

## Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητά τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



Επιβλέπων Καθηγητής:  
**Αριστομένης Αντωνιάδης**

Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2023



- Έννοιες και όροι της κατασκευής
- Ενεργειακή απόδοση και βιώσιμη παραγωγή
- Ταξινόμηση ενέργειας μηχανουργικών κατεργασιών
- Ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας
- Μέτρηση και σύγκριση ποσοτήτων ενέργειας με το τελικό προϊόν
- Μέτρηση χαρακτηριστικών επιφάνειας
- Μοντέλα εξοικονόμησης ενέργειας και ενεργειακή μοντελοποίηση
- Στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας
- Μελλοντικές προοπτικές και εκτιμήσεις για το μέλλον



## Σύστημα Παραγωγής



**Κατασκευή:** μετατροπή υλικών και πληροφοριών σε τελικά προϊόντα με υψηλή προστιθέμενη αξία για την ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών.

- Σκοπός **μηχανουργικής κατεργασίας** παραγωγή αντικειμένων με συγκεκριμένες διαστάσεις, σχήματα, επιφάνειες ή χαρακτηριστικά, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους τομείς όπως η βιομηχανία, οι κατασκευές, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική κλπ.



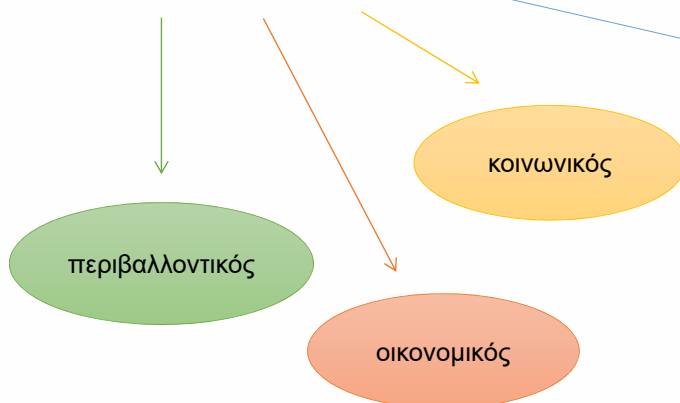
Η **Παραγωγή** ως κινητήρια δύναμη της οικονομίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

