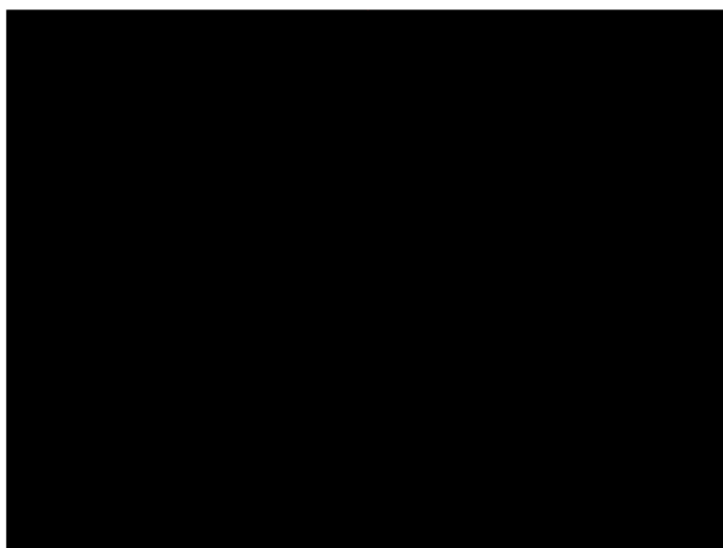


Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής



Διδακτορική διατριβή
που υπεβλήθη υπό τον

Διπλ. Μηχ. (M.Sc.) Ταξιάρχη Μπελή

2013



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



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

Ταξιάρχης Μπελής

2

Η κατεργασία της διάτρησης

Στάθμη των γνώσεων

Μοντέλο προσομοίωσης

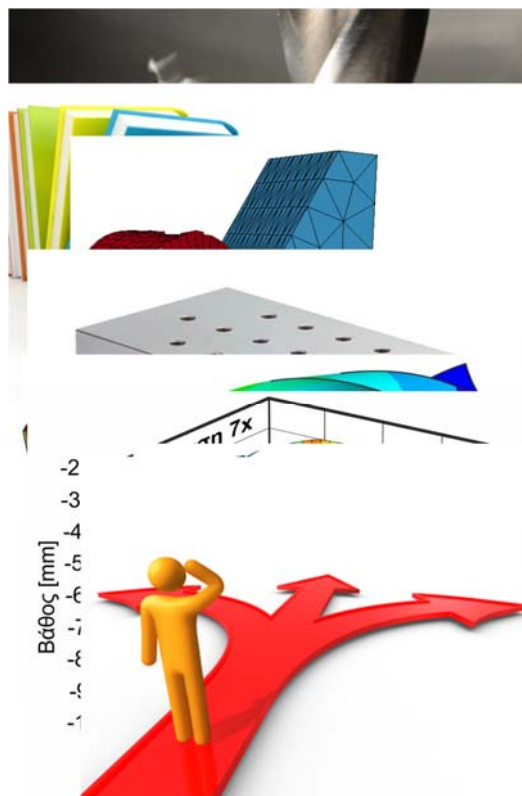
Επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης

Μοντέλο ανάλυσης εργαλείου και οπής

Επαλήθευση μοντέλου ανάλυσης εργαλείου και οπής

Συμπεράσματα

Μελλοντικές κατευθύνσεις



2013



Δομή παρουσίασης

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



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

Ταξιάρχης Μπελής

Αντικείμενο της διατριβής:

Δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας προσομοίωσης της διάτρησης λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά, τη μελέτη των συνθηκών κοπής καθώς και την επίδρασή τους στο εργαλείο και στο τελικό προϊόν.

Σπουδαιότητα του αντικειμένου:

Η κατεργασία της διάτρησης:

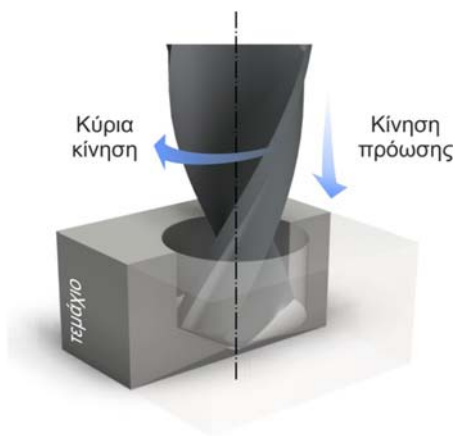
- αποτελεί την πιο διαδεδομένη κατεργασία με ευρύτατο πεδίο εφαρμογής
- έχει προστιθέμενη αξία, λόγω του ότι λαμβάνει χώρα στα τελευταία στάδια της παραγωγής

Η φύση της διάτρησης καθιστά αδύνατη την παρακολούθηση της κοπής και δυσχεραίνει τον έλεγχο της κατεργασίας.

Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου είναι πολύπλοκη και παρουσιάζει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης.

Η αυξανόμενη χρήση προηγμένων υλικών, υψηλών μηχανικών αντοχών, οδηγεί στην υιοθέτηση νέων στρατηγικών διάτρησης.

Η παραμικρή βελτίωση της κατεργασίας μπορεί να δώσει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στη βιομηχανία.



$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

$$f_{\min} = f_z z n$$

$f_{\min}$: πρόωση ανά λεπτό [mm/min]

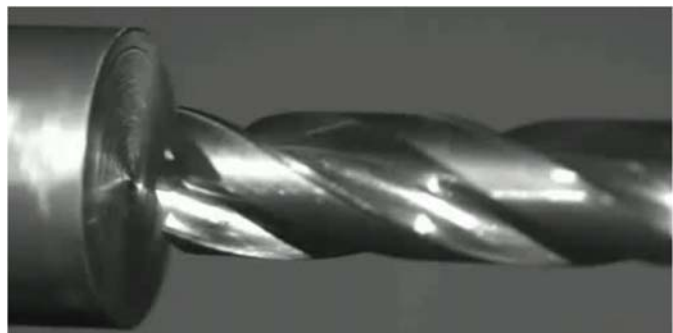
f_z : πρόωση ανά κόψη [mm/rev]

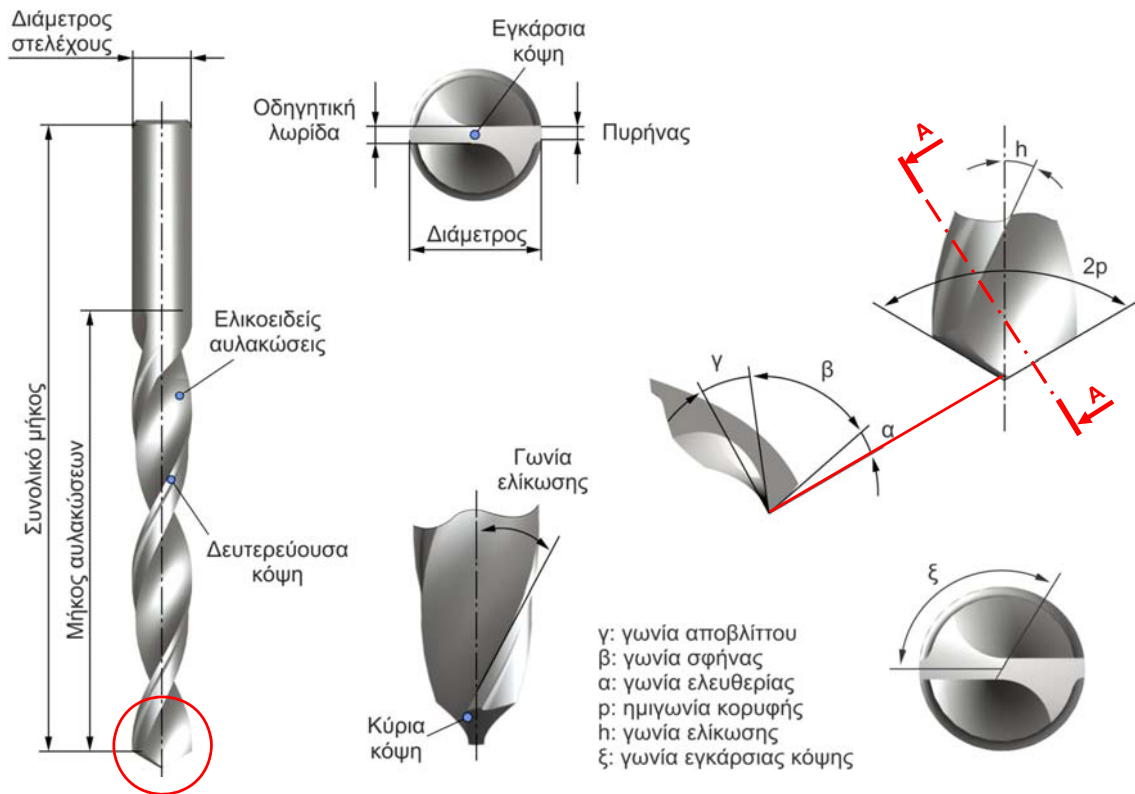
z : ο αριθμός των κόψεων

n : οι στροφές της ατράκτου σε [rpm]

v_c : η ταχύτητα κοπής [m/min] και

D : η διάμετρος του εργαλείου σε [mm]





2013

Εισαγωγή



Κοπτικό εργαλείο

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Ερευνητικές προσεγγίσεις της διάτρησης:

Μηχανιστική προσέγγιση:

- Πειραματική μελέτη της κατεργασίας και εξαγωγή εμπειρικών τύπων.
- Παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Έχει υψηλό κόστος λόγω της απαίτησης μεγάλου αριθμού πειραμάτων.
- Αδυναμία γενίκευσης των αποτελεσμάτων.

Μαθηματικές μέθοδοι:

- Περιλαμβάνουν την περιγραφή της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου, τη μοντελοποίηση της κινηματικής αλλά και την περιγραφή βασικών μεγεθών που αφορούν την κατεργασία της διάτρησης με μαθηματικές συναρτήσεις.

Γεωμετρικές μέθοδοι:

- Βασίζονται στη δυνατότητα προγραμματισμού των σύγχρονων συστημάτων σχεδίασης CAD.
- Προσφέρουν τρισδιάστατη προσομοίωση των κατεργασιών.
- Είναι υπολογιστικά συμφέρουσες.
- Βασίζονται σε λογικές πράξεις μεταξύ τρισδιάστατων στερεών γεωμετριών.

Αριθμητική προσομοίωση:

- Κερδίζουν συνεχώς έδαφος λόγω της αύξησης της διαθέσιμης επεξεργαστικής ισχύος.
- Αποτελούν γενικευμένες μεθόδους με εφαρμογή σε όλες τις κατεργασίες κοπής, για οποιοδήποτε συνδυασμό κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου και συνθηκών κοπής.

Μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης:

- Δε λαμβάνουν υπόψη τους τη φύση της κατεργασίας και δεν προτείνονται για γενικευμένη χρήση.
- Απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων για να καταλήξουν σε ασφαλή συμπεράσματα.

2013

Στάθμη των γνώσεων



Διεθνής έρευνα της διάτρησης

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


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

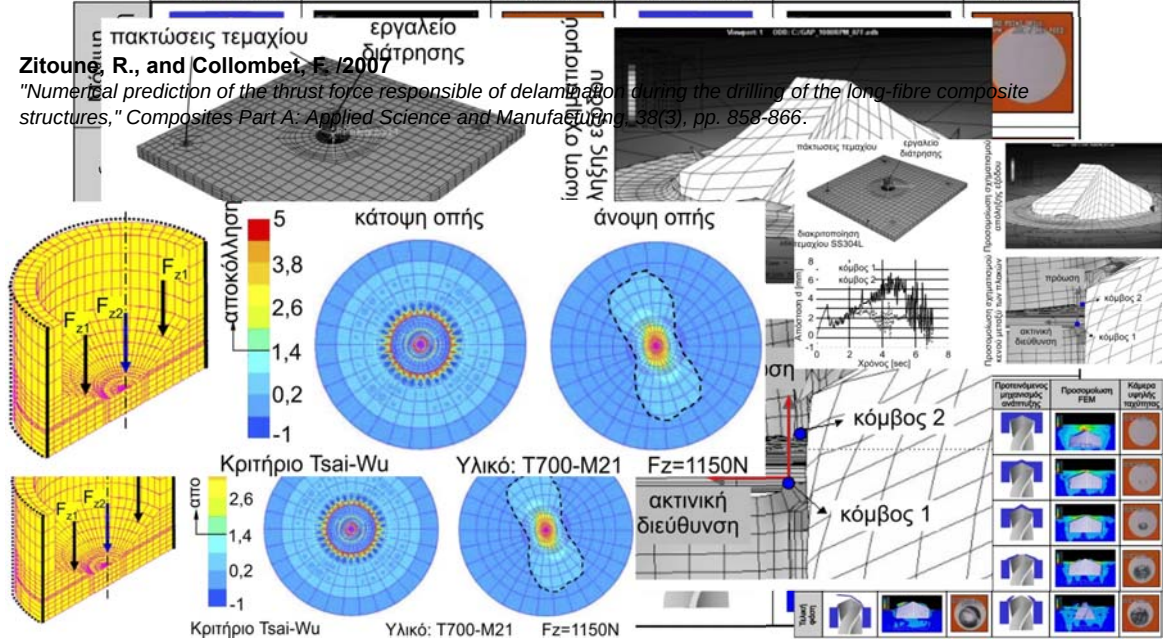
Ταξιάρχης Μπελής

Min, S., Dornfeld, D. A., Kim, J., and Shyu, B. /2001
"Finite element modeling of burr formation in metal cutting."

Choi, J., Min, S., and Dornfeld, D. A. /2004,
"Finite element modeling of burr formation in drilling of a multi-layered material."

Zitouni, R., and Collombet, F. /2007

"Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(3), pp. 858-866.



Διεθνής έρευνα της διάτρησης (κατεργαζόμενο τεμάχιο)

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

Strenkowski, J., Hsieh, C., and Shih, A. /2004

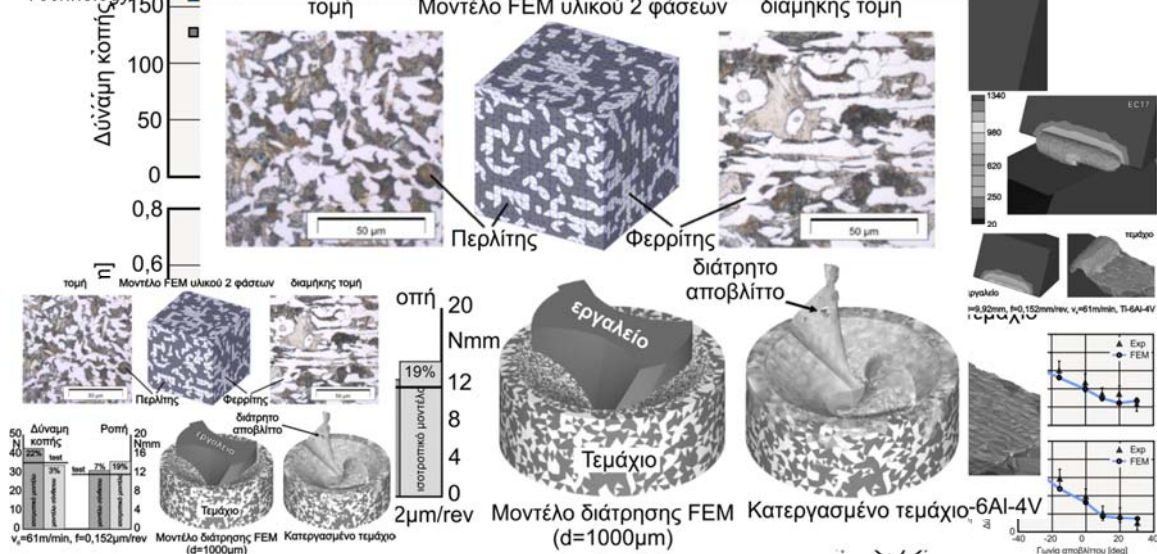
"An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(12), pp. 1413-1421.

