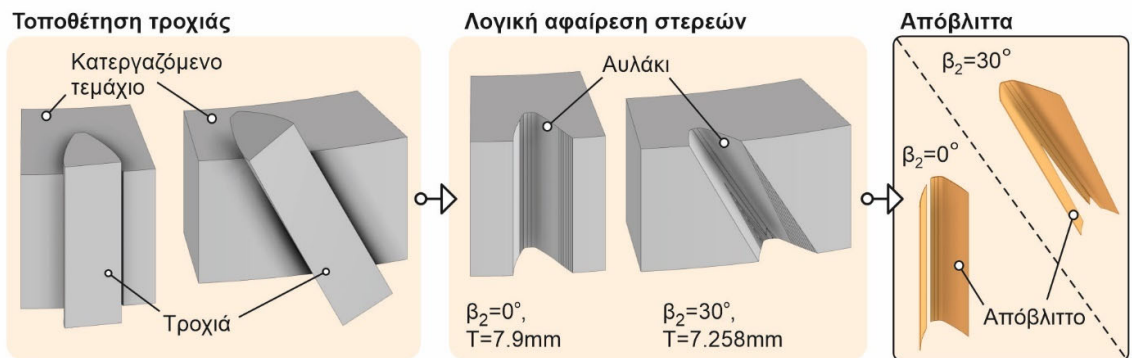
$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 \cdot Z_1}{Z_2} \quad \text{Γωνία περιστροφής κατεργαζόμενου τεμαχίου}$$

$$df_a = \frac{f_a \cdot \varphi_2}{360} \quad \text{Αξονικό βήμα}$$

Κατεργαζόμενο τεμάχιο



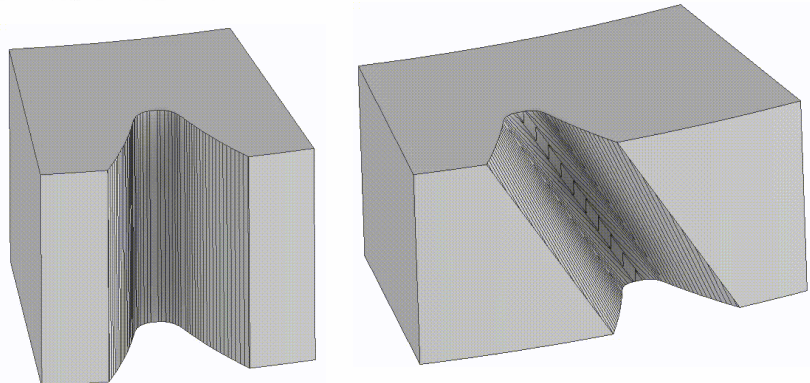
Τροχιά κοπτικού εργαλείου

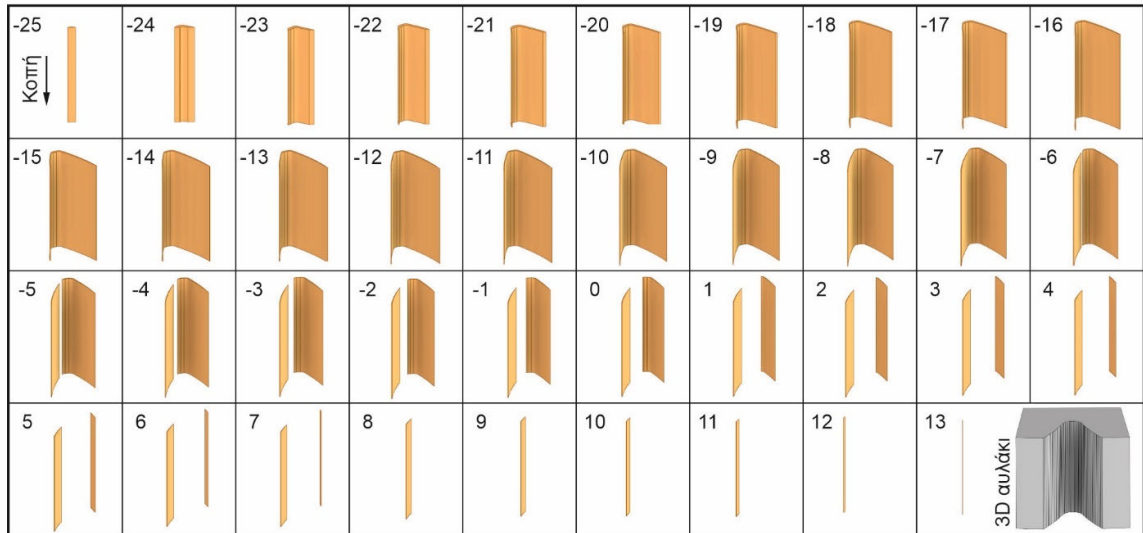


$m_n = 3.629\text{mm}$ ,  $\alpha_n = 22.5^\circ$ ,  $z_1/z_2 = 32/50$ ,  $f_w = 0.92\text{mm/DS}$

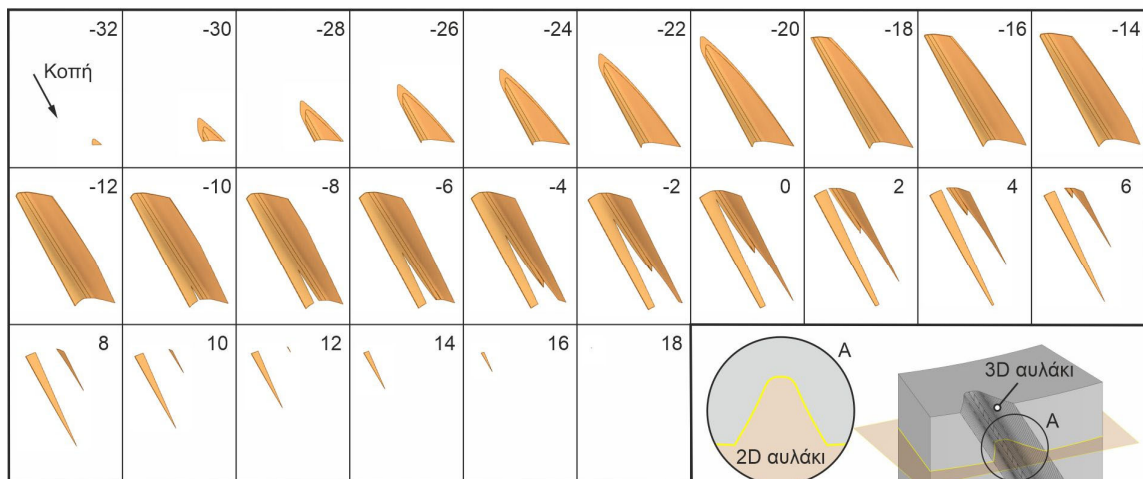
**Βήματα περιστροφής**

$$\theta_1 = \frac{2 \cdot f_w}{m_n \cdot z_1} \quad \theta_2 = \frac{2 \cdot f_w}{m_n \cdot z_2}$$



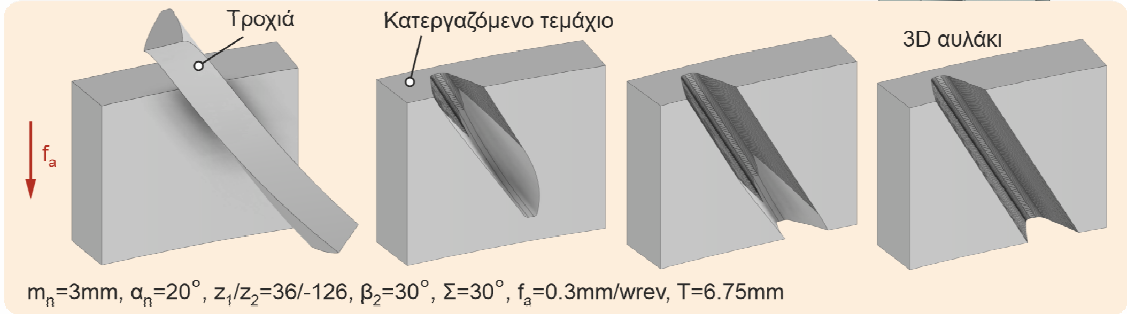
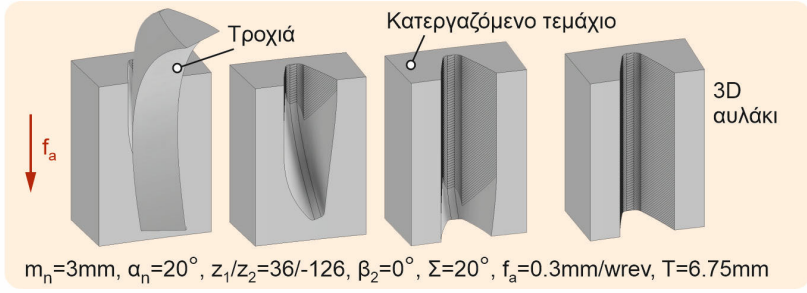