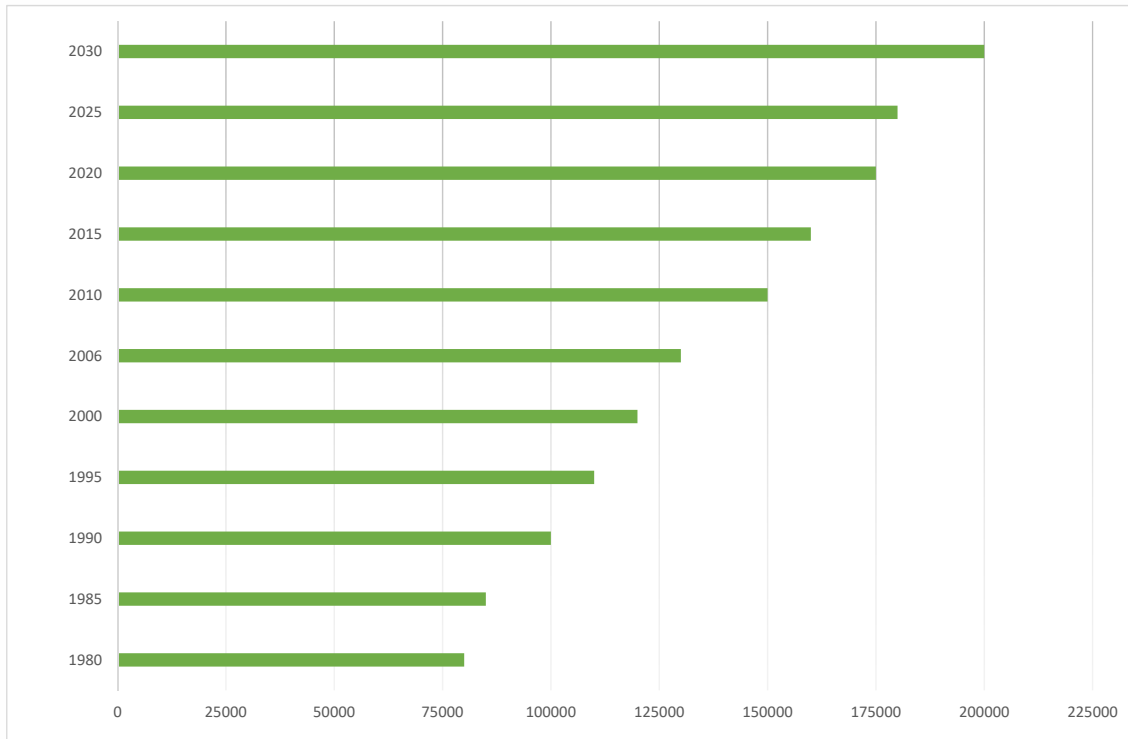
➤ Εξατομικευμένη Παραγωγή

- Διαφοροποίηση αξίας στη διαδικασία σχεδιασμού
- Επίτευξη αποτελεσματικότητας προϊόντων

➤ Βιώσιμη Παραγωγή

- Απαίτηση ολιστικής άποψης με περιεχόμενο όλα τα επίπεδα παραγωγής





## Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1980 έως το 2030

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 5

➤ **Ενεργειακή Απόδοση** είναι η χρήση λιγότερης ενέργειας για την εκτέλεση της ίδιας εργασίας ή για την παραγωγή του ίδιου αποτελέσματος.

- ❗ Αύξηση κατανάλωσης ενέργειας κατά 33% (2010 - 116.614 ZW έως 2030 – 198.654 ZW)
- ❗ Καταναλώνεται το 31% της πρωτογενούς ενέργειας από τον τομέα παραγωγής
- ❗ Αύξηση κατανάλωσης ενέργειας κατά 1,4% ετησίως στον βιομηχανικό τομέα

**Βασικός Δείκτης Απόδοσης** για τη βιομηχανία και τα συστήματα παραγωγής

### Ορισμός Προβλήματος:

Μόνο ένα μικρό κλάσμα της εισροής προσθέτει πραγματικά αξία στο τελικό προϊόν και περίπου 20-40% της ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι χωρίς προστιθέμενη αξία.



Μείωση κατανάλωσης ενέργειας για εξοικονόμηση κόστους και για φιλικότητα προς το περιβάλλον!

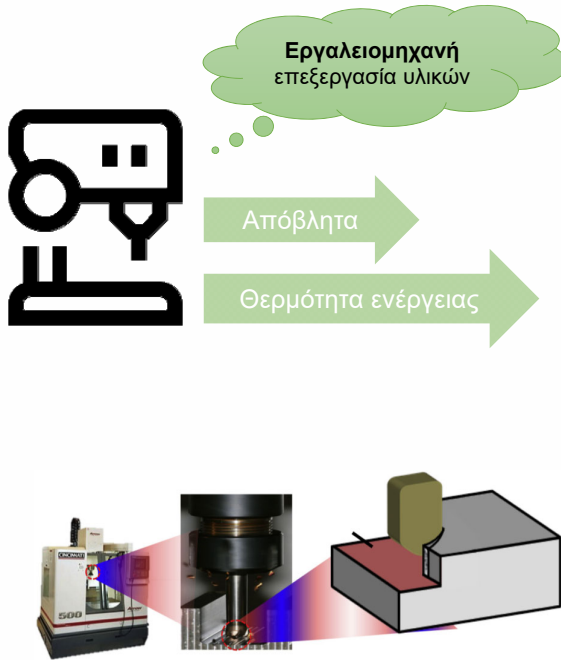
Περισσότερα με λιγότερη προσπάθεια!