Li, R., and Shih, A. J. /2007

"Finite element modeling of high-throughput drilling of Ti-6Al-4V," Transactions of NAMRI/SME, 35, pp. 73-80.

Abouridouane, M., Klocke, F., Lung, D., and Adams, O. /2012

"A new 3D multiphase FE model for micro cutting of ferritic-pearlitic carbon steels," CIRP Annals-Manufacturing Technology, 61(1), pp. 1-4.



Διεθνής έρευνα της διάτρησης (κατεργασία)

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

Προσομοίωση της κατεργασίας της διάτρησης:

Αναπτύχθηκε και προτείνεται το μοντέλο **DIATRISIS** το οποίο περιλαμβάνει:

- **Αυτοματοποιημένη σχεδίαση εργαλείων διάτρησης.**
 - μοντελοποίηση κωνικών, υπερβολοειδών και ελλειψοειδών εργαλείων
 - αυτόματη μοντελοποίηση στελέχους και οδηγητικής λωρίδας
- **Ολοκληρωμένο προεπεξεργαστή FEM.**
 - προσομοίωση της 2D ορθογωνικής και 3D λοξής κοπής
 - αυτόματη μοντελοποίηση των στοιχειωδών προβλημάτων
 - μικρότερος χρόνος επίλυσης και ακριβέστερα αποτελέσματα
- **Μεταεπεξεργασία αποτελεσμάτων.**
 - υπολογισμός δύναμης κοπής και ροπής διάτρησης
 - υπολογισμός της κατανομής των δυνάμεων στις κόψεις του εργαλείου

Ανάλυση εργαλείων διάτρησης και οπής:

Αναπτύχθηκε και προτείνεται το μοντέλο **DYNADRILL** το οποίο περιλαμβάνει:

- **Ειδικό αλγόριθμο κατανομής των δυνάμεων κοπής στο εργαλείο.**
 - κατανομή των δυνάμεων, τόσο στις κόψεις όσο και στις παρειές
 - ενσωμάτωση του αλγορίθμου σε εμπορικό σύστημα FEM
- **Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης μέτρησης των χαρακτηριστικών της κοπής**
 - ακριβής μέτρηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου
- **Στατική και δυναμική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης**
 - γενικευμένο μοντέλο και ακριβή αποτελέσματα
- **Αλγόριθμο υπολογισμού των χαρακτηριστικών της οπής**
 - υπολογισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ISO
- **Πρωτόκολλο τρισδιάστατων μετρήσεων οπών**

2013

Στάθμη των γνώσεων



Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής

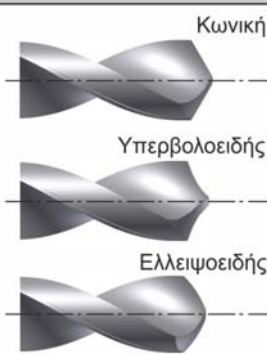
<http://www.m3.tuc.gr>



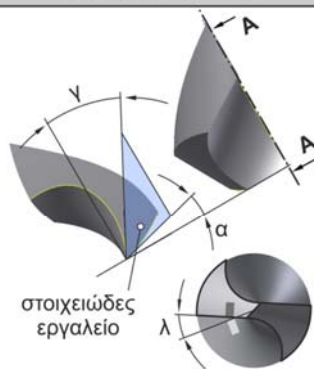
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

Δημιουργία εργαλείου

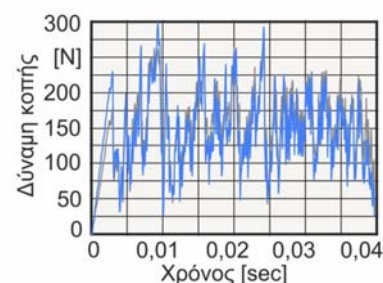
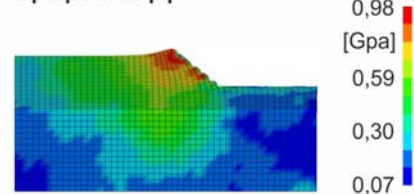


Ανάλυση γεωμετρίας



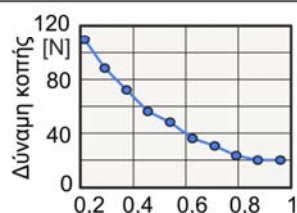
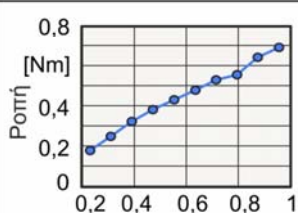
Αποτελέσματα

Εγκάρσια κόψη



$D=12\text{mm}$, $f=0,4\text{mm/rev}$, $v_c=80\text{m/min}$
AL7075

Μετα-επεξεργασία δυνάμεων



$D=12\text{mm}$, $f=0,4\text{mm/rev}$, $v_c=80\text{m/min}$
AL7075

2013

Μοντέλο DIATRISIS



Δομή του μοντέλου DIATRISIS

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



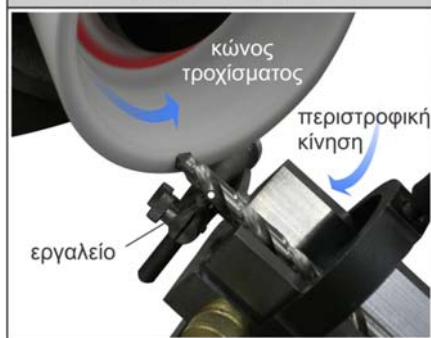
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

Δημιουργία αυλακώσεων



Τρόχισμα κορυφής



Κατασκευή εργαλείων διάτρησης

Τρόχισμα των αυλακώσεων

Τρόχισμα της κορυφής



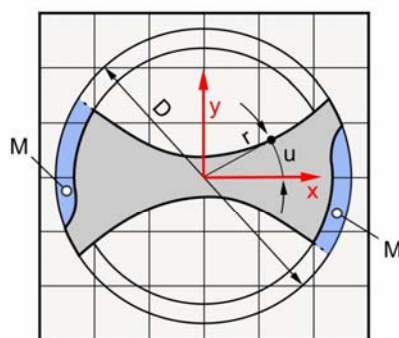
Κατασκευή εργαλείων διάτρησης

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

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

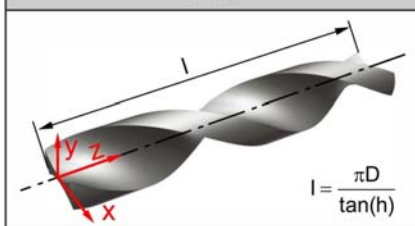
Ταξιάρχης Μπελής

Μοντελοποίηση διατομής



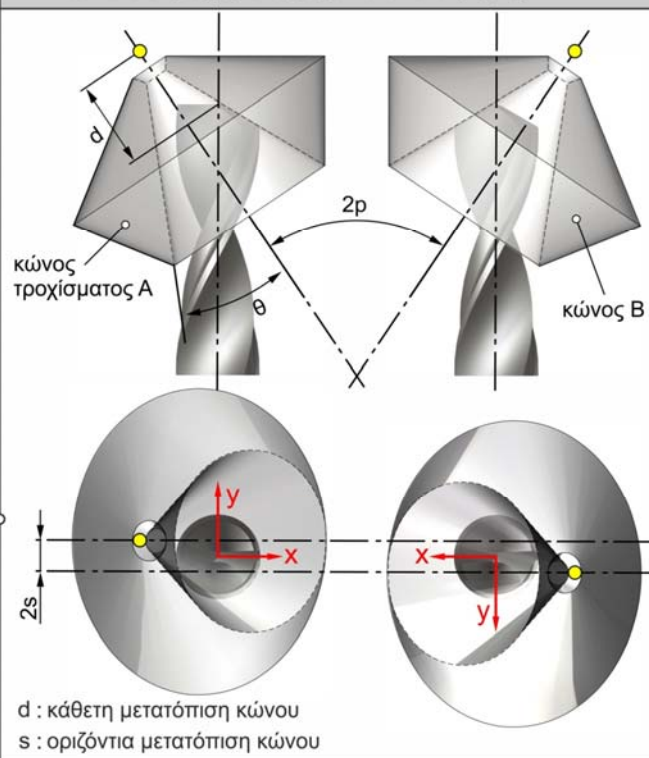
$$u = \arcsin\left(\frac{W/2}{r}\right) + \frac{\sqrt{r^2 - (W/2)^2} \tan(h)}{D/2 \tan(p)}$$

Αυλακώσεις εργαλείου



$$I = \frac{\pi D}{\tan(h)}$$

Διαδικασία τροχίσματος εργαλείων διάτρησης



d : κάθετη μετατόπιση κώνου
s : οριζόντια μετατόπιση κώνου



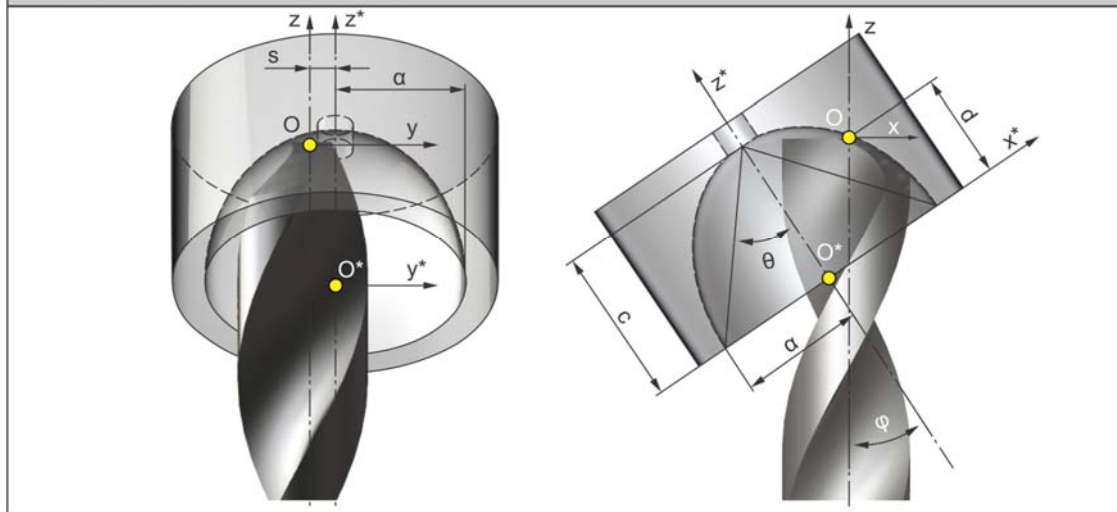
Διαδικασία μοντελοποίησης των εργαλείων

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

Τρόχισμα ελλειψοειδούς κορυφής



$$\frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\alpha^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

$$x_o^* = \sqrt{\alpha^2 + \frac{\alpha^2}{c^2} d^2 - s^2}$$

$$y_o^* = -s$$

$$z_o^* = d$$

ρ : ημιγωνία της κορυφής του εργαλείου [deg]

θ : ημιγωνία του θέσης του τροχίσματος σε σχέση με το εργαλείο [deg]

ϕ : γωνία απόθεσης κόνιου κάρου τροχίσματος ως προς το εργαλείο [deg]

s : μετατόπιση του κώνου παράλληλα στον άξονα Z [mm]

α, c : παράμετροι υπερβολής, αλληλα στον άξονα Y* [mm]

2013

Μοντέλο DIATRISIS



Μοντελοποίηση κορυφής

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Προσεγγίσεις της διάτρησης με FEM

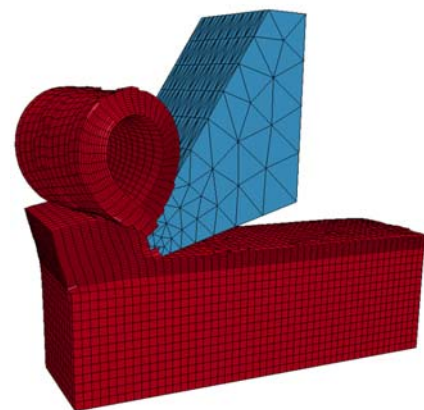
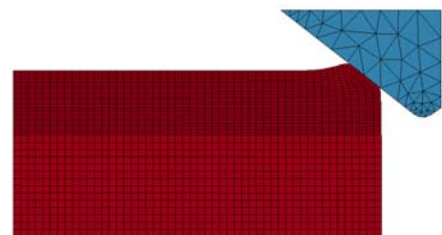
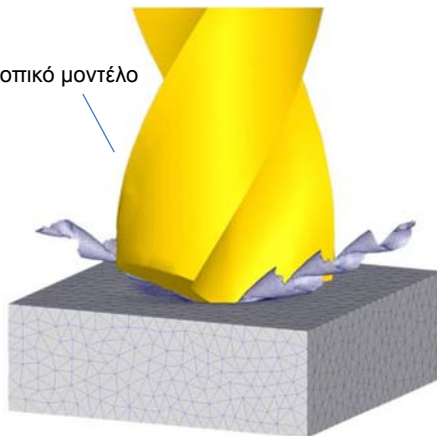
Μακροσκοπικό μοντέλο

- Μεγάλο μέγεθος του μοντέλου
- Αργή επίλυση

Διαδοχικές ορθογωνικές και λοξές κοπές

- Αργή και πολύπλοκη προεπεξεργασία
- Γρήγορη και ακριβής επίλυση

Μακροσκοπικό μοντέλο



2013

Μοντέλο DIATRISIS

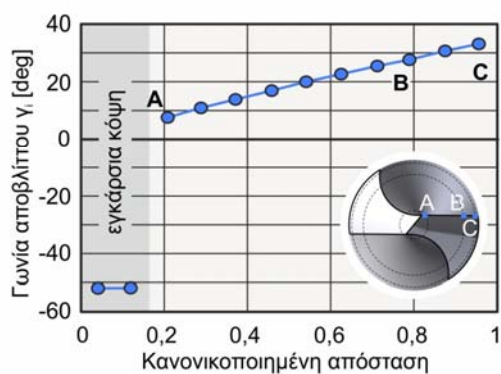


Προσεγγίσεις προσομοίωσης της διάτρησης

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

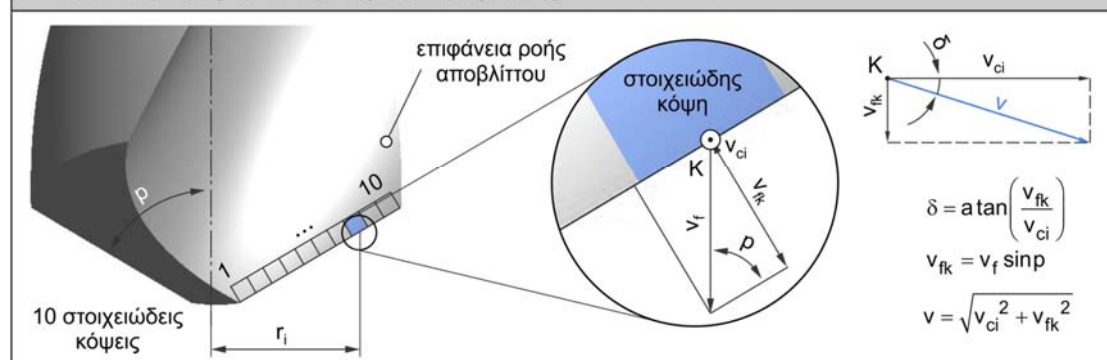
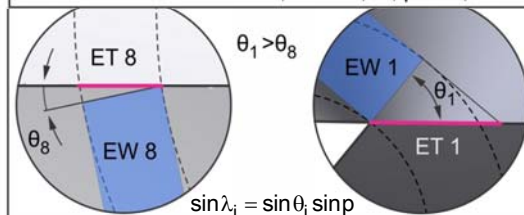
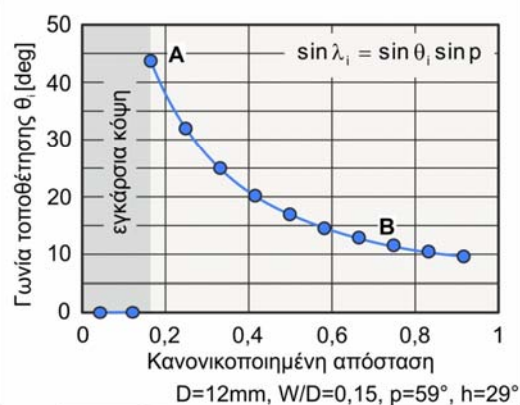
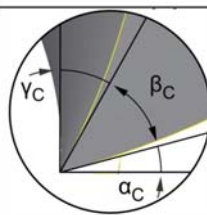