$m_n=3.629\text{mm}$ ,  $\alpha_n=22.5^\circ$ ,  $z_1/z_2=32/50$ ,  $\beta_2=0^\circ$ ,  $f_w=0.92\text{mm/DS}$ ,  $T=7.9\text{mm}$ ,  $b=15\text{mm}$

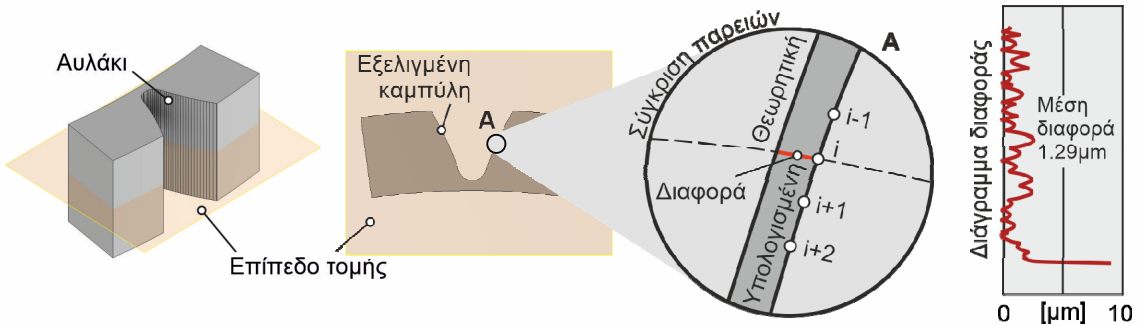


$m_n=3.629\text{mm}$ ,  $\alpha_n=22.5^\circ$ ,  $z_1/z_2=32/50$ ,  $\beta_2=30^\circ$ ,  $f_w=0.92\text{mm/DS}$ ,  $T=7.258\text{mm}$ ,  $b=20\text{mm}$

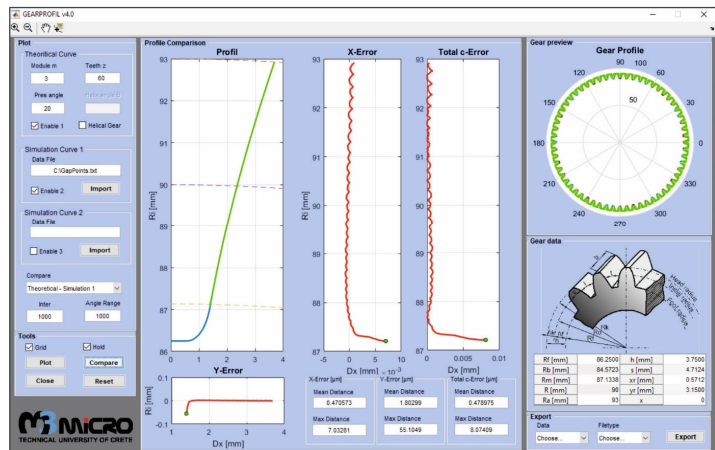


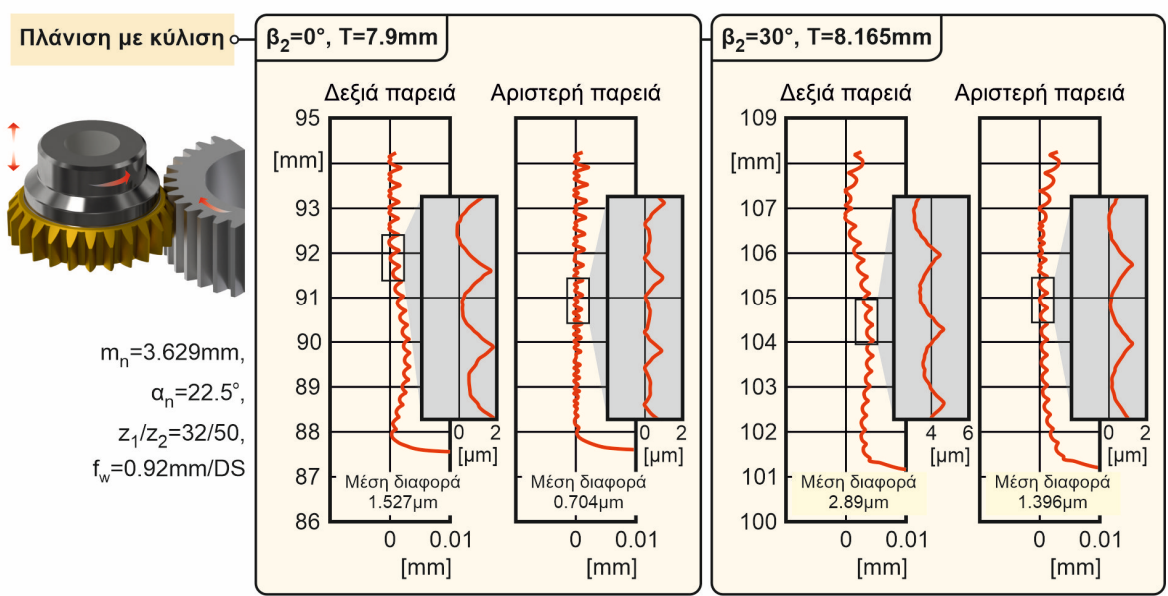


Επιπρόσθετη περιστροφή τροχιάς  $d\theta = \frac{2 \cdot f_a \cdot \sin\beta_2}{m_n \cdot z_1}$