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 6

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



Κριτήρια Ταξινόμησης Ενέργειας	
1.	Εργαλειομηχανή Ατρακτος Κατεργασία
2.	Εξέλιξη άμεσου και έμμεσου ενεργειακού κόστους
3.	Διαχωρισμός άμεσης κατανάλωσης ενέργειας
4.	Καταστάσεις λειτουργίας εργαλειομηχανών
5.	Υποσυστήματα εργαλειομηχανών – λειτουργικές μονάδες – συστήματα σύνθεσης
6.	Εξαρτήματα εργαλειομηχανών



## Κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 7

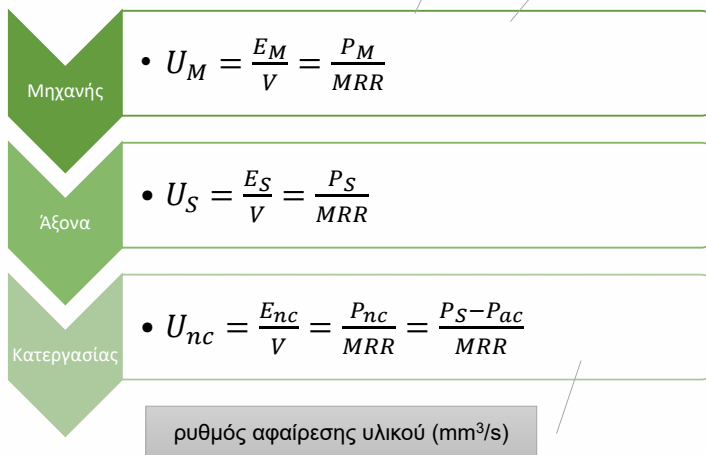
Η **ειδική ενέργεια** χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της καταναλισκόμενης ενέργειας για μια μηχανική κατεργασία, η οποία ορίζεται ως η κατανάλωση ενέργειας για την αφαίρεση ενός μοναδιαίου όγκου υλικού εργασίας.

$$U = \frac{E}{V} = \frac{P}{MRR} \quad (\text{J/mm}^3)$$

όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε (mm<sup>3</sup>)

ενέργεια της μηχανής, του άξονα και η καθαρή ενέργεια κοπής (J)

ισχύς μηχανής, ατράκτου, δικτύου κοπής και κοπής αέρα (W)



Στο φινιρίσμα σκληρυμένου χάλυβα εργαλείων AISI H13, τα  $U_M$ ,  $U_S$  και  $U_{nc}$  κυμαίνονται μεταξύ 100 και 555 J/mm<sup>3</sup>, 50-250 J/mm<sup>3</sup> και 4-12 J/mm<sup>3</sup>, αντίστοιχα.

Η ενεργειακή απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 1% και 6%.

Παρόλο που η ενεργειακή απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με υψηλότερο MRR πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν μπορεί να θυσιάζεται η ποιότητα του εξαρτήματος για χάρη της ενεργειακής απόδοσης.



## Ειδική Ενέργεια

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 8

Μια πλήρης διαδικασία μηχανουργικής κατεργασίας περιλαμβάνει:

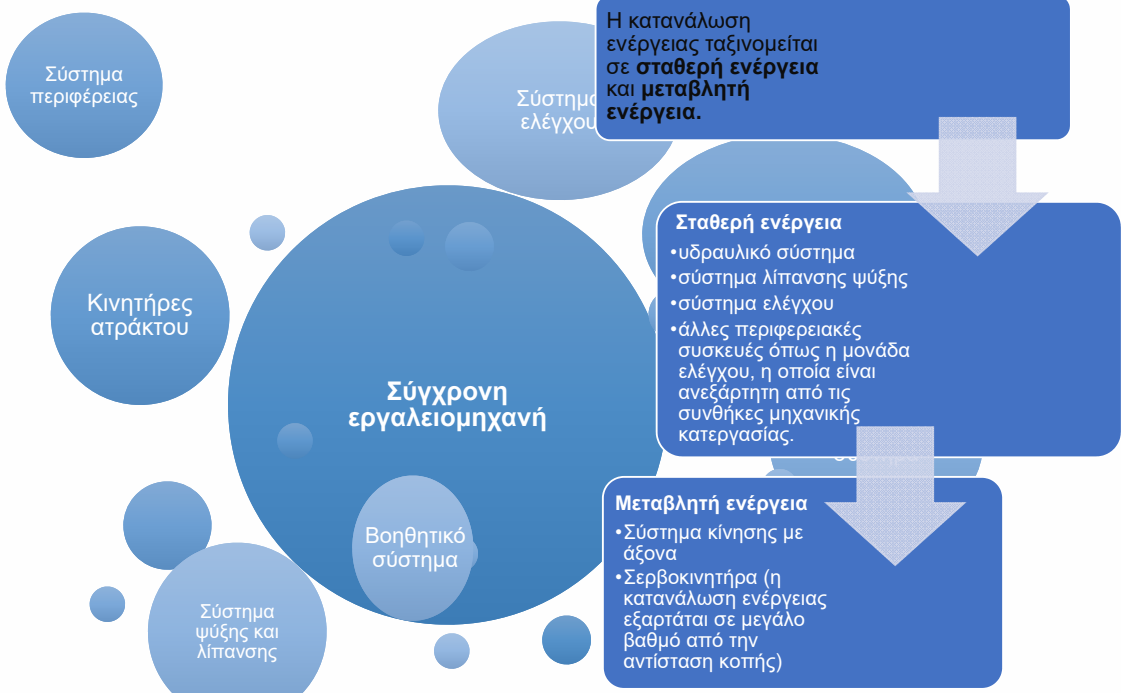
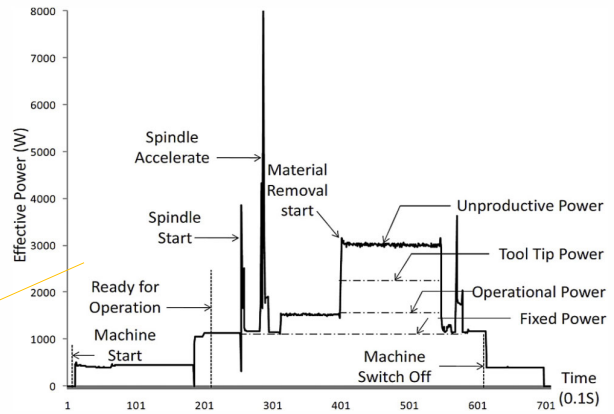
- προετοιμασία της μηχανής
- προετοιμασία της πρώτης ύλης (stock)
- σχεδιασμό των οδηγών και σφιγκτήρων (jigs and fixtures)
- συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση)
- εργαλεία κοπής
- στάδια συναρμολόγησης

Με βάση τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών κατεργασίας, το Cooperative Effort in Process Emission (CO<sub>2</sub>PE!) ταξινομεί τις εργαλειομηχανές σε δύο κατηγορίες:

1. "BasicState" (Βασική κατάσταση)
2. "CuttingState" (Κατάσταση κοπής).

Προτείνεται μια **μεταβατική κατάσταση** που ονομάζεται "ReadyState" (Κατάσταση ετοιμότητας) μεταξύ του "BasicState" και του "CuttingState".

Ηλεκτρικό προφίλ εργαλειομηχανών για μια ολοκληρωμένη διαδικασία κατεργασίας.