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής



$$\gamma_A < \gamma_B < \gamma_C$$

$$\beta_A > \beta_B > \beta_C$$



v_{ci} : ταχύτητα κοπής του στοιχειώδους εργαλείου i [m/sec]

v_c : ταχύτητα κοπής της διάτρησης [m/sec]

v_f : ταχύτητα της πρόωσης [m/sec]

r_i : κάθετη απόσταση του στοιχειώδους εργαλείου i από τον άξονα του εργαλείου [m]

D : διάμετρος του εργαλείου [m]

p : ημιγωνία κορυφής [deg]

$$v_{ci} = 2 \frac{v_c r_i}{D}$$



Δεδομένα εισόδου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Γεωμετρικά δεδομένα

l_w : μήκος τεμαχίου [mm]
 w_w : πλάτος τεμαχίου [mm]
 h_w : ύψος τεμαχίου [mm]
 l_t : μήκος εργαλείου [mm]
 w_t : πλάτος εργαλείου [mm]
 h_t : ύψος εργαλείου [mm]
 α : γωνία ελευθερίας [deg]
 γ : γωνία αποβλίπτου [deg]
 r : ακτίνα καμπυλότητας [mm]

Δεδομένα διακριτοποίησης

m_x : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα x
 m_y : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα y
 m_z : διακριτοποίηση τεμαχίου κατά τον άξονα z
 m_{tw} : διακριτοποίηση πλάτους εργαλείου
 m_{rd} : αριθμός επαναλήψεων πύκνωσης του πλέγματος
 m_{cpe} : αριθμός στοιχείων πάνω από το επίπεδο κοπής
 m_{hr} : ύψος πύκνωσης της διακριτοποίησης
 m_{tmm} : επιλογή μεθόδου διακριτοποίησης του εργαλείου
 m_{wmm} : επιλογή μεθόδου διακριτοποίησης του τεμαχίου

Δεδομένα κατεργασίας

a_p : βάθος κοπής [mm]
 λ : γωνία κλίσης [deg]
 v_c : ταχύτητα κοπής [m/min]
 v_f : ταχύτητα πρόωσης [m/min]

Δεδομένα υλικών

mat_{mt} : επιλογή μοντέλου υλικού του εργαλείου
 mat_{mw} : επιλογή μοντέλου υλικού του τεμαχίου
 mat_{id} : αριθμός υλικού εργαλείου στη βάση δεδομένων
 mat_{wid} : αριθμός υλικού τεμαχίου στη βάση δεδομένων



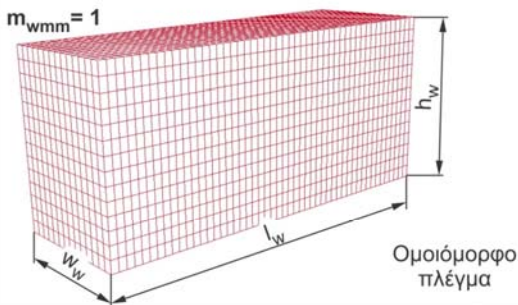
Βασικά δεδομένα εισόδου

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

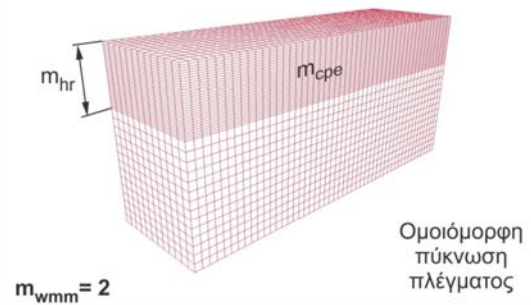

Πολυτεχνείο Κρήτης
 Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
 Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

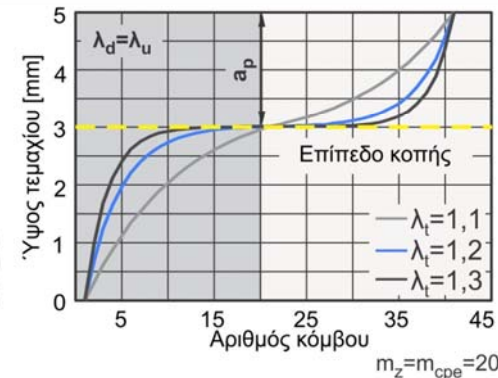
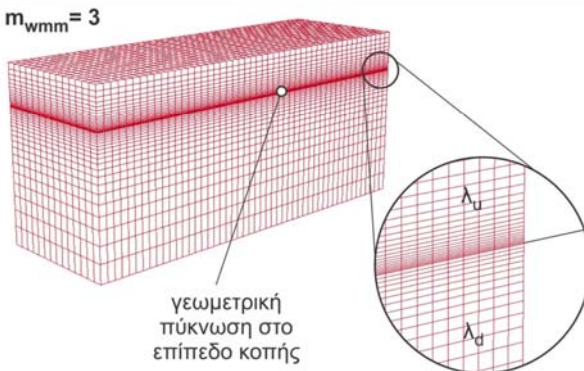
Διακριτοποίηση 1



Διακριτοποίηση 2



Διακριτοποίηση 3



Διακριτοποίηση κατεργαζόμενου τεμαχίου

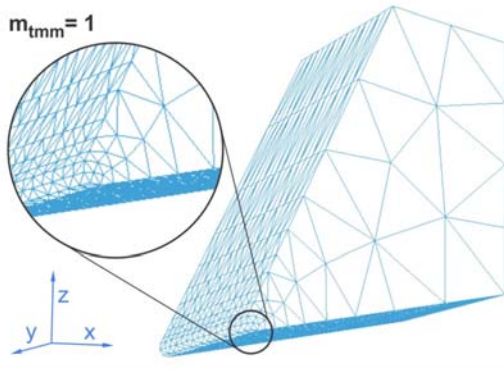
<http://www.m3.tuc.gr>


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

Ταξιάρχης Μπελής

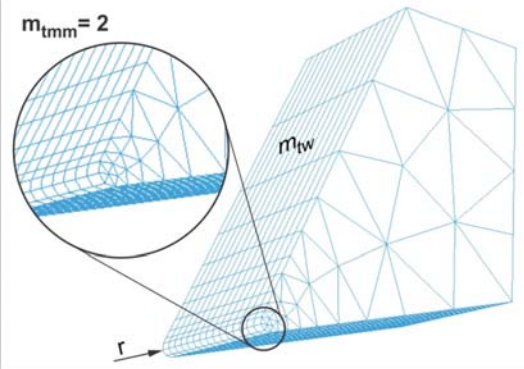
Διακριτοποίηση 1

$$m_{tmm} = 1$$

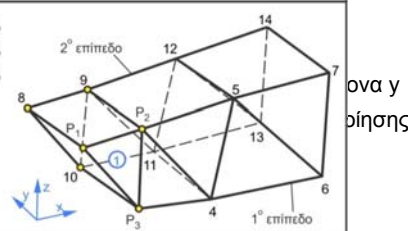
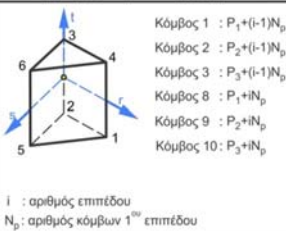


Διακριτοποίηση 2

$$m_{tmm} = 2$$



Αλγόριθμος διακριτοποίησης εργαλείου



$$\begin{bmatrix} l_{1n} \\ l_{2n} \\ l_{3n} \\ l_{4n} \\ l_{5n} \\ l_{6n} \\ l_{7n} \\ l_{8n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t(j,1) + (i-1)N_p \\ t(j,3) + (i-1)N_p \\ t(j,3) + iN_p \\ t(j,1) + iN_p \\ t(j,2) + (i-1)N_p \\ l_{5n} \\ t(j,2) + iN_p \\ l_{7n} \end{bmatrix}$$

2013



Διακριτοποίηση κοπτικού εργαλείου

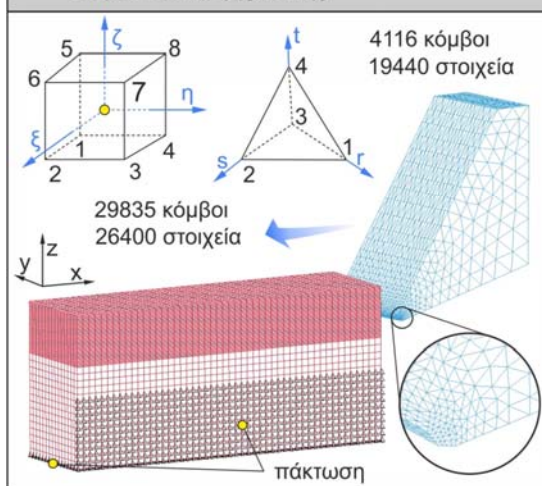
<http://www.m3.tuc.gr>


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

Ταξιάρχης Μπελής

Αριθμητικά μοντέλα

3D μοντέλο λοξής κοπής



Παράμετροι της προσομοίωσης

- Μοντέλα υλικών
 - Johnson-Cook
 - Simplified Johnson-Cook**
 - Plastic-Kinematic
- Δεδομένα επαφής
- Απόσβεση
- Τριβή
- Παράμετροι ελέγχου
- Έλεγχος χρονικού βήματος
- Έλεγχος ιδιομορφών μηδενικής ενέργειας
- Έλεγχος ενέργειας

δ : γωνία του διανύσματος της ταχύτητας κοπής [deg]

λ : γωνία κλίσης του εργαλείου [deg]

T_t : πίνακας των συντεταγμένων των κόμβων του εργαλείου

$$T_{asm} = Rot_y(\delta)Rot_z(\lambda)T_t^T + \begin{bmatrix} l_w \\ w_w \\ h_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

2013



Αριθμητικά μοντέλα ορθογωνικής και λοξής κοπής

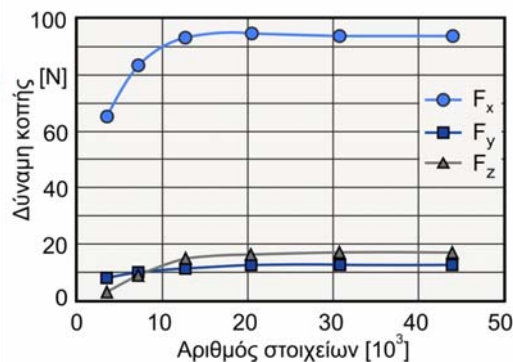
<http://www.m3.tuc.gr>


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

Ταξιάρχης Μπελής

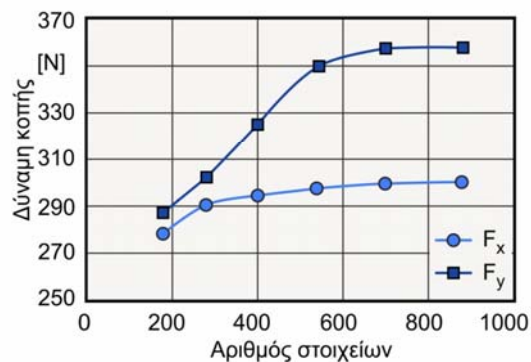
Σύγκλιση μοντέλου δυνάμεων

ET12



$v_c=1,278\text{m/sec}$, $v_f=0,0177\text{m/sec}$, $a_p=0,5\text{mm}$, AL7075
 $m_x=50$, $m_y=12$, $m_z=14$, $m_{hr}=30$, $\lambda=8,05^\circ$, $\gamma=32,62^\circ$
 $\alpha=14,65^\circ$, HSS, AL7075

ET2



$v_c=0,161\text{m/sec}$, $v_f=0,0177\text{m/sec}$, $a_p=0,5\text{mm}$, AL7075
 $v_c=0,161\text{m/sec}$, $v_f=0,0177\text{m/sec}$, $a_p=0,25\text{mm}$, $m_x=35$
 $m_y=16$, $m_{hr}=34$, $\gamma=-52,07^\circ$, $\alpha=35,57^\circ$, HSS, AL7075

Μοντέλο DIATRISIS

2013



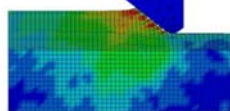
Επίλυση των μοντέλων και σύγκλιση

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

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

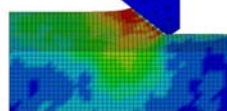
Ταξιάρχης Μπελής

$\lambda_1 = 0^\circ$
 $v_{c1} = 0,053\text{m/sec}$



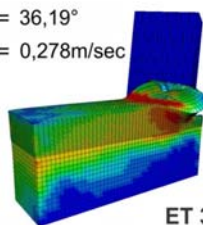
ET 1

$\lambda_2 = 0^\circ$
 $v_{c2} = 0,160\text{m/sec}$



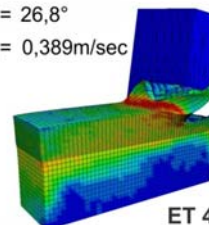
ET 2

$\lambda_3 = 36,19^\circ$
 $v_{c3} = 0,278\text{m/sec}$



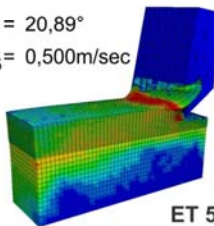
ET 3

$\lambda_4 = 26,8^\circ$
 $v_{c4} = 0,389\text{m/sec}$



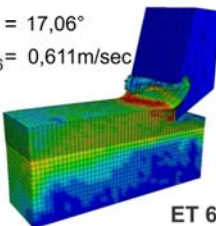
ET 4

$\lambda_5 = 20,89^\circ$
 $v_{c5} = 0,500\text{m/sec}$



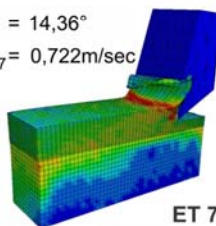
ET 5

$\lambda_6 = 17,06^\circ$
 $v_{c6} = 0,611\text{m/sec}$



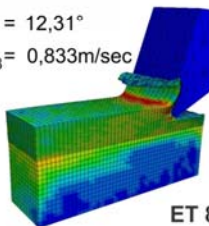
ET 6

$\lambda_7 = 14,36^\circ$
 $v_{c7} = 0,722\text{m/sec}$



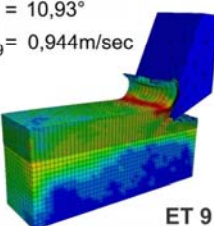
ET 7

$\lambda_8 = 12,31^\circ$
 $v_{c8} = 0,833\text{m/sec}$



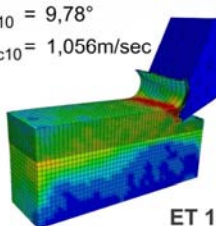
ET 8

$\lambda_9 = 10,93^\circ$
 $v_{c9} = 0,944\text{m/sec}$



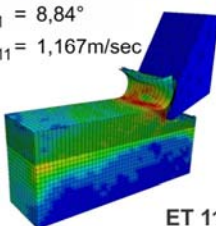
ET 9

$\lambda_{10} = 9,78^\circ$
 $v_{c10} = 1,056\text{m/sec}$



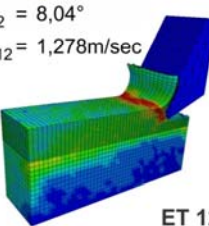
ET 10

$\lambda_{11} = 8,84^\circ$
 $v_{c11} = 1,167\text{m/sec}$



ET 11

$\lambda_{12} = 8,04^\circ$
 $v_{c12} = 1,278\text{m/sec}$



ET 12

100 200 300 400 500 600 700 800 [Mpa] 1000

$D=12\text{mm}$, $v_c=80\text{m/min}$, $f=0,4\text{mm/rev}$, AL7075, DIN338 HSS Τρυπάνι BOSCH