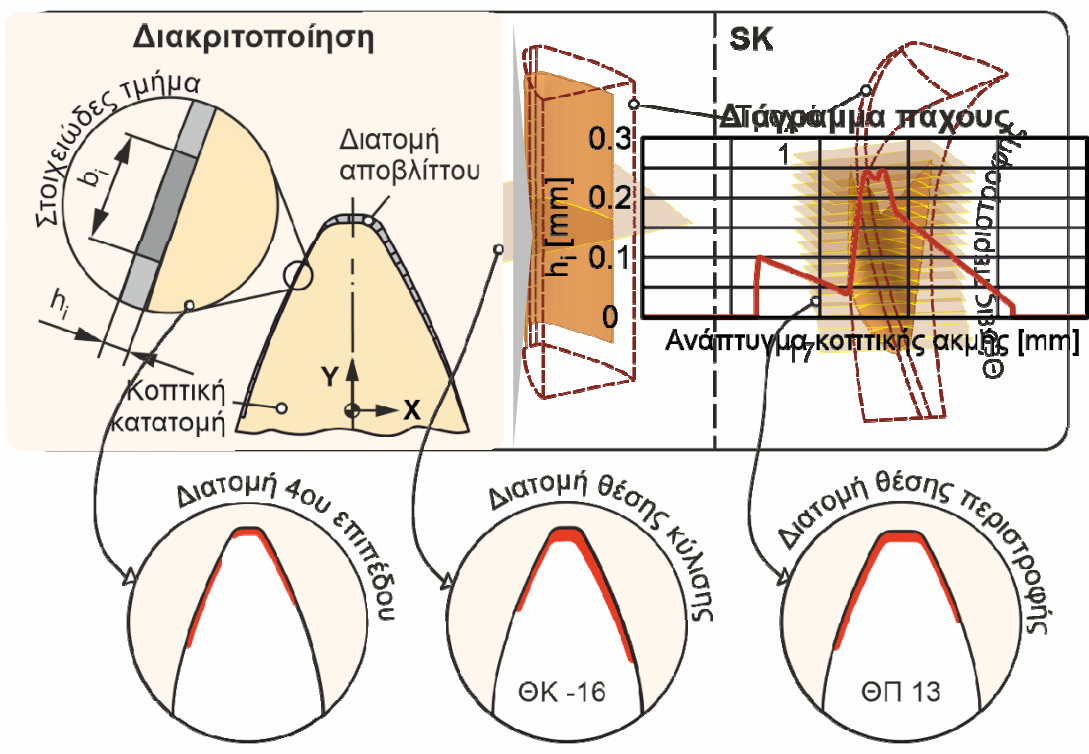


Επαλήθευση γεωμετρίας εξελιγμένης καμπύλης μέσω κατάλληλου λογισμικού

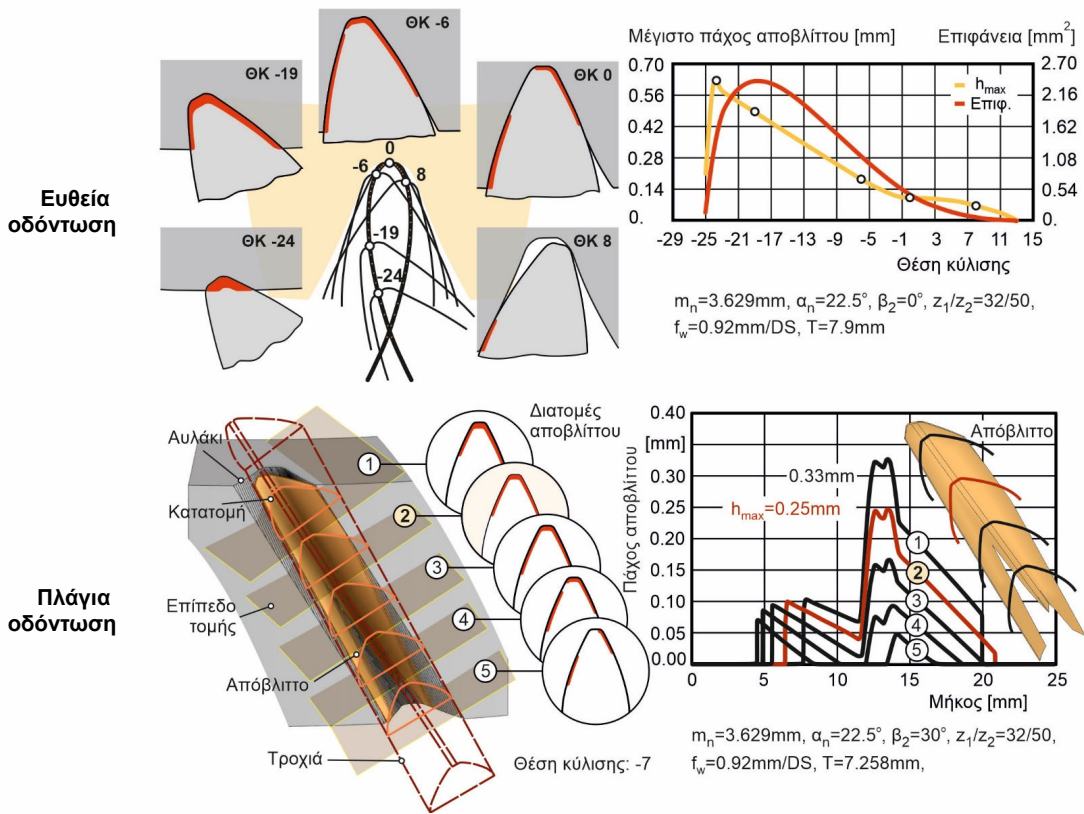




2023



2023



2023



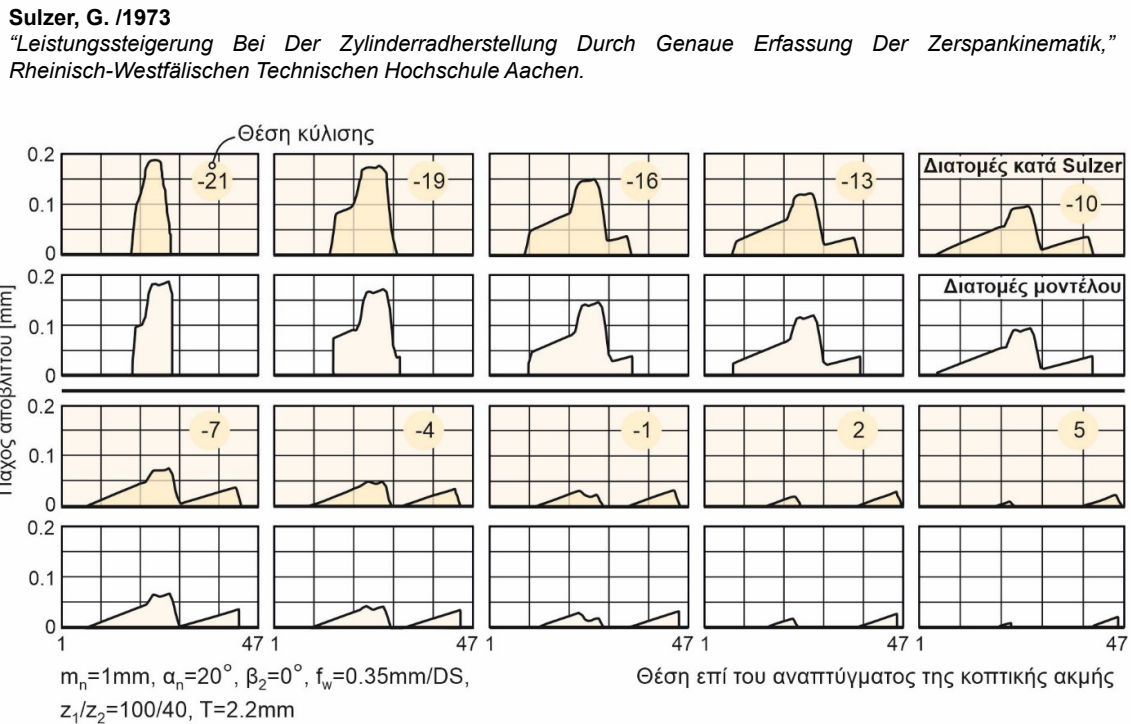
Διατομές αποβλίπτων στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023



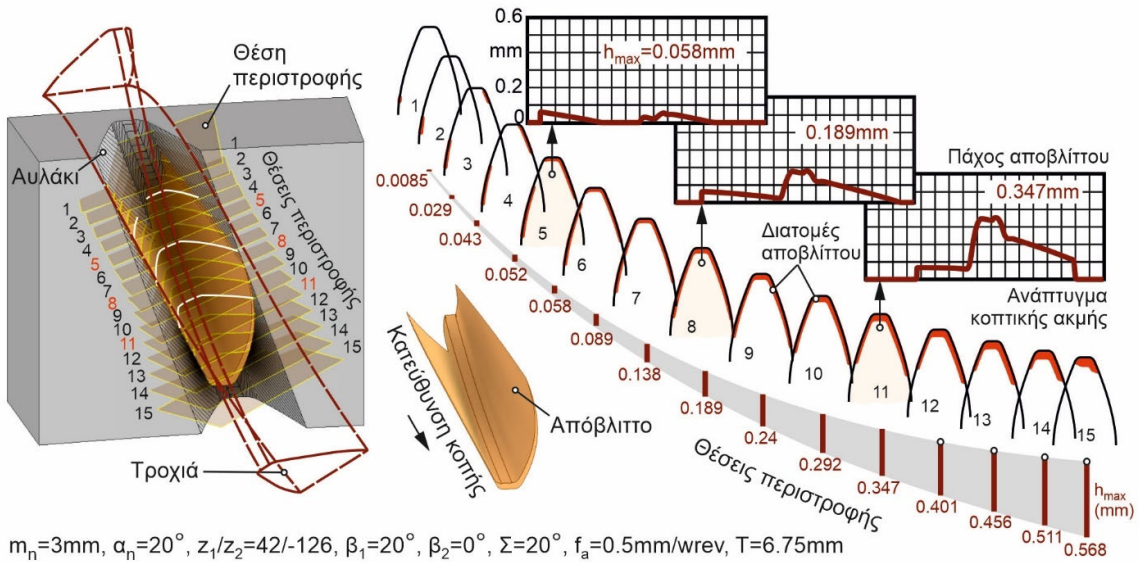
Επιβεβαίωση των διατομών των αποβλίπτων στην πλάνιση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023



Διατομές αποβλίττων στην αποφλοιώση με κύλιση

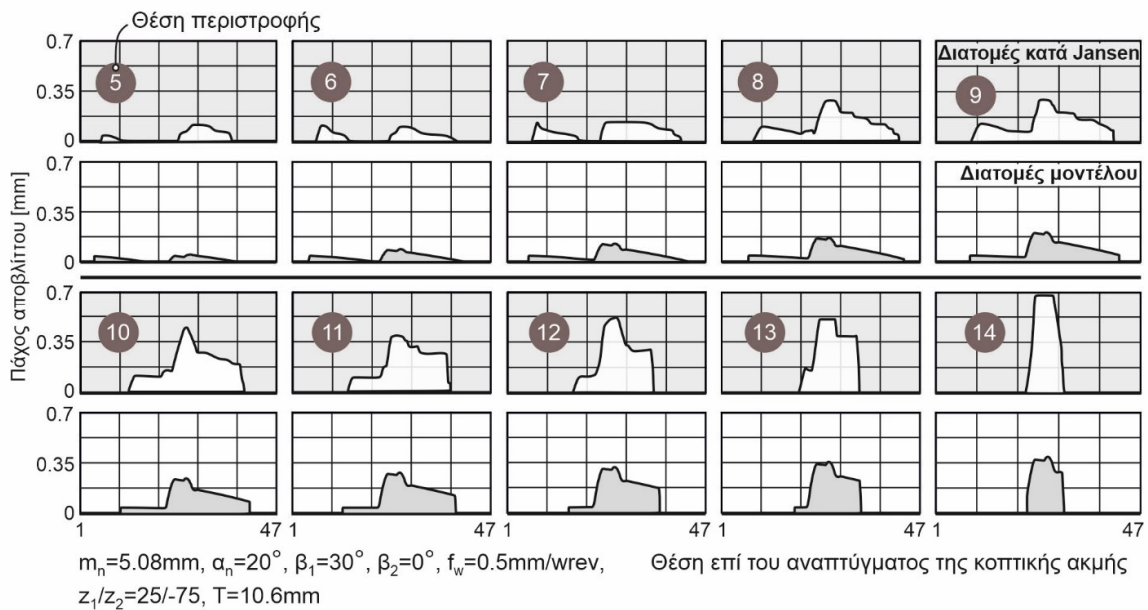
<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

Jansen, W. /1980  
 "Leistungssteigerung Und Verbesserung Der Fertigungsgenauigkeit Beim Wälzschälen von Innenverzahnungen,"  
 Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.