## Ενέργεια στο στάδιο κοπής

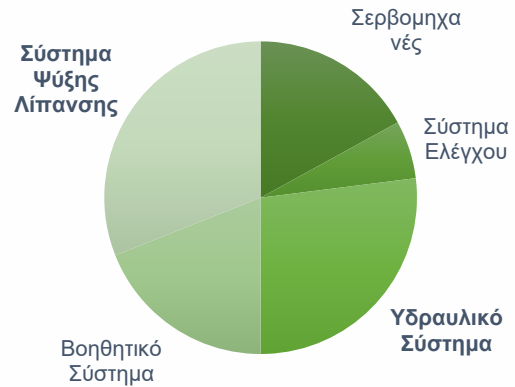
Ειδική σταθερή ενέργεια

Ειδική λειτουργική ενέργεια

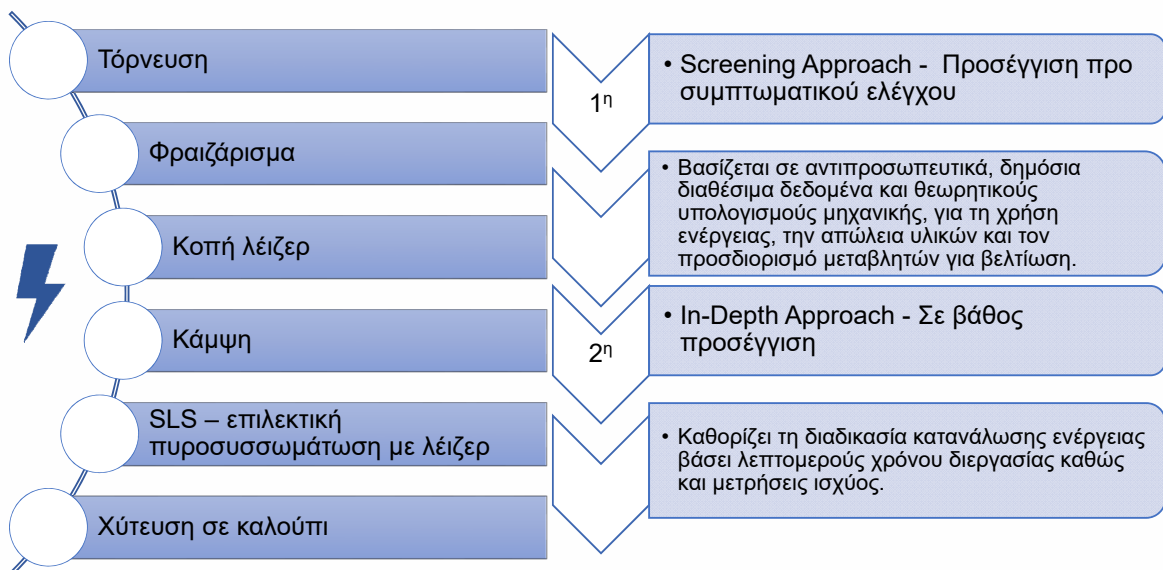
Συγκεκριμένη ενέργεια αιχμής εργαλείου

Ειδική μη παραγωγική ενέργεια

Μέση σταθερή κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών



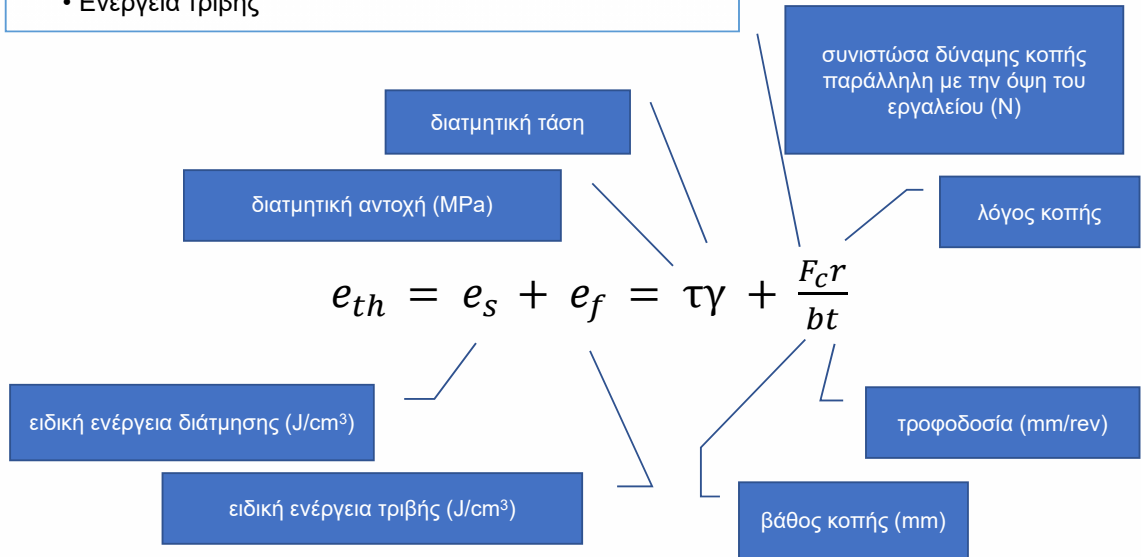
Η θεωρητική απαιτούμενη διαδικασία ενέργειας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως το **βέλτιστο κάτω όριο**, συγκρίνεται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από δύο προτεινόμενες μεθόδους για συστηματικό