Μοντέλο DIATRISIS

2013



Αποτελέσματα τάσεων

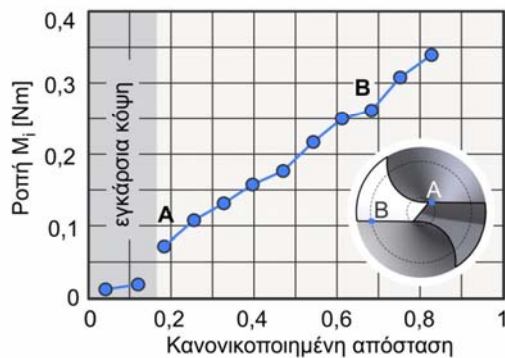
<http://www.m3.tuc.gr>

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

Ταξιάρχης Μπελής

Προσδιορισμός ροπής διάτρησης

Κατανομή ροπής

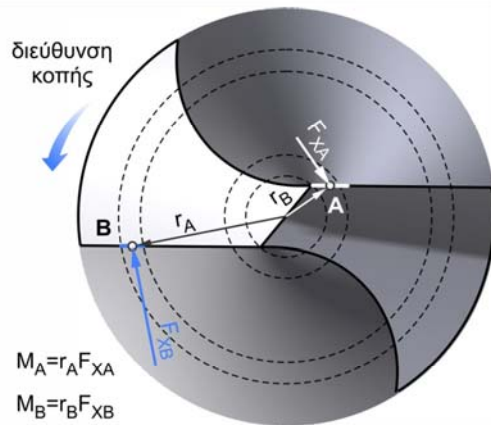


$D=12\text{mm}$, $v_c=80\text{m/min}$, $f=0,3\text{mm/rev}$, AL7075, DIN338 HSS Τρυπάνι BOSCH



Υπολογισμός ροπής

διεύθυνση
κοπής



$$F_{th_{total}} = 2 \sum_{i=1}^n F_{thm_i} + 2 \sum_{i=1}^m F_{thc_i}$$

n : αριθμός στοιχειωδών εργαλείων

2013



Μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων των δυνάμεων κοπής

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



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

Ταξιάρχης Μπελής

Εξοπλισμός πειραμάτων



Κέντρο κατεργασιών
DMG DMU50eco



Διάταξη μηδενισμού
εργαλείων Microset
Uno 115eco

BOSCH HSS DIN338



Δυναμόμετρο
Kistler 9257BA



Ελεγκτής
Kistler 5233A



Ευθυγράμμιση και σταθεροποίηση
της διάταξης

2013



Πειραματική διάταξη και εξοπλισμός

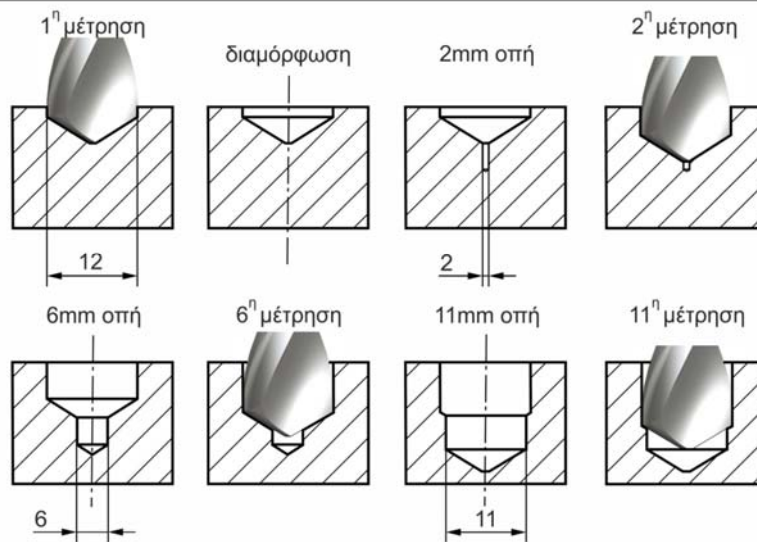
<http://www.m3.tuc.gr>



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

Ταξιάρχης Μπελής

Πειραματική διαδικασία



2013



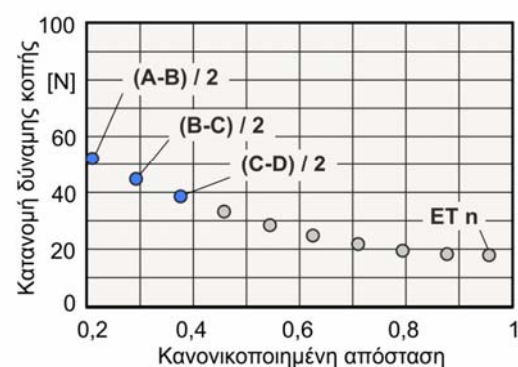
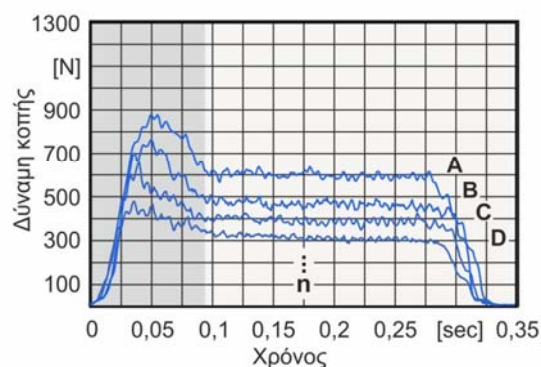
Πειραματική διαδικασία

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Υπολογισμός κατανομής δύναμης κοπής στην κύρια κόψη



11	12	11	0,3	32	12	10	0,5
12	12	-	0,4	33	12	11	0,5
13	12	2	0,4	34	12	-	0,2
14	12	3	0,4	35	12	-	0,6
15	12	4	0,4	36	14	-	0,3
16	12	5	0,4	37	14	-	0,4
17	12	6	0,4	38	14	-	0,5
18	12	7	0,4	39	12	2	0,2
19	12	8	0,4	40	12	2	0,6
20	12	9	0,4	41	14	2,5	0,3
21	12	10	0,4	42	14	2,5	0,4

2013



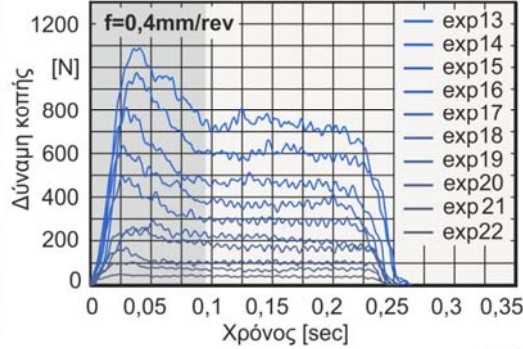
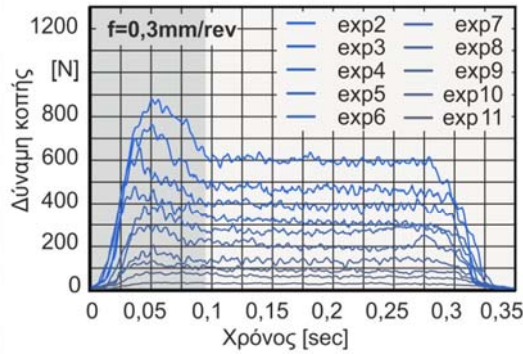
Υπολογισμός της κατανομής της δύναμης κοπής στις κύριες κόψεις

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

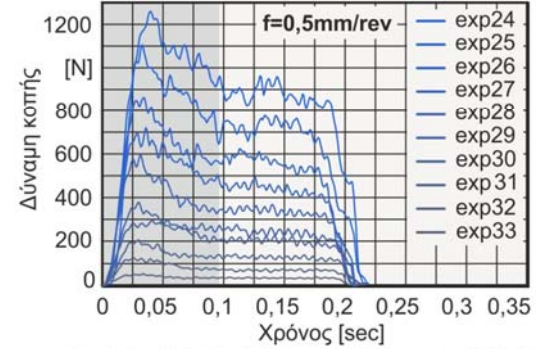
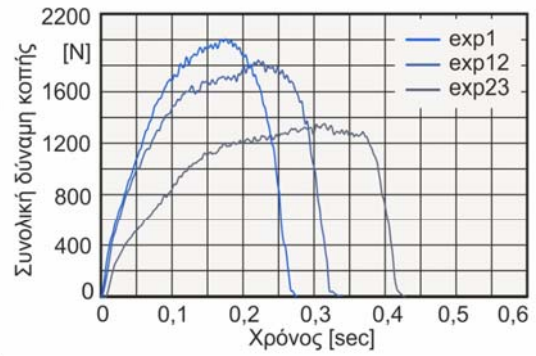

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκόπτης και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

Προδιαμόρφωση σπής



Πλήρης κοπή

D=12mm, $v_c=80\text{m/min}$, AL7075, DIN338 HSS Τρυπάνι BOSCH

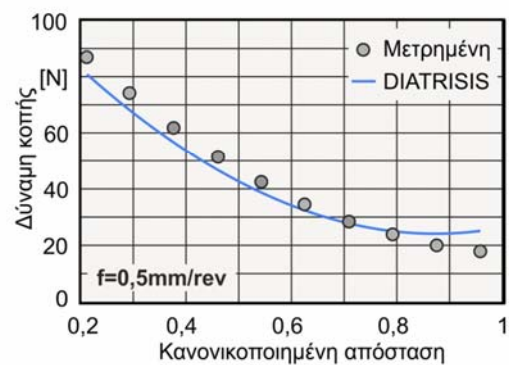
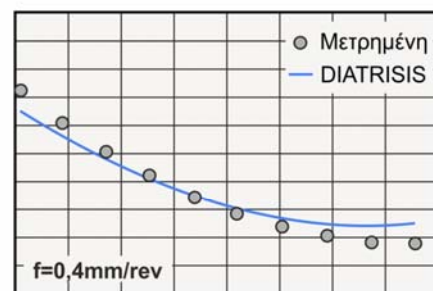
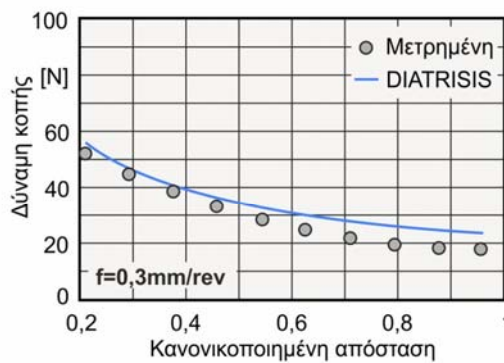
Αποτελέσματα δυναμομετρήσεων

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

Επαλήθευση κατανομής δύναμης κοπής στην κύρια κόψη

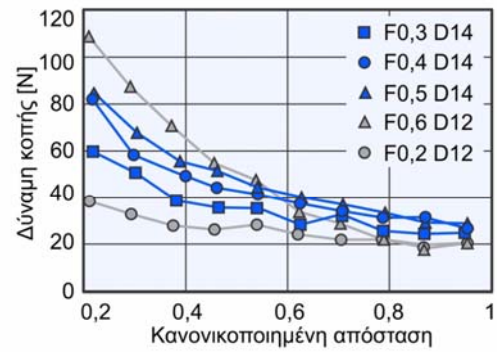
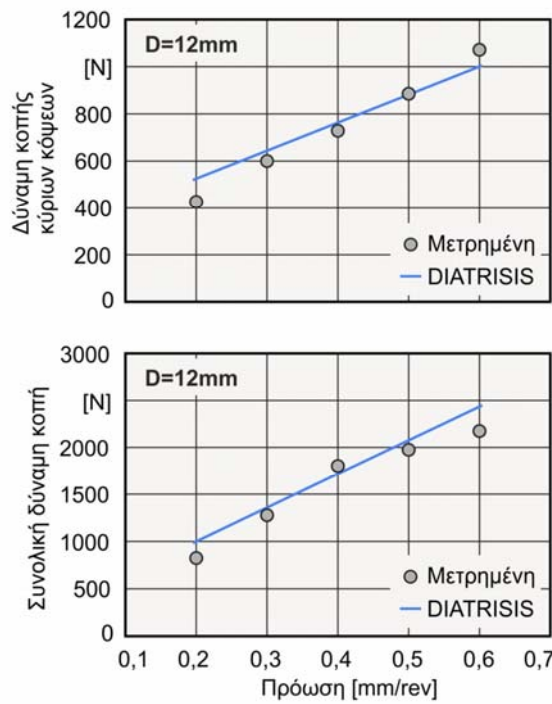
D=12mm, $v_c=80\text{m/min}$, AL7075, DIN338 HSS Τρυπάνι BOSCH

Επαλήθευση της κατανομής της δύναμης κοπής

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

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

Ταξιάρχης Μπελής



$v_c=80\text{m/min}$, AL7075, DIN338 HSS Τρυπάνι BOSCH

2013

Επιβεβαίωση μοντέλου DIATRISIS

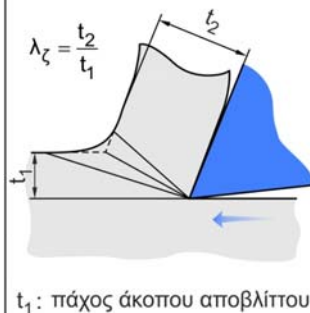


Συνολικά αποτελέσματα

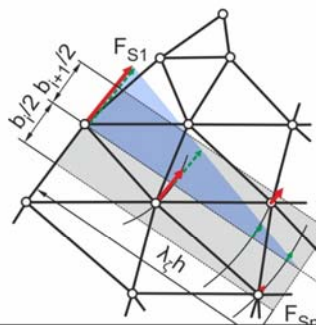
<http://www.m3.tuc.gr>


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

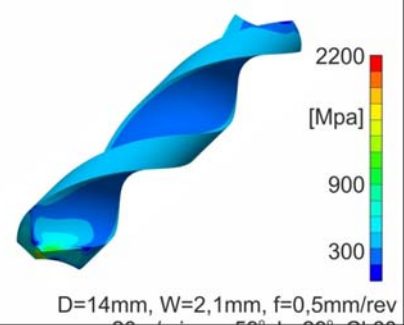
Ταξιάρχης Μπελής

Προσδιορισμός λ_z 

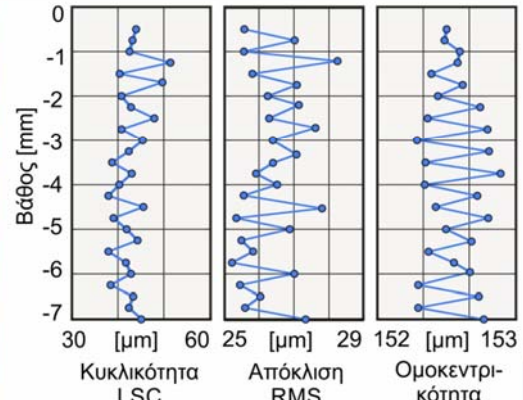
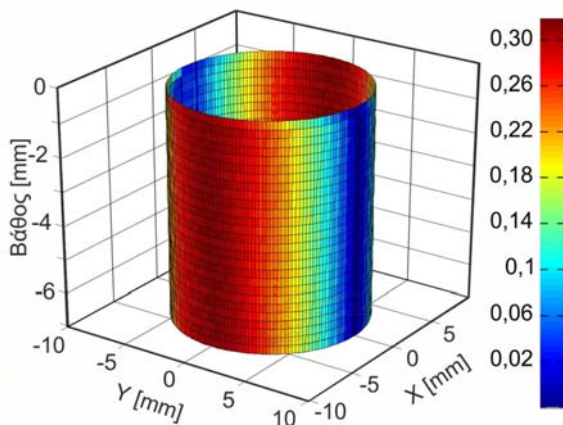
Αλγόριθμος δυνάμεων