2023



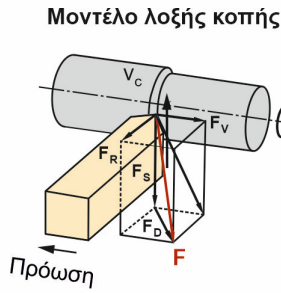
Επιβεβαίωση των διατομών των αποβλίττων στην αποφλοιώση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



Εξισώσεις Kienzle - Victor

$$F_S = K_S \cdot b \cdot h^{1-z}$$

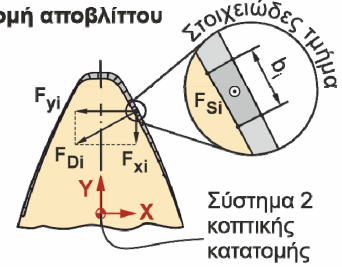
$$F_R = K_R \cdot b \cdot h^{1-y}$$

$$F_V = K_V \cdot b \cdot h^{1-x}$$



Otto H. Kienzle (1893-1969)

Διατομή αποβλήτου



Στοιχειώδες τμήμα

Όπου:

- $F_S$  κύρια δύναμη κοπής
- $F_V$  δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης
- $F_R$  δύναμη απώθησης

Στοιχειώδεις συνιστώσες

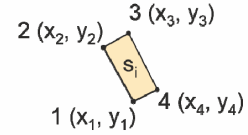
$$\vec{F}_{Di} = \vec{F}_{Ri} + \vec{F}_{Vi}$$

$$F_{Si} = K_S \cdot b_i \cdot h_{ieq}^{1-z}$$

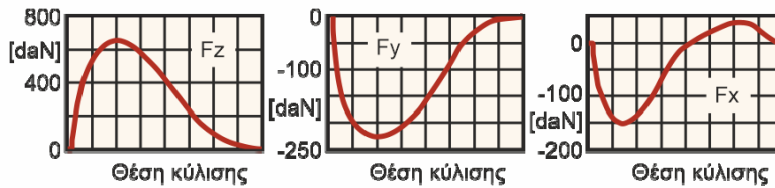
$$F_{Ri} = K_R \cdot b_i \cdot h_{ieq}^{1-y}$$

$$F_{Vi} = K_V \cdot b_i \cdot h_{ieq}^{1-x}$$

Σημεία τετράπλευρου

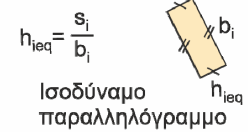


Άθροιση δυνάμεων και υπολογισμός στο σύστημα 2



Στοιχειώδης επιφάνεια

$$s_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 y_j \cdot (x_{i-1} - x_{i+1})$$



2023



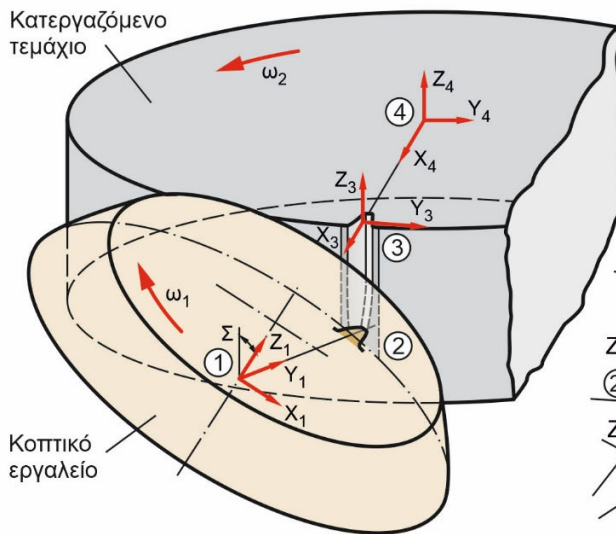
Διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

<http://www.m3.tuc.gr>

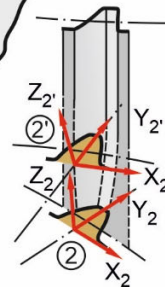


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



- 1) Περιστρεφόμενο σύστημα στο κέντρο του κοπτικού εργαλείου
- 2) Σύστημα στην επιφάνεια της κοπτικής κατατομής
- 3) Σταθερό σύστημα στο μέσο του υπό κατεργασία αυλακιού
- 4) Σταθερό σύστημα στο κέντρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου



Ενδεικτικές θέσεις περιστροφής και τοποθέτησης του συστήματος 2

2023



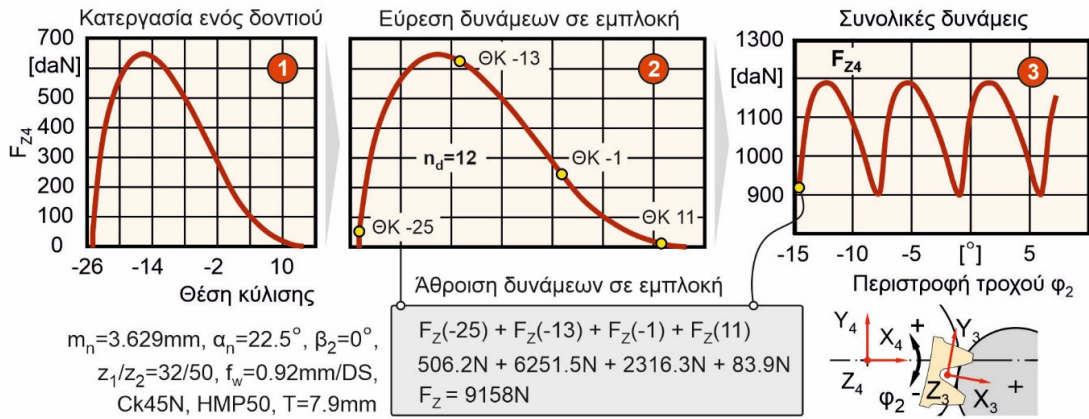
Συστήματα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

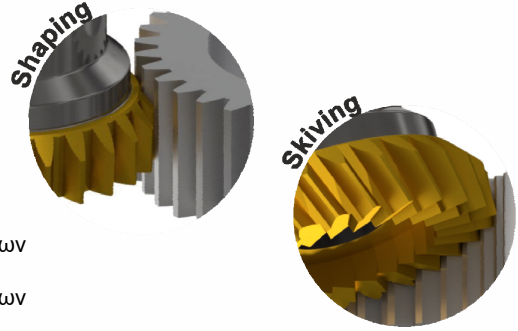
Άγγελος Μαρινάκης



**Διαφορά θέσεων κύλισης/περιστροφής μεταξύ διαδοχικών κοπτικών δοντιών**

**Πλάνιση:**  $n_d = \left[ \frac{t_0}{\theta_1} \right]$      **Αποφλοιώση:**  $n_d = \left[ \frac{t_0}{\phi_1} \right]$

- Όπου:
- $t_0$  βήμα οδόντωσης κοπτικού εργαλείου
  - $\theta_1$  βήμα περιστροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων κύλισης
  - $\phi_1$  βήμα περιστροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων περιστροφής



2023



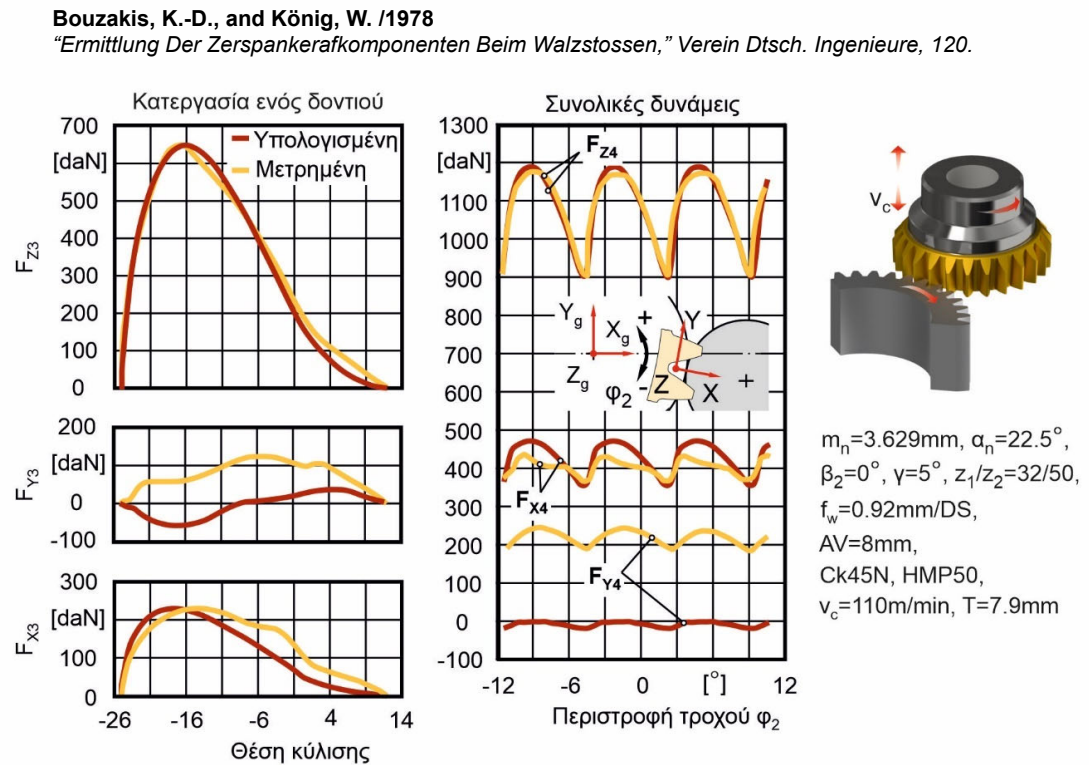
Διαδικασία υπολογισμού των συνολικών δυνάμεων κοπής