προσδιορισμό καταχωρήσεων βάσης δεδομένων LCI (Life Cycle Inventory – Απογραφή Κύκλου Ζωής) για διακριτές μηχανουργικές κατεργασίες μονάδων.



Πιο εκτεταμένες διαδικασίες αφαίρεσης υλικών στην παραγωγή

θεωρητική ενέργεια διαδικασίας αφαίρεσης ίση με την εργασία για την αφαίρεση του υλικού

- Ενέργεια διάτμησης
- Ενέργεια τριβής

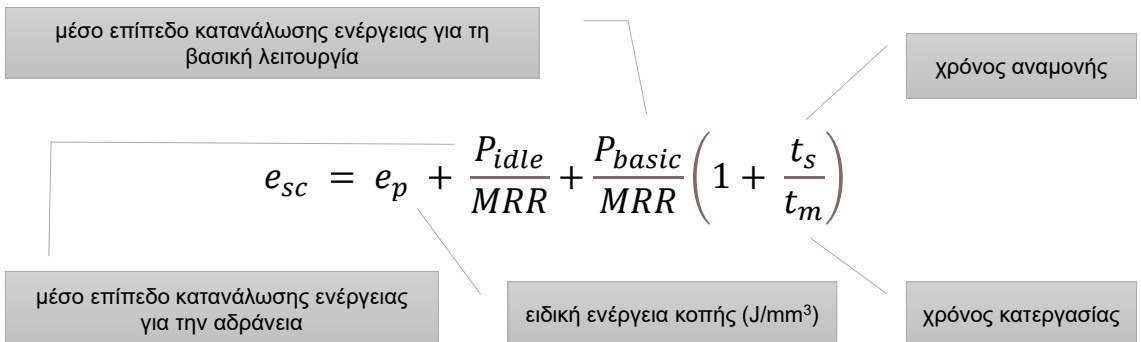


Η ενέργεια διάτμησης κατά την κοπή αντιστοιχεί στο 65-80% της συνολικής ειδικής ενέργειας και ορίζεται ως συνάρτηση της σκληρότητας Brinell (HB) του υλικού  $e_s$  [kJ/cm<sup>3</sup>] = (0,005-0,1) HB.