Στατική ανάλυση



Υπολογισμός χαρακτηριστικών οπής



2013

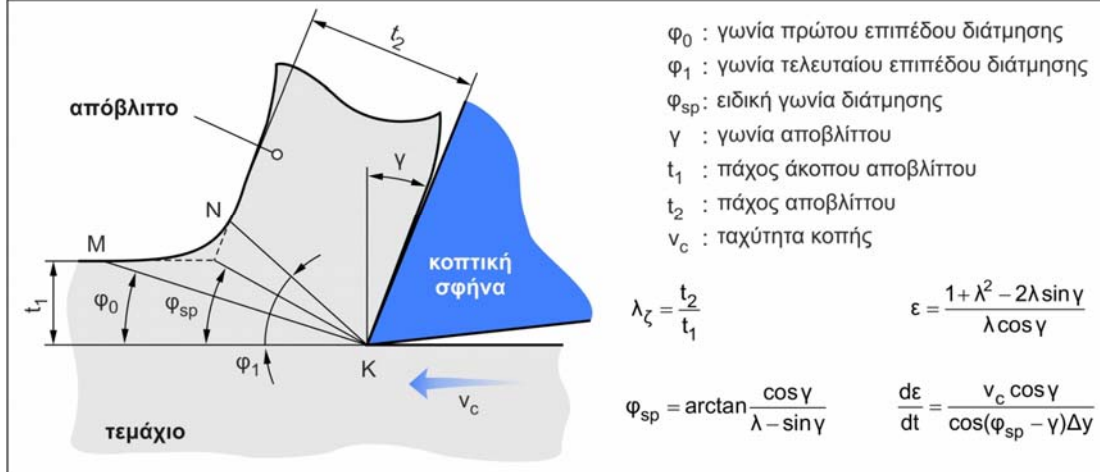
Μοντέλο DYNADRILL



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

Ταξιάρχης Μπελής

Μορφοποίηση αποβλίττου



2013

Μοντέλο DYNADRILL



Συντελεστής συμπίεσης αποβλίττου

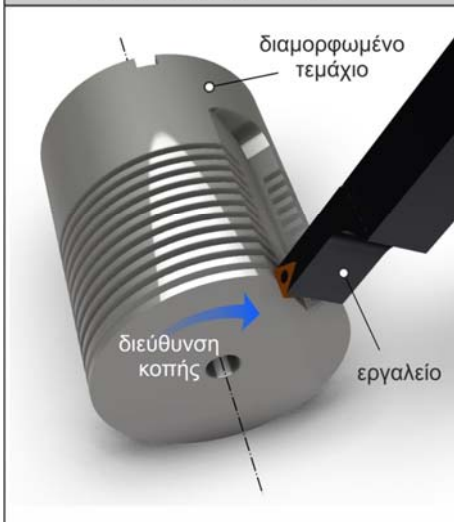
<http://www.m3.tuc.gr>


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

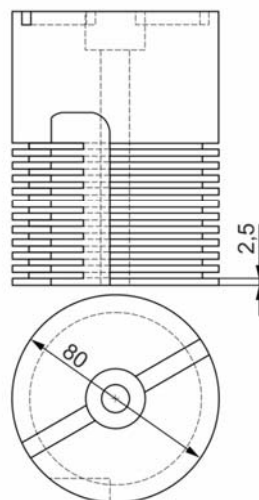
Ταξιάρχης Μπελής

Προετοιμασία τεμαχίου

Συναρμολόγηση μοντέλου



Δοκίμιο



2013

Μοντέλο DYNADRILL



Προετοιμασία του δοκιμίου

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


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

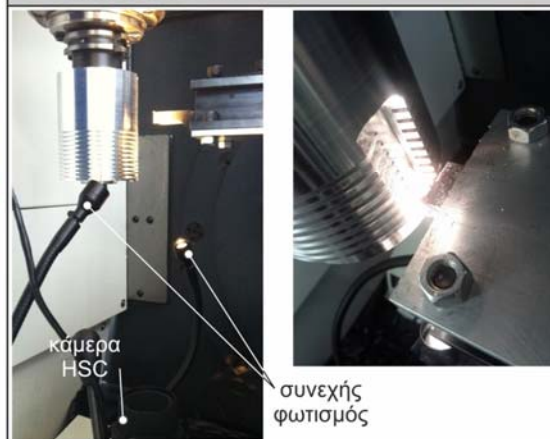
Ταξιάρχης Μπελής

Πειραματική διάταξη

Εξωτερική όψη



Εσωτερική όψη



Πειραματική διάταξη μέτρησης του συντελεστή συμπίεσης αποβλίττου

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα	v_c [m/min]	ap [mm]	γ [deg]	Πείραμα	v_c [m/min]	ap [mm]	γ [deg]	Πείραμα	v_c [m/min]	ap [mm]	γ [deg]
1	100	0,2	6	21	100	0,2	3	41	100	0,2	0
2	100	0,3	6	22	100	0,3	3	42	100	0,3	0
3	100	0,4	6	23	100	0,4	3	43	100	0,4	0
4	100	0,5	6	24	100	0,5	3	44	100	0,5	0
5	80	0,2	6	25	80	0,2	3	45	80	0,2	0
6	80	0,3	6	26	80	0,3	3	46	80	0,3	0
7	80	0,4	6	27	80	0,4	3	47	80	0,4	0
8	80	0,5	6	28	80	0,5	3	48	80	0,5	0
9	60	0,2	6	29	60	0,2	3	49	60	0,2	0
10	60	0,3	6	30	60	0,3	3	50	60	0,3	0
11	60	0,4	6	31	60	0,4	3	51	60	0,4	0
12	60	0,5	6	32	60	0,5	3	52	60	0,5	0
13	40	0,2	6	33	40	0,2	3	53	40	0,2	0
14	40	0,3	6	34	40	0,3	3	54	40	0,3	0
15	40	0,4	6	35	40	0,4	3	55	40	0,4	0
16	40	0,5	6	36	40	0,5	3	56	40	0,5	0
17	20	0,2	6	37	20	0,2	3	57	20	0,2	0
18	20	0,3	6	38	20	0,3	3	58	20	0,3	0
19	20	0,4	6	39	20	0,4	3	59	20	0,4	0
20	20	0,5	6	40	20	0,5	3	60	20	0,5	0

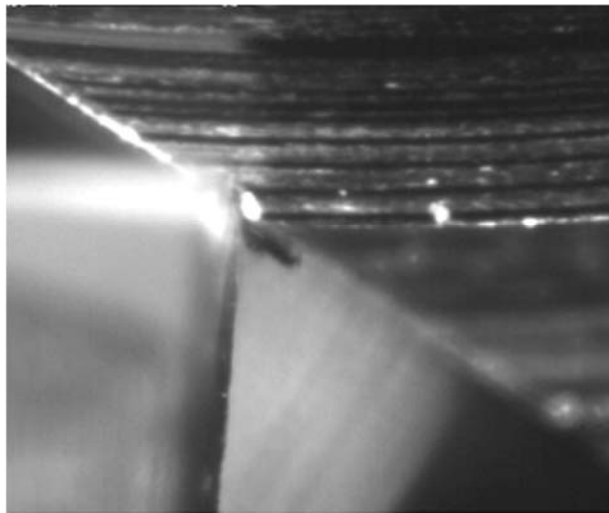
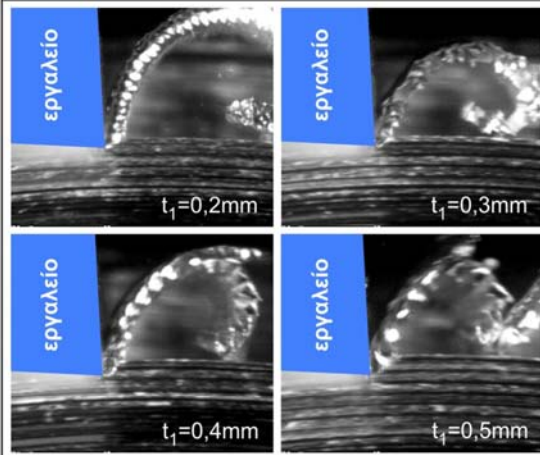


Συνθήκες κοπής

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


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

Ταξιάρχης Μπελής


 $v_c=80\text{m/min}$, $\gamma=3^\circ$, 10000fps


8/3/2013 3:15:08 μs -2893,0[ms]
 000005600 MotionBLITZ EoSens mini2
 Mikrottron GmbH 272x228 @ 10000fps
 98 μs

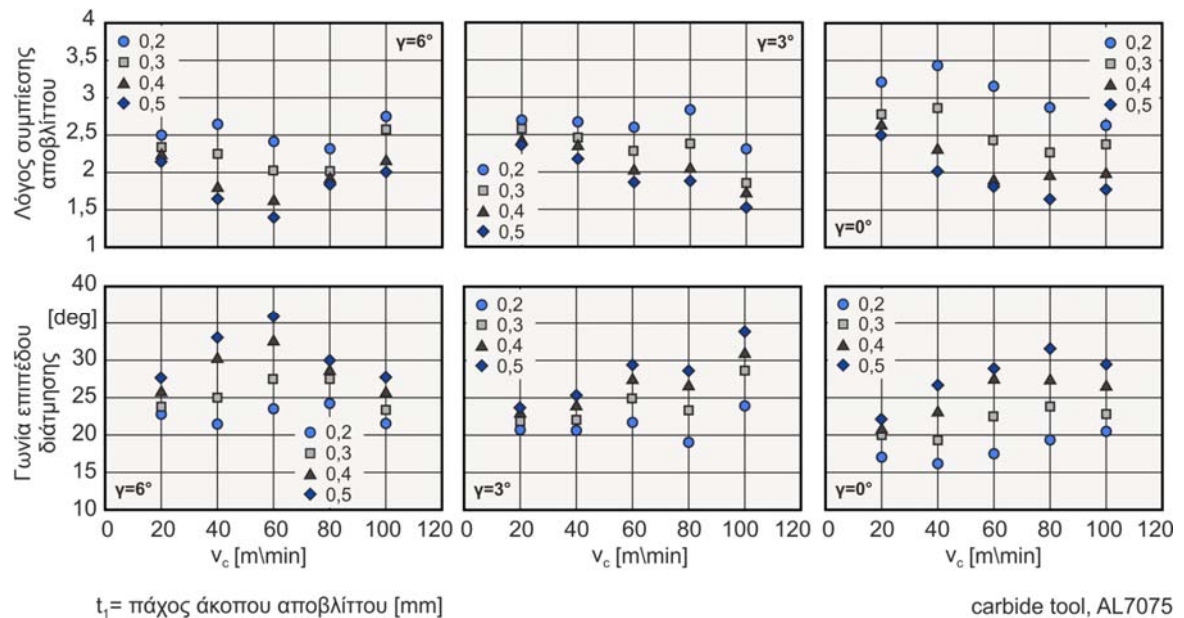


Αποτελέσματα μορφοποίησης αποβλίττου

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

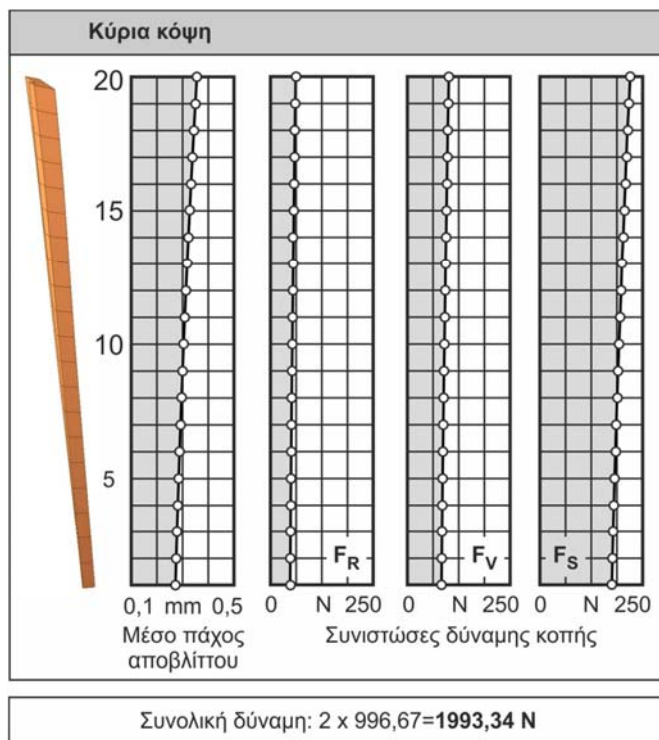


Αποτελέσματα μέτρησης του αποβλίττου

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


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

Ταξιάρχης Μπελής



Kyratsis, P., Tapoglou, N., Bilalis, N., and Antoniadis, A. /2011

"Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface"



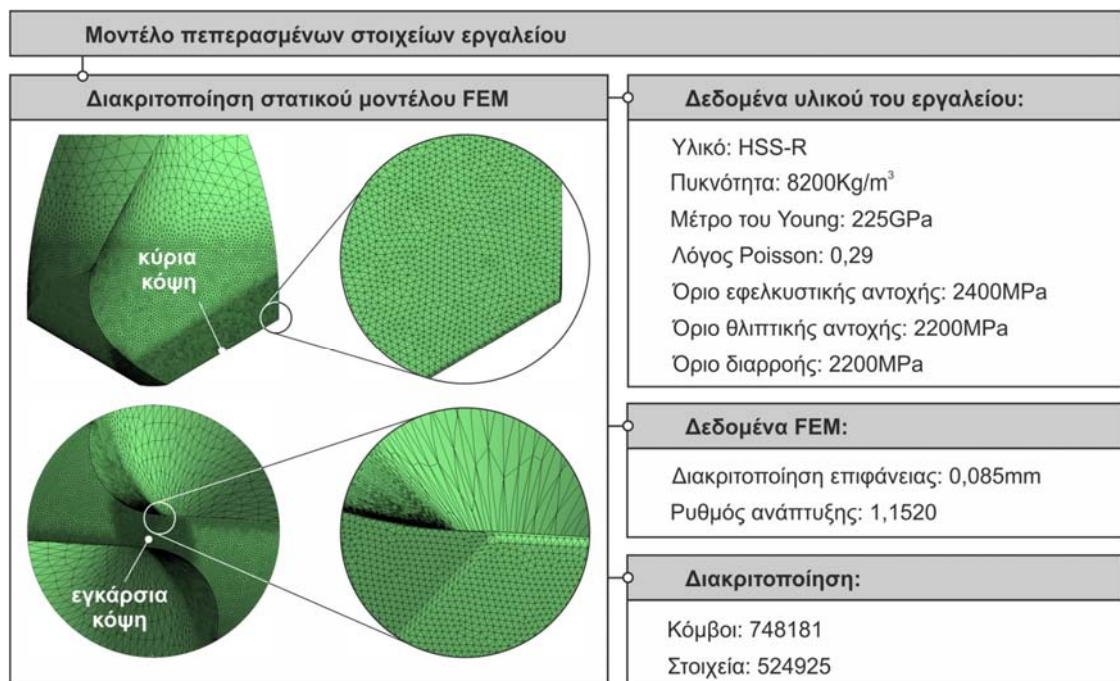
Περιγραφή του DRILL 3D

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



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

Ταξιάρχης Μπελής



Διακριτοποίηση του στατικού μοντέλου

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



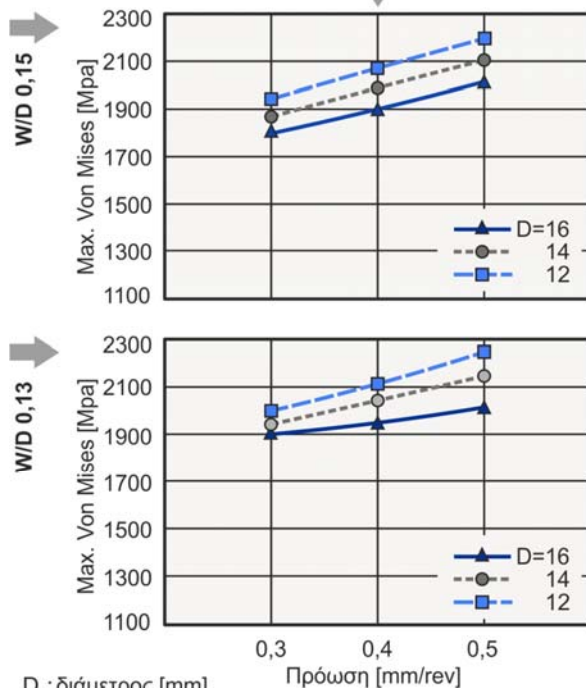
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