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023



Επιβεβαίωση των δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>

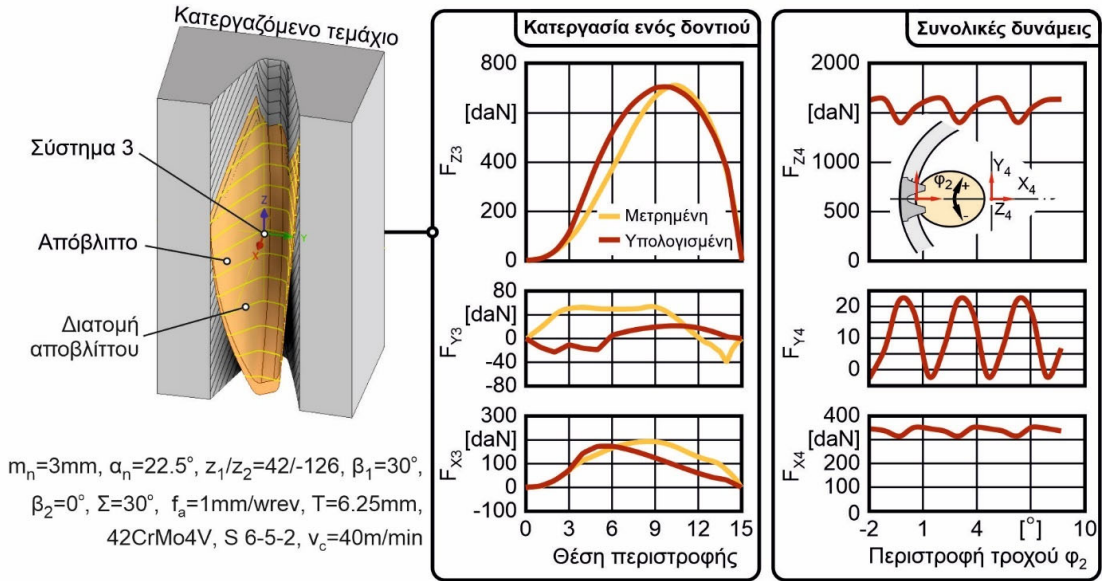


Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης

Jansen, W. /1980

“Leistungssteigerung Und Verbesserung Der Fertigungsgenauigkeit Beim Wälzschälen von Innenverzahnungen,” Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.



$K_S, K_R, K_V$

1-z, 1-x, 1-y

König W., and K., E. /1973

“Spezifische Schnittkraftwerte Für Die Zerspanung Metallischer Werkstoffe“, Verlag Stahleisen.

2023



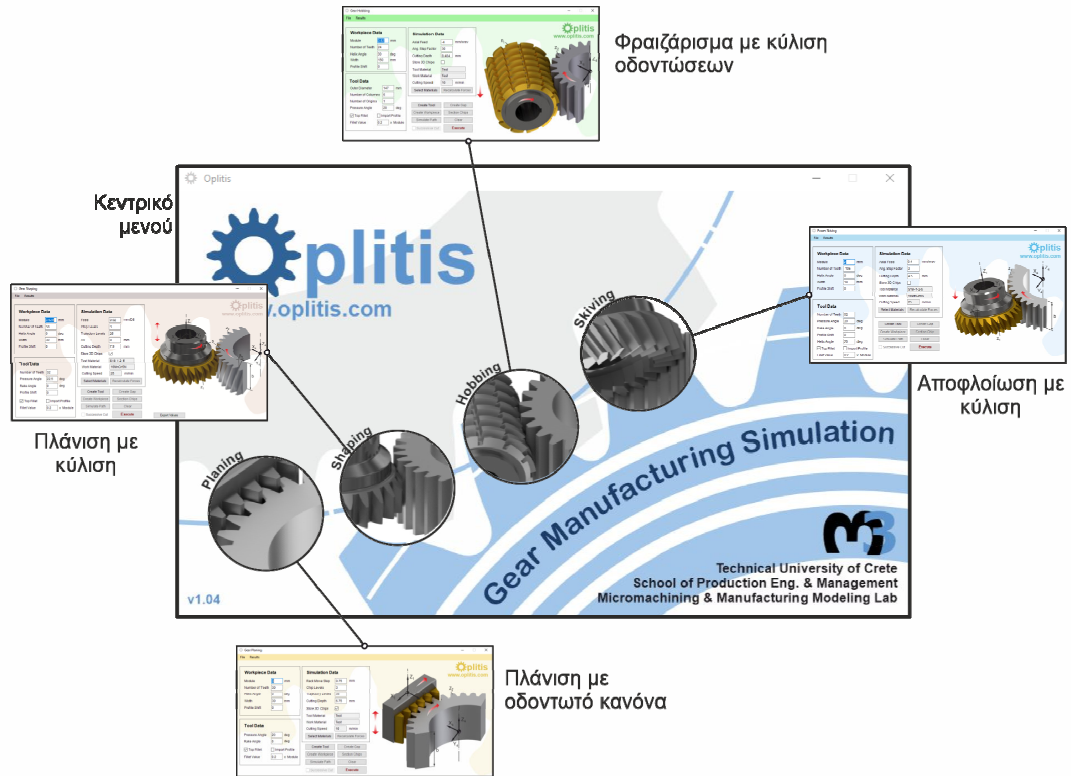
Επιβεβαίωση των δυνάμεων κοπής στην αποφλοίωση με κύλιση

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023



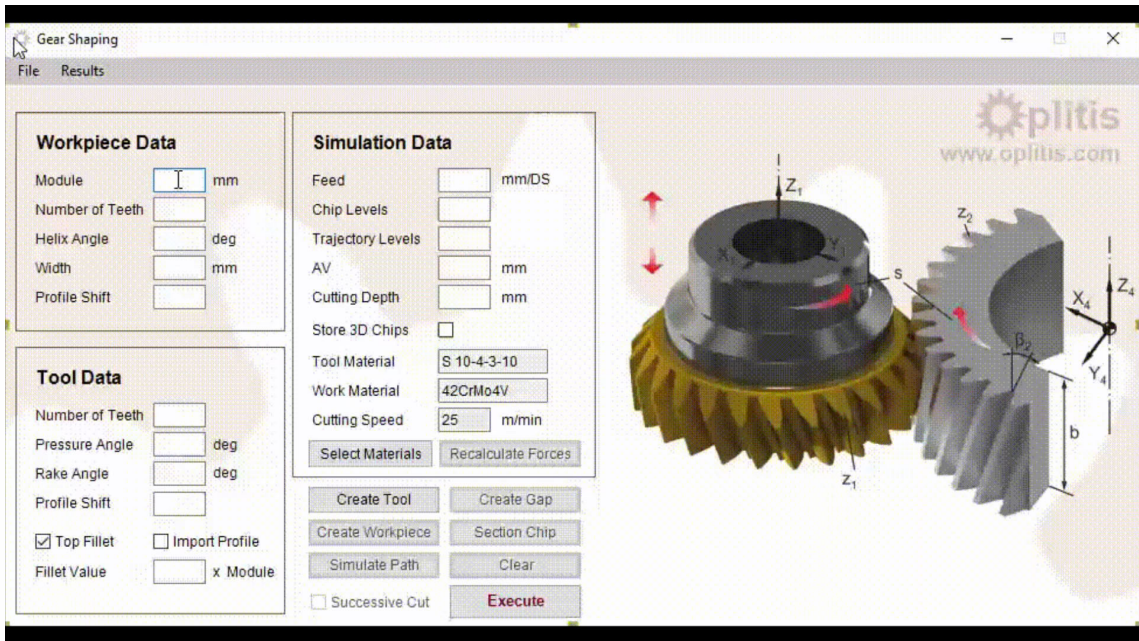
Λογισμικό προσομοίωσης κατεργασιών οδοντώσεων OPLITIS