- θεωρητική ειδική ενέργεια ανθρακούχου χάλυβα με σκληρότητα Brinell 200 είναι **264 kJ/kg**

Υπολογισμός ειδικής κατανάλωσης ενέργειας  $e_{sc}$

- Ενέργεια κοπής
- Ενέργεια αδράνειας
- Βασική ενέργεια



### Ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας $e_{in}$

- Λαμβάνοντας την ενέργεια αναμονής (έως και 30% του συνολικού χρόνου παραγωγής που δαπανάται σε κατάσταση αναμονής)

συνολική ισχύς εργαλειομηχανών (W) κατά τη διάρκεια της κατεργασίας

συνολική ισχύς εργαλειομηχανών (W) κατά τη διάρκεια της κατάστασης αναμονής

$$e_{in} = \frac{P_m}{MRR} + \left( \frac{P_s}{MRR} \right) \left( \frac{t_s}{t_m} \right)$$

MRR: 230 cm<sup>3</sup>/min (τραχύτητα) έως 0.75cm<sup>3</sup>/min (φινίρισμα)

1<sup>η</sup> • Προσέγγιση προ συμπτωματικού ελέγχου

2<sup>η</sup> • Σε Βάθος προσέγγιση

Τόρνευση:  
0,48 - 47,71 MJ

Φραιζάρισμα:  
0,62-74,75 MJ

Τόρνευση:  
0,44 - 30,25 MJ

Φραιζάρισμα:  
0,47-39,84 MJ



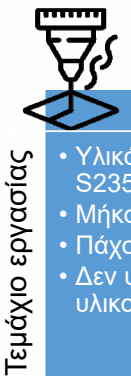
## Τόρνευση και Φραιζάρισμα

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 15



- Υλικό: Χάλυβας υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα S235JR
- Μήκος κοπής: 30m
- Πάχος φύλλου χάλυβα (m): 1mm
- Δεν υπάρχει απώλεια αγωγιμότητας ή αφαίρεση υλικού

θεωρητική ειδική ενέργεια είναι ο συνδυασμός της απαιτούμενης ενέργειας για να έρθει ο πυρήνας στη θερμοκρασία τήξης του και για τη μετάβαση φάσης

ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p = 0,7 \text{ kJ/kg K}$

θερμοκρασία τήξης  $T_m = 1808\text{K}$

$$e_{th} = m_{kerf} c_p (T_m - T_o) + m_{kerf} h_f$$

θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_o = 293\text{K}$

ενθαλπία σύντηξης  $h_f = 270 \text{ kJ/kg}$



## Κοπή λείζερ

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 16



Οι μηχανές κοπής με λέιζερ CO<sub>2</sub> ταξινομούνται κυρίως με βάση τη μέγιστη απόδοση της ισχύος του λέιζερ.



Χρήση μηχανών λέιζερ κοπής CO<sub>2</sub>, 2 έως 6kW

- Χρόνος αναμονής 15%
- Σχετική ισχύς από 40 έως 76 kWh
- Λειτουργία 1 ώρα
- Χωρητικότητα 100%

1<sup>η</sup> Προσέγγιση προ συμπτωματικού ελέγχου

2<sup>η</sup> Σε Βάθος προσέγγιση

0,62 - 74,75 MJ

0,47 - 39,84 MJ

Το αρχείο δεδομένων που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων Ecolnvent2.0 δείχνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας **93-145 MJ**.

2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



## Κοπή λέιζερ

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 17

Η θεωρητική αντοχή που απαιτείται για την κάμψη ενός φύλλου εξαρτάται από το σχήμα των οπών και των καλουπιών, την αντοχή του υλικού, το πάχος κάμψης και το μήκος του τεμαχίου εργασίας.

**Θεωρητική δύναμη κάμψης (N)**

$$F_{bending} = \frac{1.33TSwt^2}{D}$$

TS: αντοχή εφελκυσμού (MPa)  
W: μήκος κάμψης (mm)  
t: πάχος του τεμαχίου (mm)  
D: άνοιγμα του καλουπιού V (mm)  
α: γωνία κάμψης