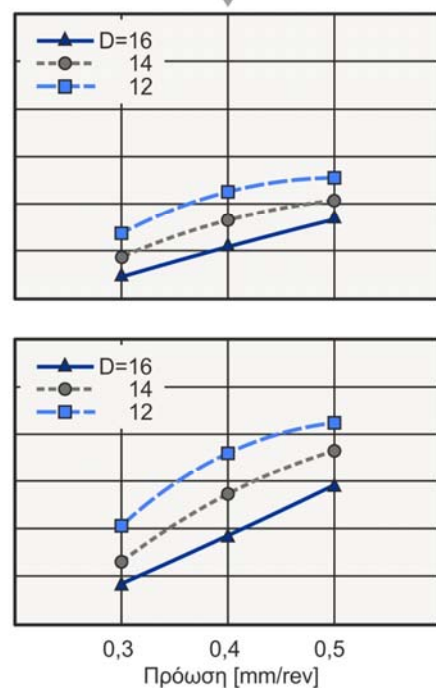
<http://www.m3.tuc.gr>

 $f=0,3\text{mm/rev}, v_c=20\text{m/min}, p=59^\circ, h=29^\circ$
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]}$$

Εγκάρσια κόψη



Κύρια κόψη


 $v_c=20 \text{ m/min}$, $p=59^\circ$, $h=29^\circ$, Ck60

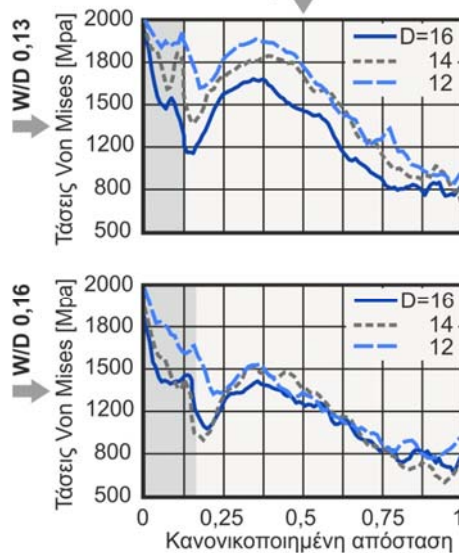

Μέγιστες τάσεις στις παρειές του εργαλείου

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

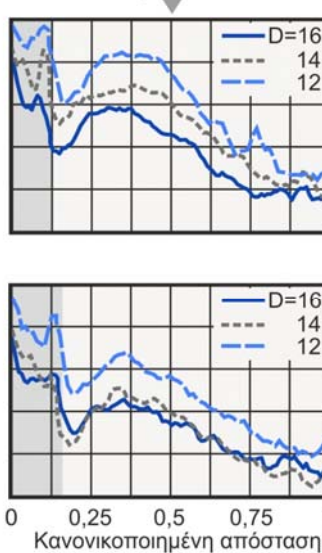

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

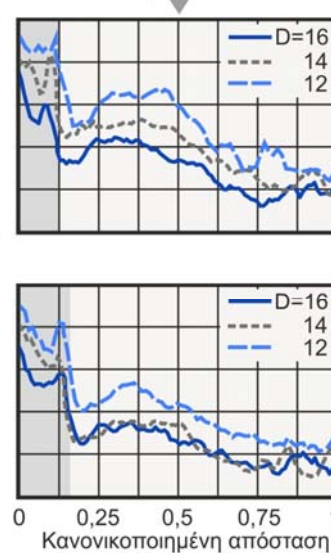
f 0,5



f 0,4



f 0,3


 $v_c=20 \text{ m/min}$, $p=59^\circ$, $h=29^\circ$, Ck60


Κατανομή των τάσεων στις κόψεις του εργαλείου

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

A/A	Ιδιομορφή	F_n [Hz]	n_x	n_y	n_z	n_{rx}	n_{ry}	n_{rz}
1		335,69	1	0,369793	0,000004	0,218015	0,629838	0,000004
2		413,7	0,352543	1	0,000003	0,555980	0,217719	0,000010
3		2062	0,576675	0,028917	0,000026	0,055560	1	0,000015
4		2511,2	0,118641	0,598369	0,000052	0,932550	0,195061	0,000203
5		3733,6	0,000041	0,000116	0,274556	0,000184	0,000067	1
6		5367,1	0,211768	0,335363	0,000029	0,582530	0,402927	0,000110
7		7656,2	0,117783	0,517661	0,000028	0,933100	0,228593	0,000064
8		11229	0,000072	0,000055	0,020339	0,000103	0,000142	0,376625
9		11574	0,326484	0,392336	0,000005	0,741607	0,655905	0,000052
10		12789	0,000113	0,000094	1	0,000208	0,000233	0,297528
11		15413	0,453608	0,059178	0,000080	0,104991	0,937050	0,000052
12		18833	0,000310	0,000100	0,070851	0,000212	0,000655	0,236667
13		20714	0,452884	0,231775	0,000008	0,489908	0,961926	0,000097
14		24827	0,093263	0,469098	0,000037	1	0,202961	0,000014