<http://www.m3.tuc.gr>



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023

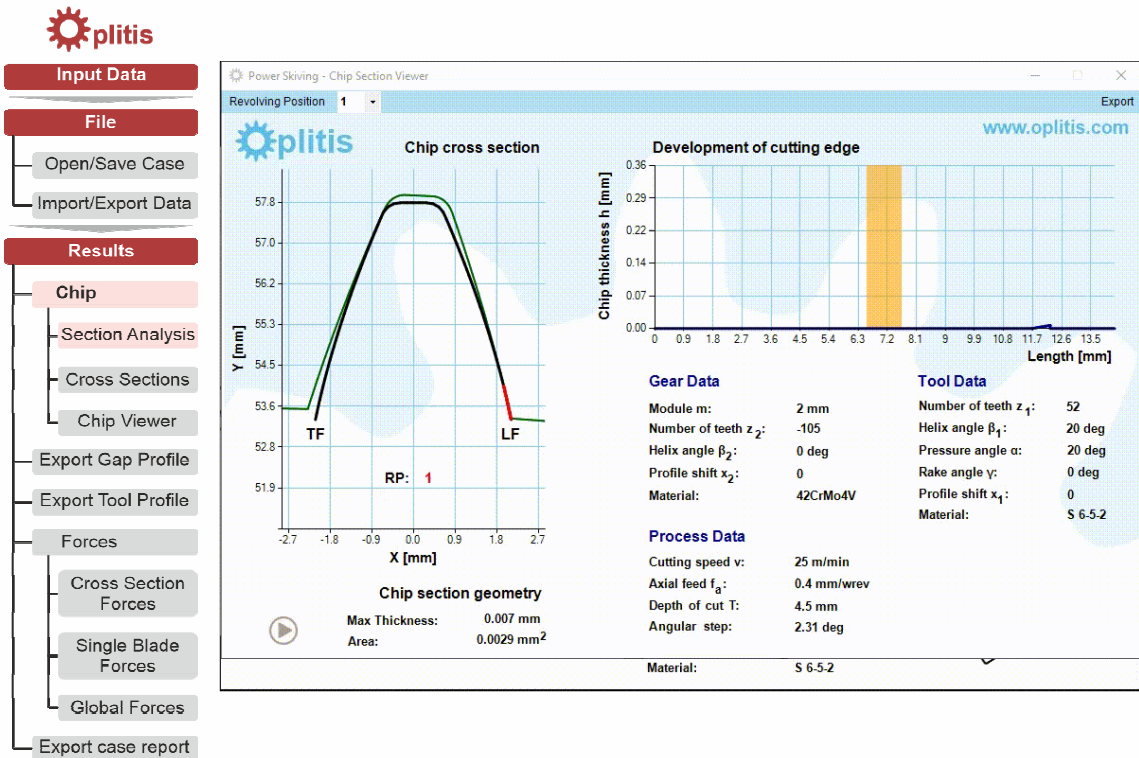


Κεντρική φόρμα κατεργασίας

<http://www.m3.tuc.gr>

**NTUA** Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



2023



Φόρμες προβολής των διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίττων

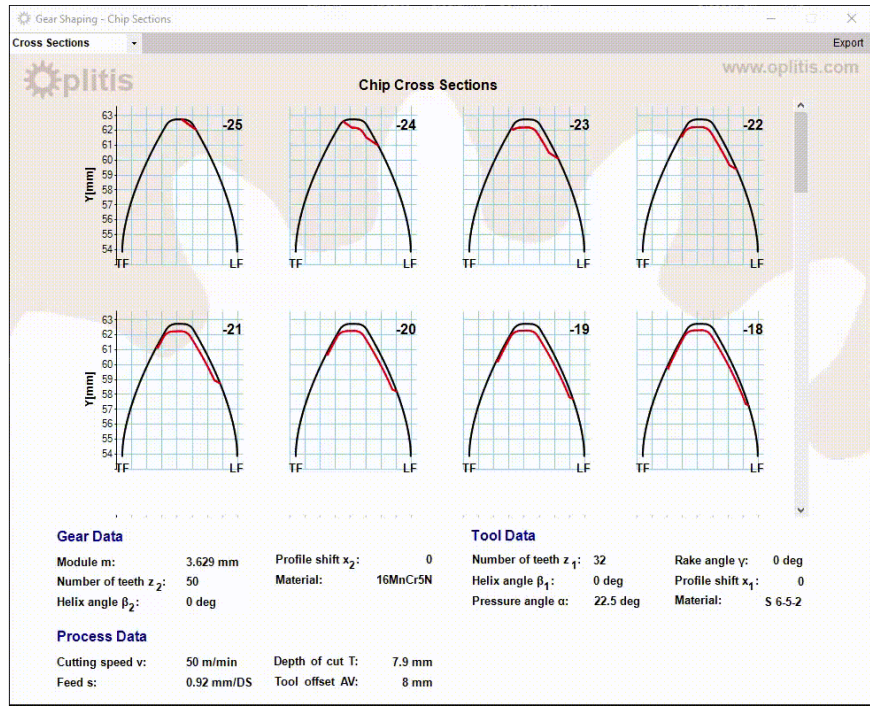
<http://www.m3.tuc.gr>

**NTUA** Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip**
    - Section Analysis
    - Cross Sections
    - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces
  - Export case report



2023



Φόρμες προβολής των διατομών των απαραμόρφωτων αποβλίττων

<http://www.m3.tuc.gr>

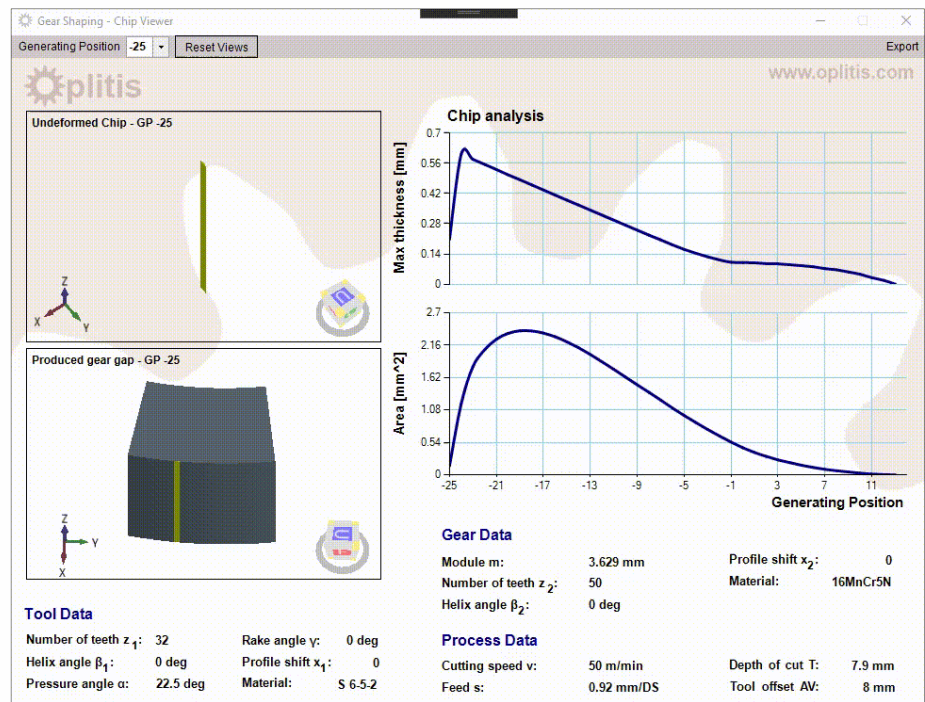


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip**
    - Section Analysis
    - Cross Sections
    - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces
  - Export case report



2023



Φόρμες προβολής απαραμόρφωτων αποβλίττων

<http://www.m3.tuc.gr>

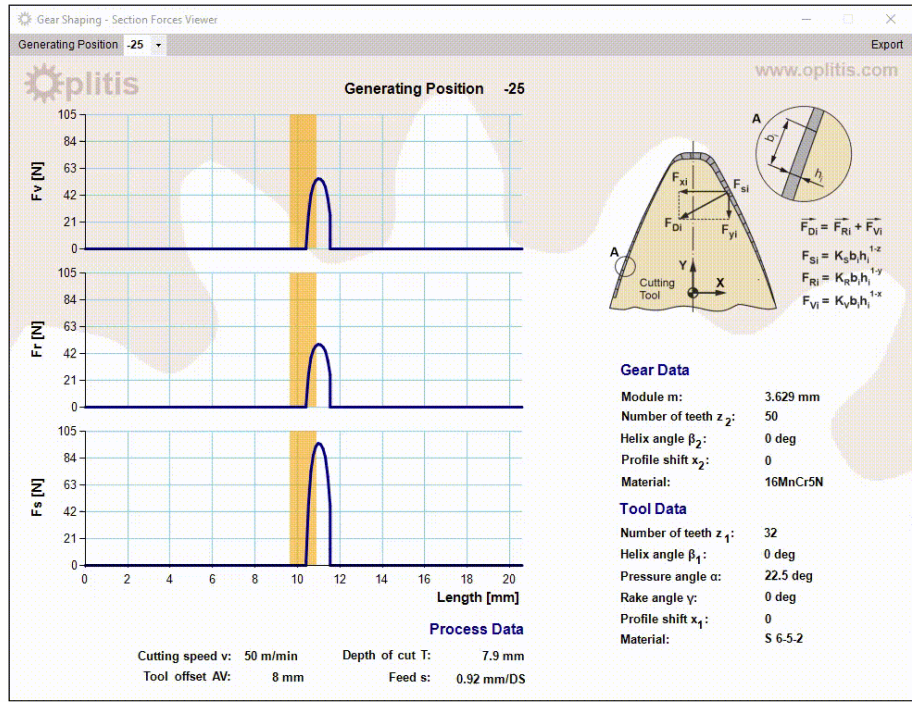


Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip
  - Section Analysis
  - Cross Sections
  - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces**
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces
  - Export case report



2023



Φόρμες προβολής των δυνάμεων κοπής

<http://www.m3.tuc.gr>

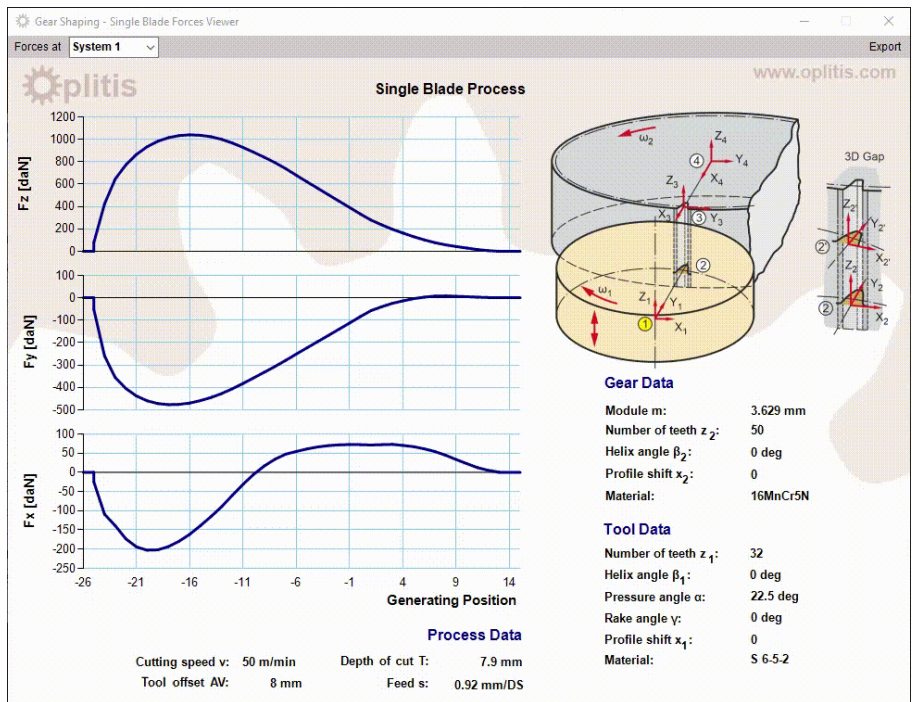


Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Άγγελος Μαρινάκης



- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip
  - Section Analysis
  - Cross Sections
  - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces**
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces
  - Export case report



2023



Φόρμες προβολής των δυνάμεων κοπής

<http://www.m3.tuc.gr>

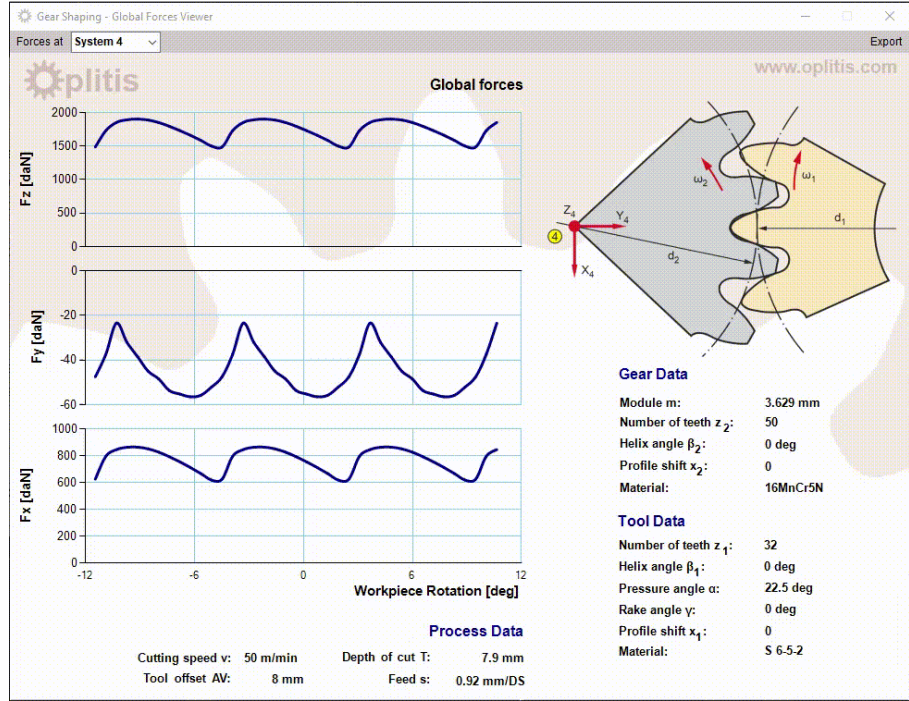


Πολυτεχνείο Κρήτης  
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

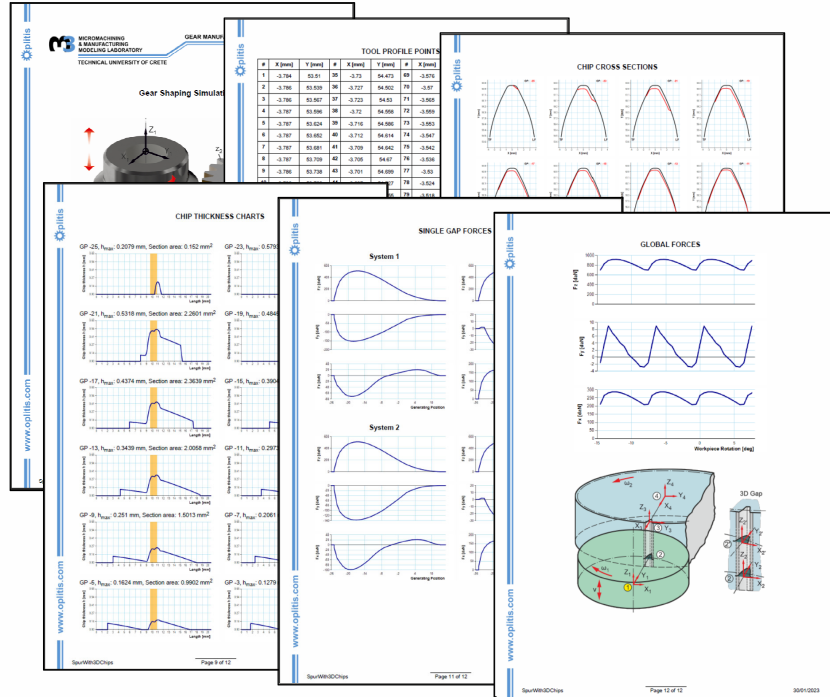
Άγγελος Μαρινάκης



- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip
  - Section Analysis
  - Cross Sections
  - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces**
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces**
  - Export case report



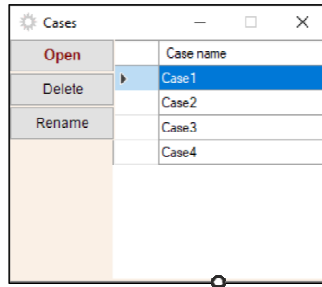
- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip
  - Section Analysis
  - Cross Sections
  - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces**
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces**
  - Export case report



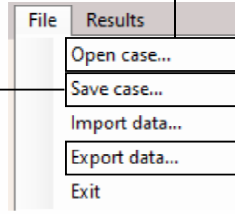
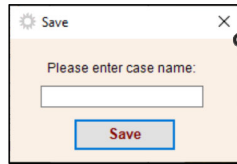


- Input Data**
- File**
  - Open/Save Case
  - Import/Export Data
- Results**
  - Chip
  - Section Analysis
  - Cross Sections
  - Chip Viewer
  - Export Gap Profile
  - Export Tool Profile
  - Forces
    - Cross Section Forces
    - Single Blade Forces
    - Global Forces
  - Export case report