D=12mm, W=1,4mm, p=59°, h=29°, HSS DIN338 BOSCH

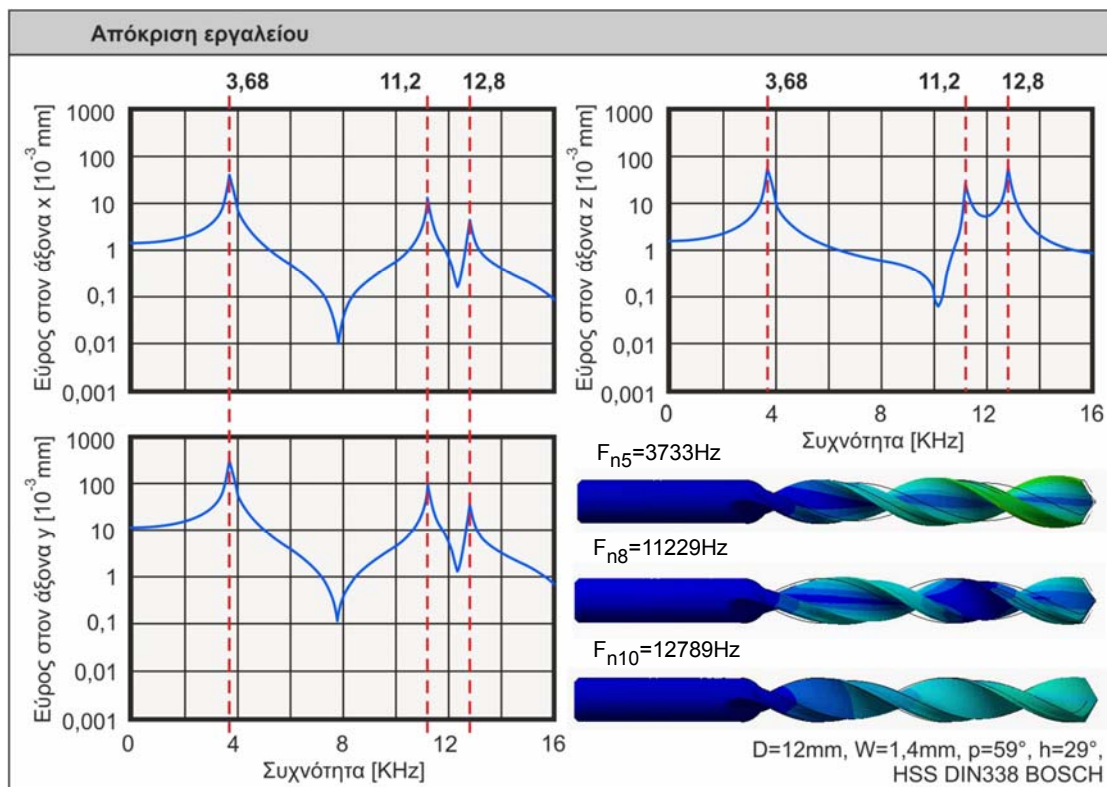


Ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

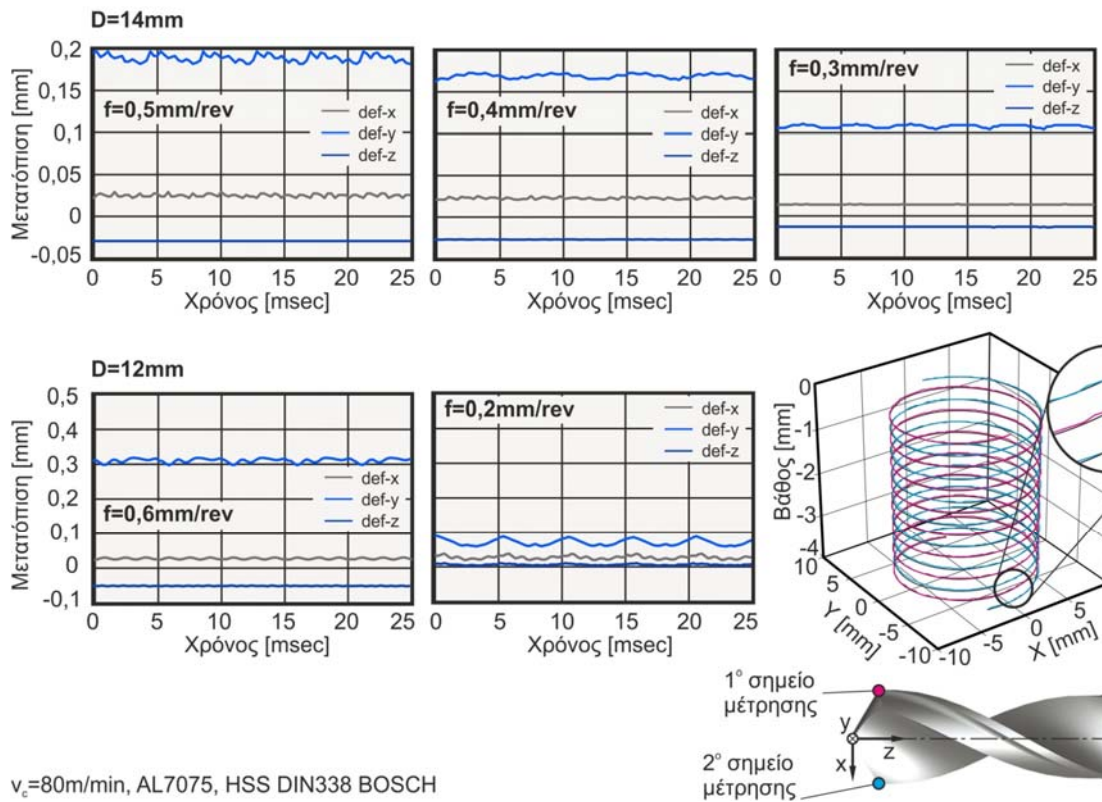


Απόκριση του εργαλείου σε αρμονική φόρτιση

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

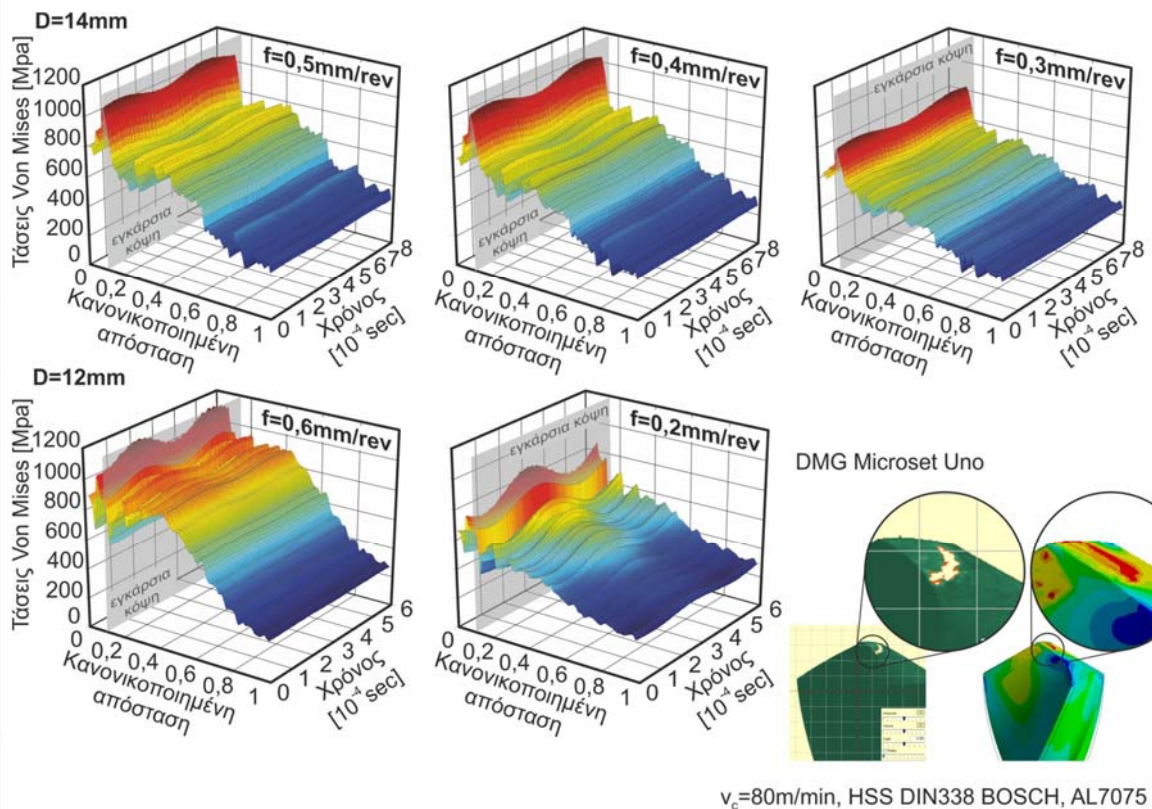


Απόκριση του εργαλείου σε δυναμική φόρτιση

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


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

Ταξιάρχης Μπελής



Δυναμική κατανομή των τάσεων στο ανάπτυγμα των κόψεων

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

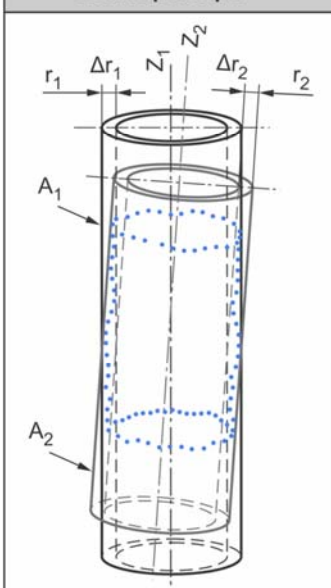

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης

Ταξιάρχης Μπελής

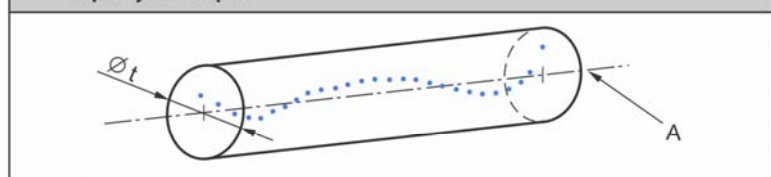


Ποιοτικά χαρακτηριστικά οπής

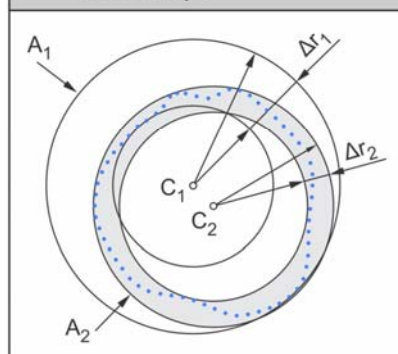
Κυλινδρικότητα



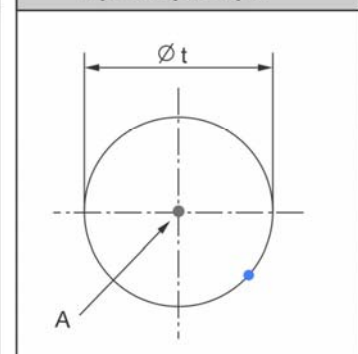
Ομοαξονικότητα



Κυκλικότητα

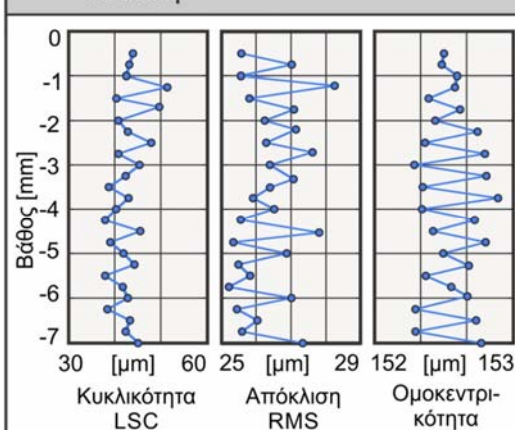


Ομοκεντρικότητα



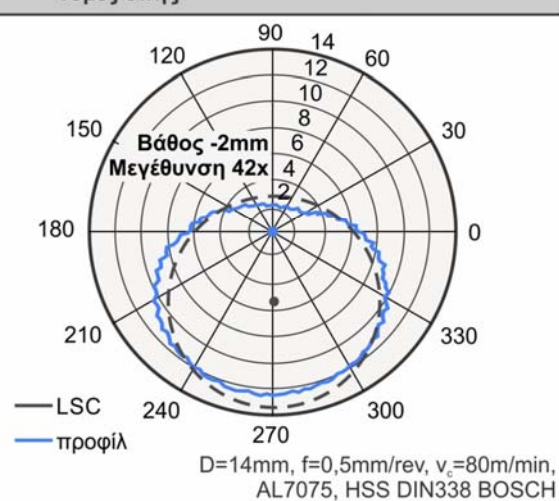
Υπολογισμός χαρακτηριστικών οπής

Ανάλυση

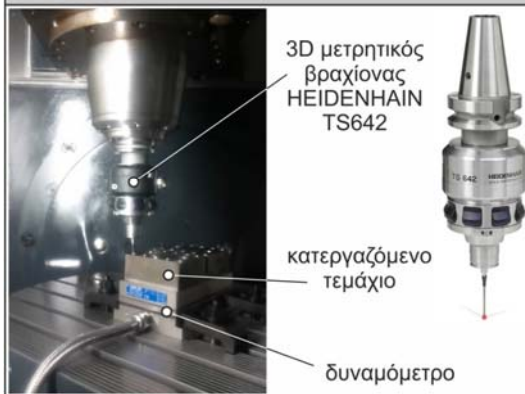


Κυλινδρικότητα : 0,334mm
Ομοαξονικότητα : 0,156mm

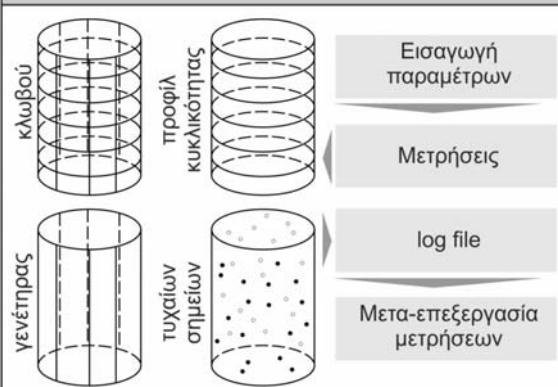
Τομές οπής



Πειραματική διάταξη



Πρωτόκολλο μετρήσεων



Πείραμα	D [mm]	v_c [m/min]	f [mm/rev]
1	12	80	0,2
2	12	80	0,6
3	14	80	0,3
4	14	80	0,4
5	14	80	0,5