Άνοιγμα αποθηκευμένης περίπτωσης προσομοίωσης



Αποθήκευση περίπτωσης προσομοίωσης

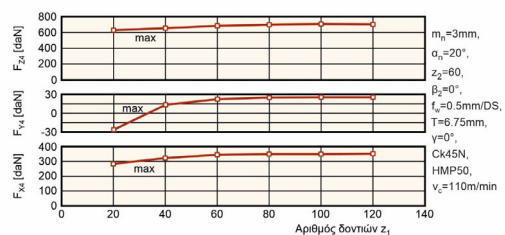
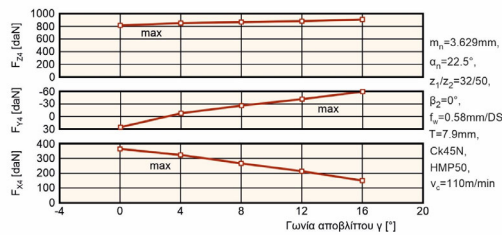
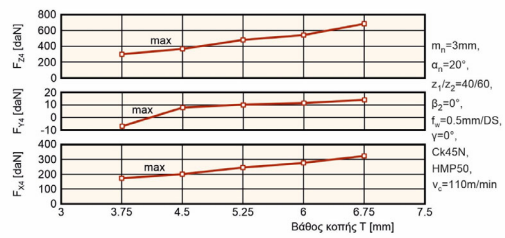
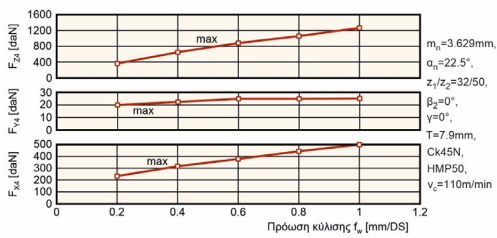
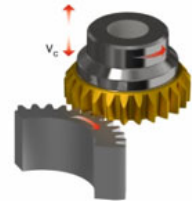


Δομή δεδομένων σε αρχείο κειμένου

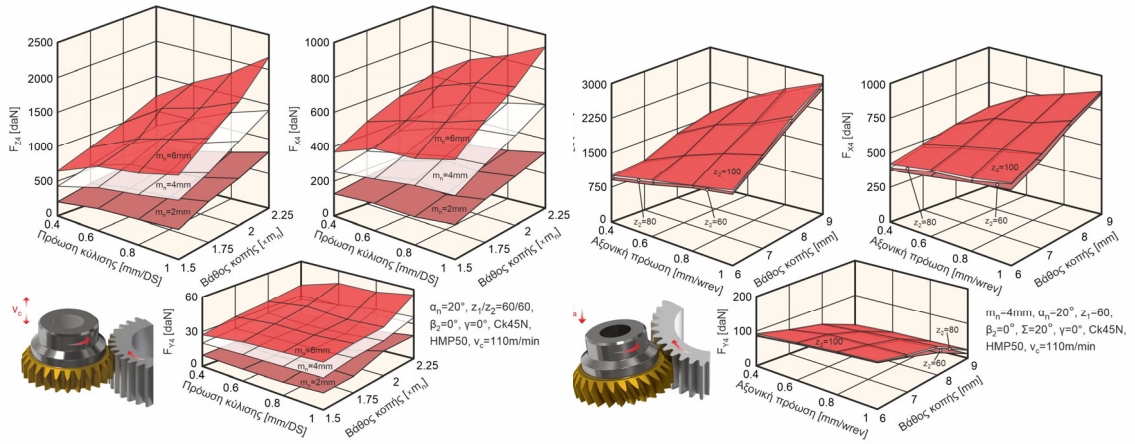
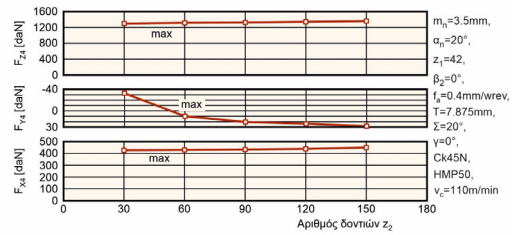
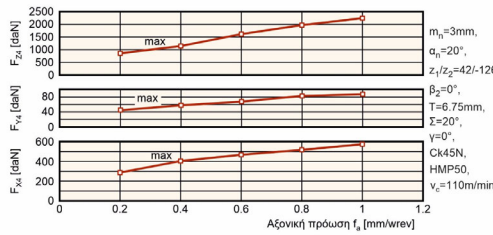
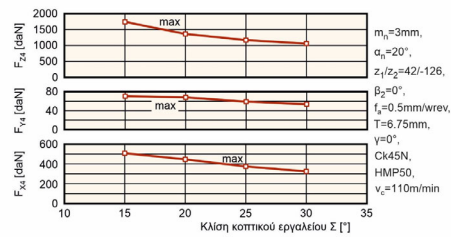
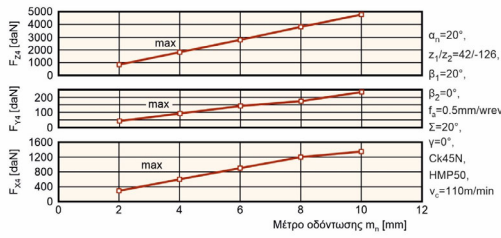
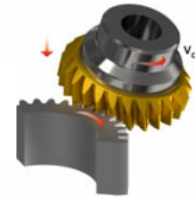
1	MN	3.629
2	Z2	50
3	H2	30
4	B	20
5	X2	0
6	Z1	32
7	AN	22,5
8	GAMMA	0
9	X1	0
10	FILLET	0.2
11	FD	0.92
12	LEVELS	5
13	TLEVELS	25
14	AV	0
15	T	7.258



Αριθμός δοντιών, $z_1$	20	40	60	80	100	120
Γωνία αποβλήτου, $\gamma$ [°]	0	4	8	12	16	
Πρώση κύλισης, $f_w$ [mm/DS]	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
Βάθος κοπής, $T$ [mm]	$1.25m_n$	$1.5m_n$	$1.75m_n$	$2m_n$	$2.25m_n$	



Μέτρο οδόντωσης, $m_n$ [mm]	2	4	6	8	10
Αριθμός δοντιών, $z_2$	30	60	90	120	150
Αξονική πρόωση, $f_a$ [mm/wrev]	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Κλίση κοπτικού εργαλείου, $\Sigma$ [°]	15	20	25	30	



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά οδοντωτού τροχού	Συνθήκες κατεργασίας
Γωνία αποβλήτου, $\gamma$	Μέτρο οδόντωσης, $m_n$	Βάθος κοπής, $T$
Αριθμός δοντιών, $z_1$	Γωνία ελίκωσης, $\beta_2$	Πρόωση κύλισης, $f_w$
	Αριθμός δοντιών, $z_2$	Αξονική πρόωση, $f_a$



**Σύνοψη:**

Το λογισμικό **Oplitis** περιλαμβάνει:

- Την προσομοίωση της κινηματικής για τις τέσσερις βασικές κατεργασίες κοπής οδοντώσεων.
- Τον προσδιορισμό των απαραμόρφωτων αποβλίπτων για κάθε κατεργασία σε ευθείες και πλάγιες οδοντώσεις.
- Τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής των κατεργασιών.
- Περιβάλλον γραφικής διεπαφής χρήστη για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

**Μελλοντικές κατευθύνσεις:**

- Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.
- Προσομοίωση των κατεργασιών μέσω μεθοδολογιών πεπερασμένων στοιχείων.
- Περαιτέρω σύγκριση των δυνάμεων κοπής με πειραματικές μετρήσεις για πιο σύγχρονα υλικά και επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων.
- Διερεύνηση της επίδρασης κοπτικών εργαλείων διαφορετικής γεωμετρίας στις δυνάμεις κοπής.



Εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές:

- Marinakis A., Alevras P., Antoniadis A. A Systematic Analysis of the Power Skiving Process using a novel Gear Manufacturing Simulation Software, Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, 2022
- Marinakis A., Dandouti E., Antoniadis A. CAD based Simulation Model for the Calculation of Chip Geometry and Cutting Force Components in Gear Shaping, Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME 2022
- Marinakis A., Mania K., Antoniadis A. Augmented Reality for CAD-CAM Training featuring Interactive Geometric Transformations, International Journal of Computer-Aided Design and Applications, 2021

Εργασίες σε διεθνή συνέδρια με κριτές:

- Daskalogrigorakis G., Kirakosian S., Marinakis A., Nikolidakis E., Pateraki I., Antoniadis A., Mania K. G-Code Machina: A Serious Game for G-code and CNC Machine Operation Training. In Proc. IEEE Global Engineering Education Conference (IEEE EDUCON 2021)
- Marinakis A., Katsamaki A., Pateraki I., Nikolidakis E., Antoniadis A. A Novel Serious Game for Education and Training of Computer-Aided Manufacturing (CAM) Programming, 30th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering, Praha, Czech Republic, 2021
- Marinakis A., Mania K., Antoniadis A. Augmented Reality for CAD-CAM Training featuring Interactive Geometric Transformations, Proceedings of CAD'20, Barcelona, Spain, 2020

**Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!**