2013

Μοντέλο DYNADRILL



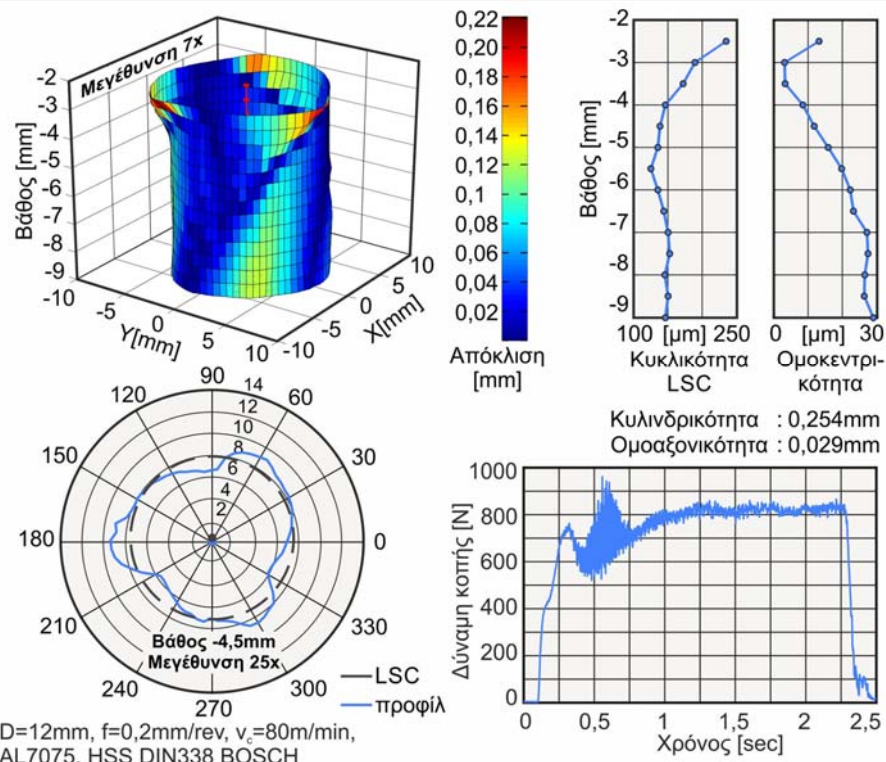
Μέτρηση χαρακτηριστικών οπών

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα 1



2013

Μοντέλο DYNADRILL



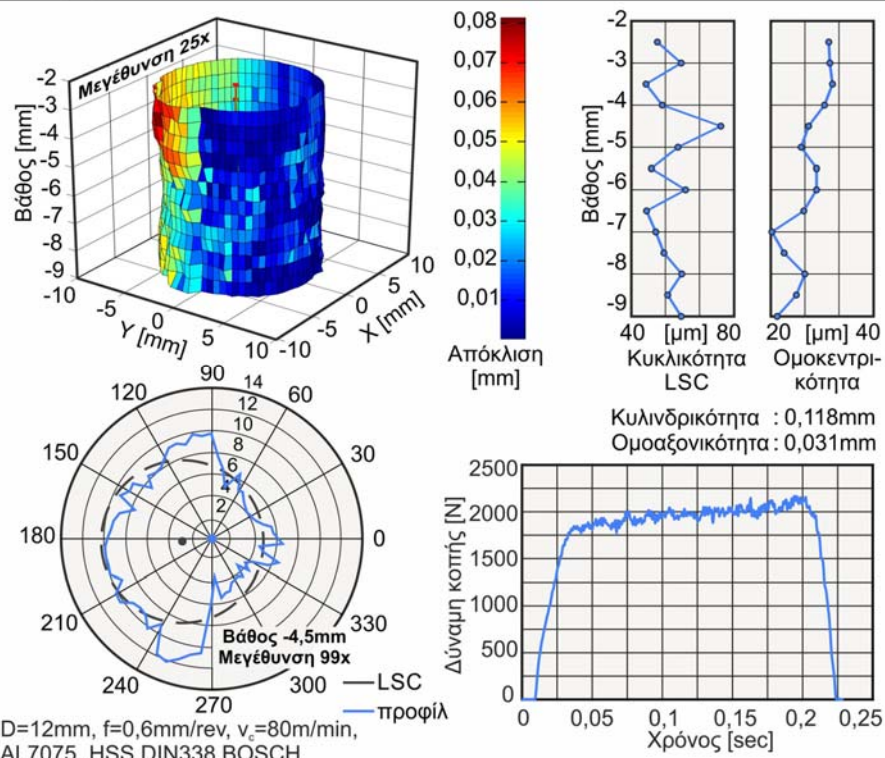
Αποτελέσματα πειράματος 1

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα 2



2013

Μοντέλο DYNADRILL



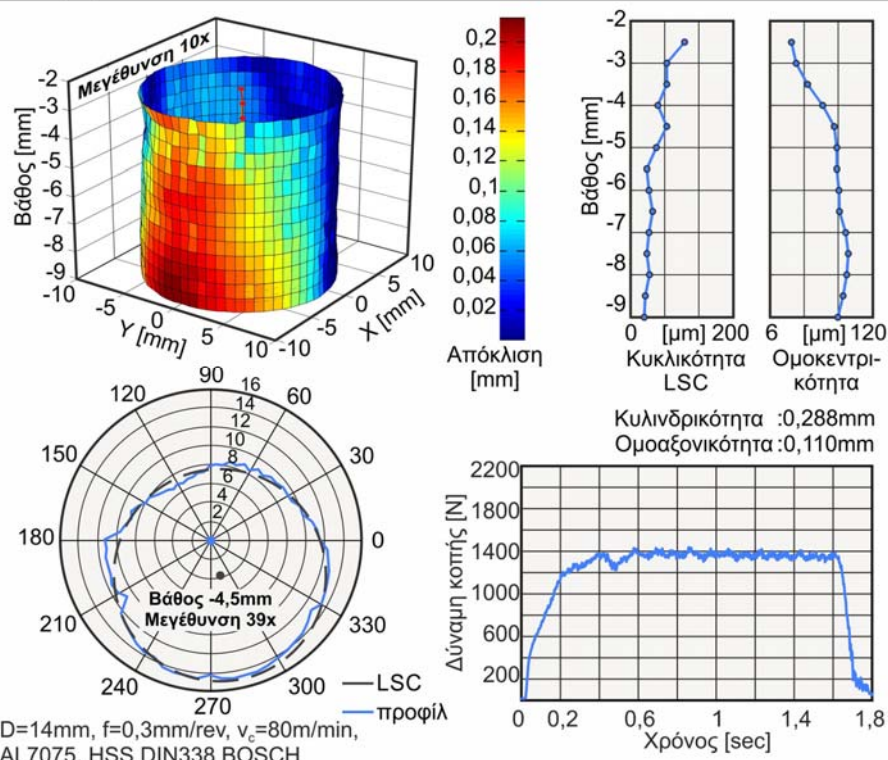
Αποτελέσματα πειράματος 2

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα 3



2013

Μοντέλο DYNADRILL



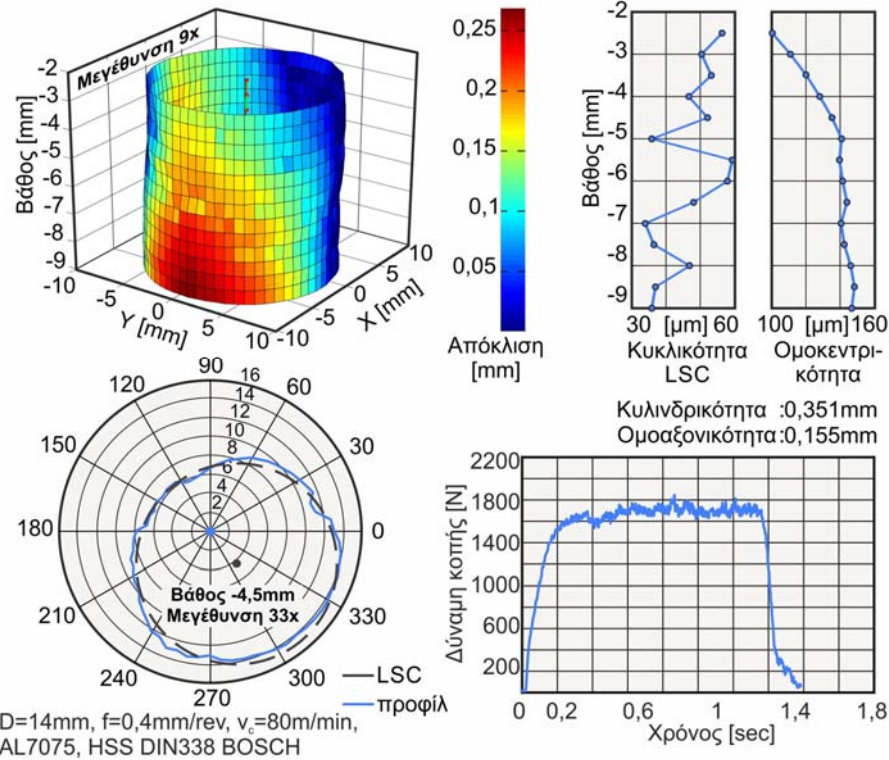
Αποτελέσματα πειράματος 3

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα 4



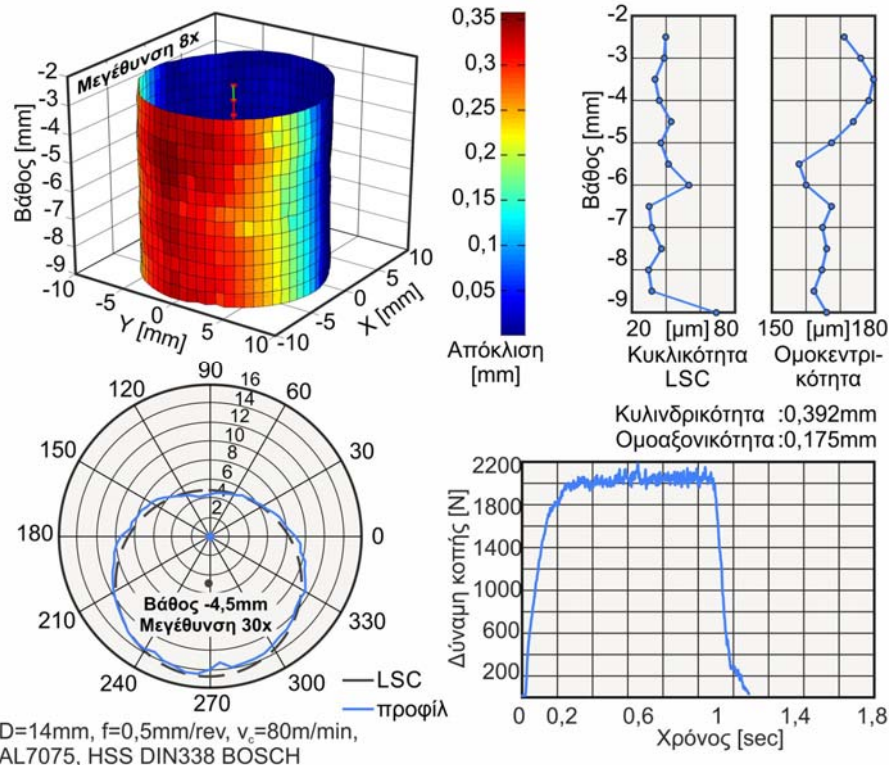
Αποτελέσματα πειράματος 4

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

Πείραμα 5

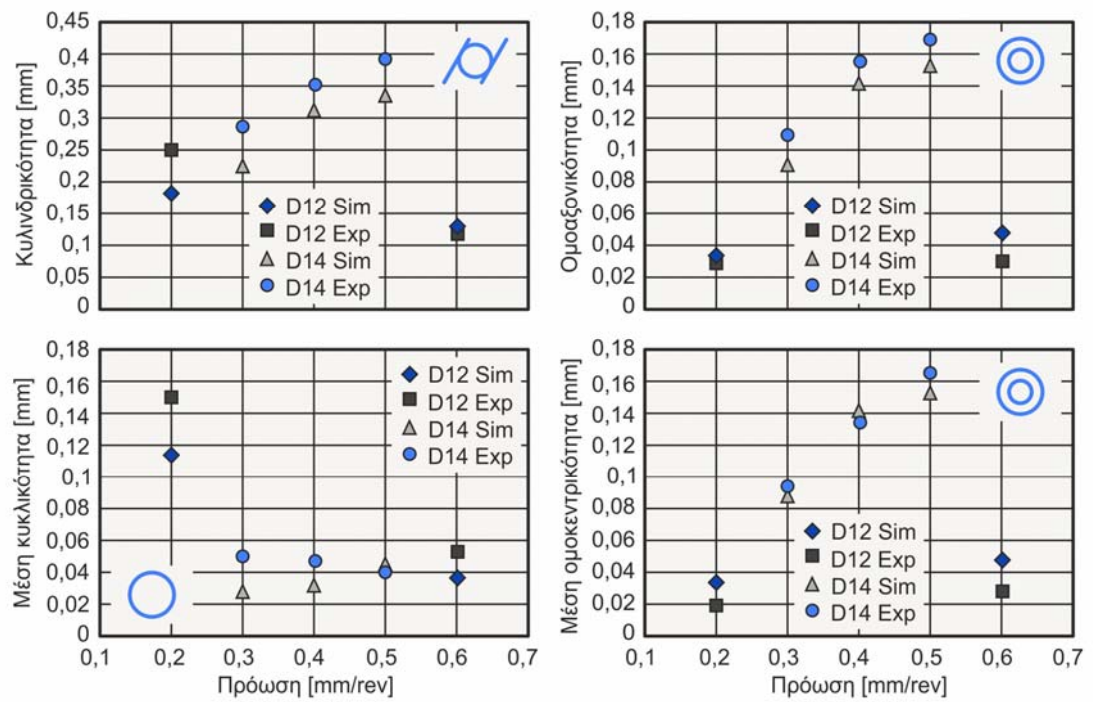


Αποτελέσματα του πειράματος 5

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


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

Ταξιάρχης Μπελής



$v_c=80$ m/min, $p=59^\circ$, $h=29^\circ$, HSS DIN338 BOSCH, AL7075

2013

Μοντέλο DYNADRILL

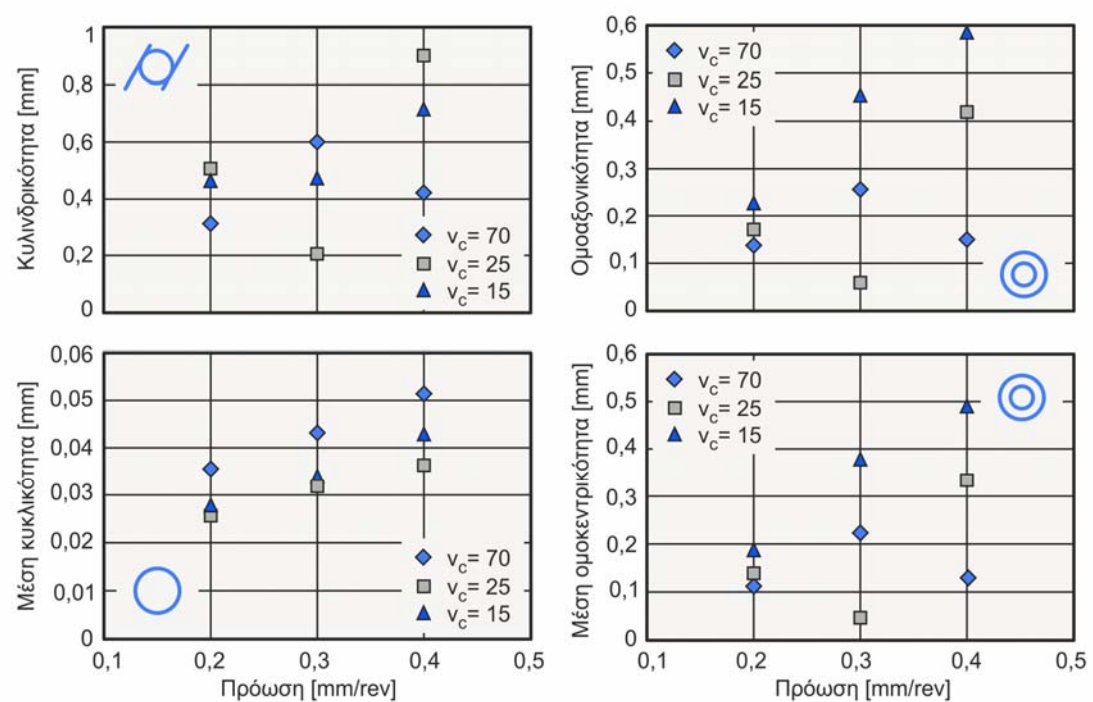


Επαλήθευση μοντέλου DYNADRILL

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


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

Ταξιάρχης Μπελής



$D=10$ mm, $p=59^\circ$, $h=29^\circ$, HSS DIN338 BOSCH, C45

2013

Μοντέλο DYNADRILL

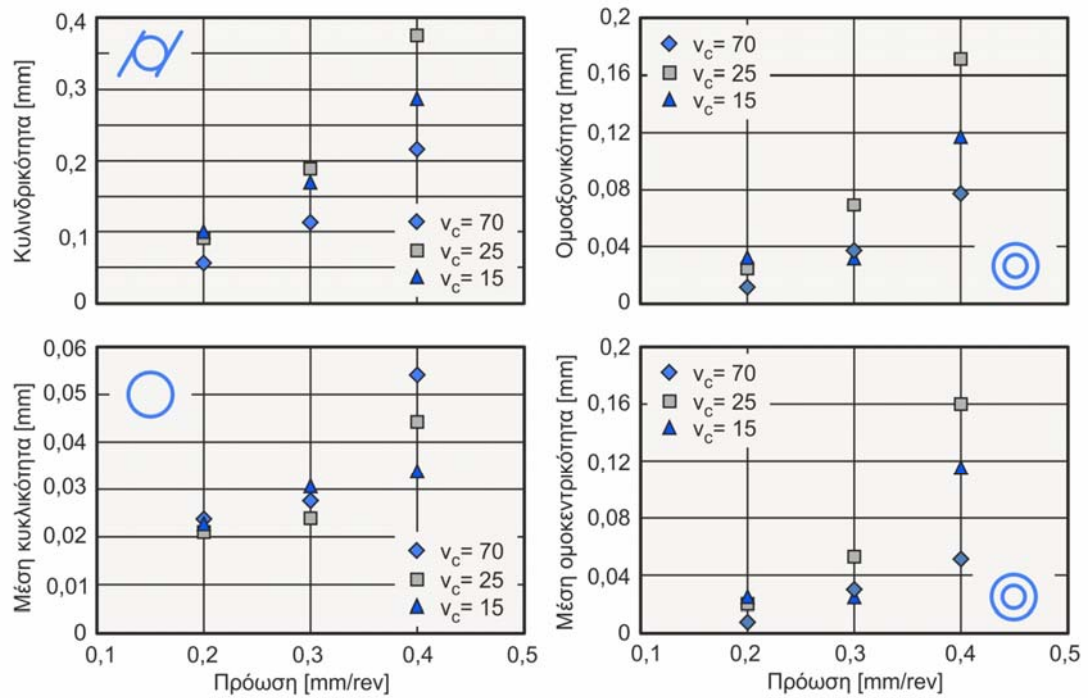


Επίδραση της ταχύτητας κοπής στα χαρακτηριστικά της οπής

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


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

Ταξιάρχης Μπελής

D=10mm, $p=70^\circ$, $h=30,6^\circ$, GC1220 R840 SANDVIK, C45

2013

Μοντέλο DYNADRILL



Επίδραση του εργαλείου στα χαρακτηριστικά της οπής

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

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

Ταξιάρχης Μπελής

Σύνοψη:

Το μοντέλο **DIATRISIS** περιλαμβάνει:

- **Αυτοματοποιημένη σχεδίαση εργαλείων διάτρησης.**
 - μοντελοποίηση κωνικών, υπερβολοειδών και ελλειψοειδών εργαλείων
 - αυτόματη μοντελοποίηση στελέχους και οδηγητικής λωρίδας
- **Ολοκληρωμένο προεπεξεργαστή FEM.**
 - προσομοίωση της 2D ορθογωνικής και 3D λοξής κοπής
 - μικρότερος χρόνος επίλυσης
 - ακριβέστερα αποτελέσματα
- **Μεταεπεξεργασία αποτελεσμάτων.**
 - υπολογισμός δύναμης κοπής, ροπής διάτρησης και της κατανομής τους στις κόψεις

Το μοντέλο **DYNADRILL** περιλαμβάνει:

- **Ειδικό αλγόριθμο κατανομής των δυνάμεων κοπής στο εργαλείο.**
 - οι δυνάμεις κατανέμονται τόσο στις κόψεις όσο και στις παρειές
 - ο αλγόριθμος ενσωματώθηκε σε σύστημα FEM μειώνοντας το χρόνο προεπεξεργασίας
- **Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης μέτρησης των χαρακτηριστικών της κοπής**
 - ακριβής μέτρηση του συντελεστή συμπίεσης αποβλήτου
- **Στατική και δυναμική ανάλυση του εργαλείου διάτρησης**
 - γενικευμένο μοντέλο και ακριβή αποτελέσματα χάρη στον αλγόριθμο κατανομής δυνάμεων
- **Αλγόριθμο υπολογισμού των χαρακτηριστικών της οπής**
 - υπολογισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ISO
- **Πρωτόκολλο τρισιδιάστατων μετρήσεων οπών**
 - αναπτύχθηκε πρωτόκολλο μετρήσεων οπών βασισμένο σε πενταξονικό κέντρο κατεργασιών



Συμπεράσματα- Μελλοντικές κατευθύνσεις

2013



Σύνοψη

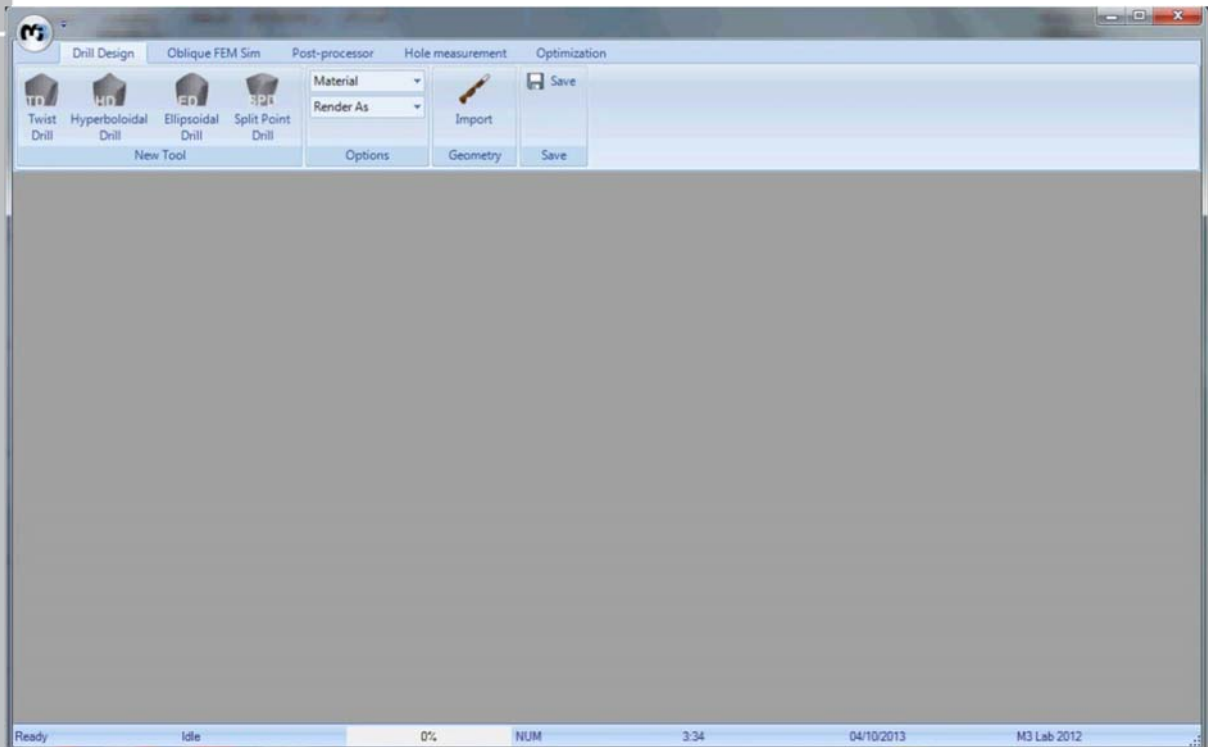
<http://www.m3.tuc.gr>

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

Ταξιάρχης Μπελής

Μελλοντικές κατευθύνσεις:

- Πειραματική μελέτη για την επιβεβαίωση του υπολογισμού της ροπής διάτρησης.
- Μελέτη της μεταβατικής περιοχής της κοπής.
- Μελέτη της έκκεντρης εισχώρησης του εργαλείου.
- Μελέτη διαφορετικών τύπων εργαλείων.
- Στατιστική επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων και βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής με χρήση γενετικών αλγορίθμων.
- Επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε προσομοίωση της διάτρησης σε μικροκλίμακα.



Κεφάλαια βιβλίων

1 Belis T., Kyratsis P., Antoniadis A., "Stress analysis on twist drill tools combining CAD based methodology and finite element analysis", MACHINING operations, technology and management, NOVA Science Publishers USA

Εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές

2 Belis T., Antoniadis A., "An explicit 3D Lagrangian finite element model for the determination of the thrust force distribution in drilling of AL7075", International Journal of Computer Integrated Manufacturing (υπό κρίση)

3 Belis T., Pappa M., Antoniadis A., "Chip formation characteristics in high speed machining of AL7075-T6 utilizing high-speed microvideography", International Journal of Machining and Forming Technologies (υπό κρίση)

Εργασίες σε διεθνή συνέδρια με κριτές

4 Tapoglou N., Belis T., Vakondios D., Antoniadis A., "CAD based Simulation of Gear Hobbing", 31th International Workshop on Mechanics and Materials, 9-14/5 Chania, Greece

5 Belis T., Antoniadis A., "Hobbing Wear Prediction Model Based on 3D Chips Determination" International Conference on Design, Technology and Management in Manufacturing 2010 SPECIAL PRIZE AWARDED, 14-16/5 Iasi, Romania.

**Ευχαριστώ για
την προσοχή σας**

2013


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


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

Ταξιάρχης Μπελής