**απαίτηση ενέργειας (J)**

$$E_{bending} = \frac{1.33TSwt^2}{[2\tan(a/2)]}$$

**e<sub>th</sub> = 14 kJ**

Σχηματισμός φρένων – υδραυλικά και ηλεκτροκίνητα φρένα πίεσης

- Υλικό: Ανοξειδωτο ασάλι
- Κάμψη: 100 τόνων ή 1000kN
- Πάχος φύλλου: 6mm
- Μήκος κάμψης: 1485 mm
- V-die: 48 mm
- Γωνία κάμψης: 1208
- Χρόνος κάμψης: 8 δευτ.
- Χωρίς χρόνο αναμονής

1<sup>η</sup> Προσέγγιση προ συμπτωματικού ελέγχου

57 MJ

2<sup>η</sup> Σε Βάθος προσέγγιση

56 - 217 MJ

Επί του παρόντος, οι διαδικασίες κάμψης αέρα δεν καλύπτονται στη βάση δεδομένων Ecolnvent 2.0.

2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



## Κάμψη

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



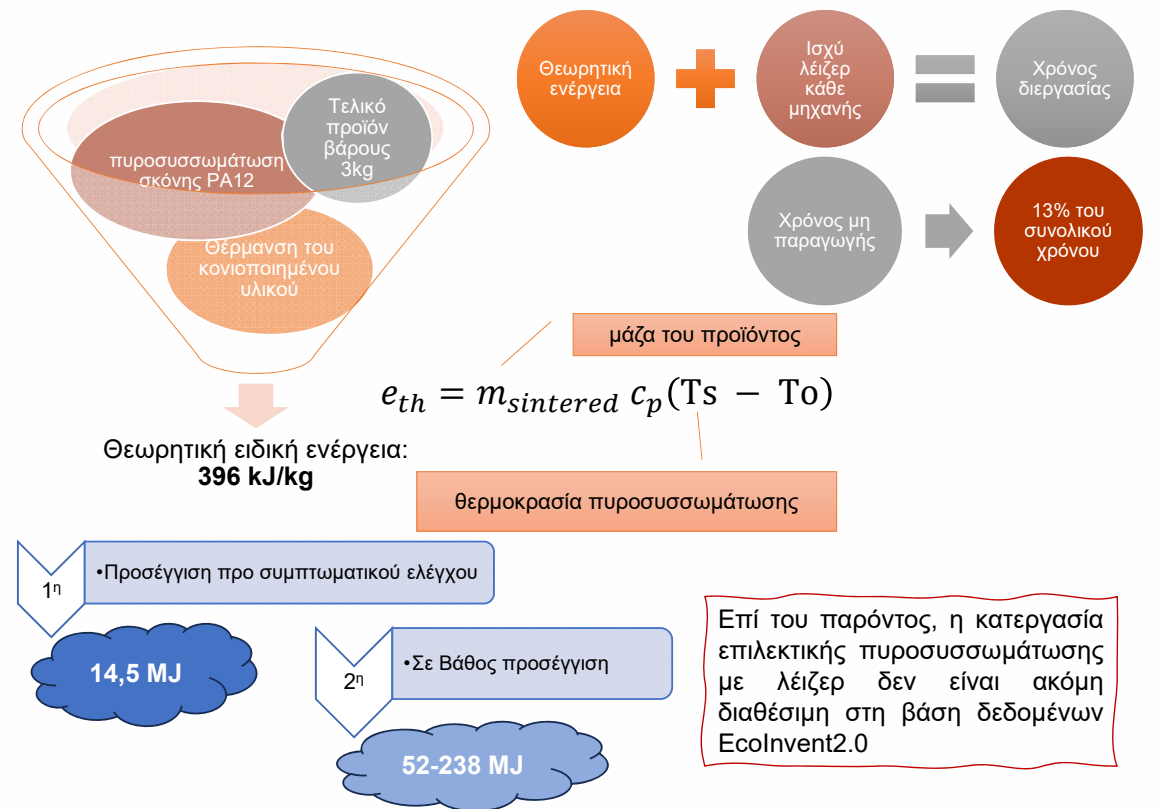
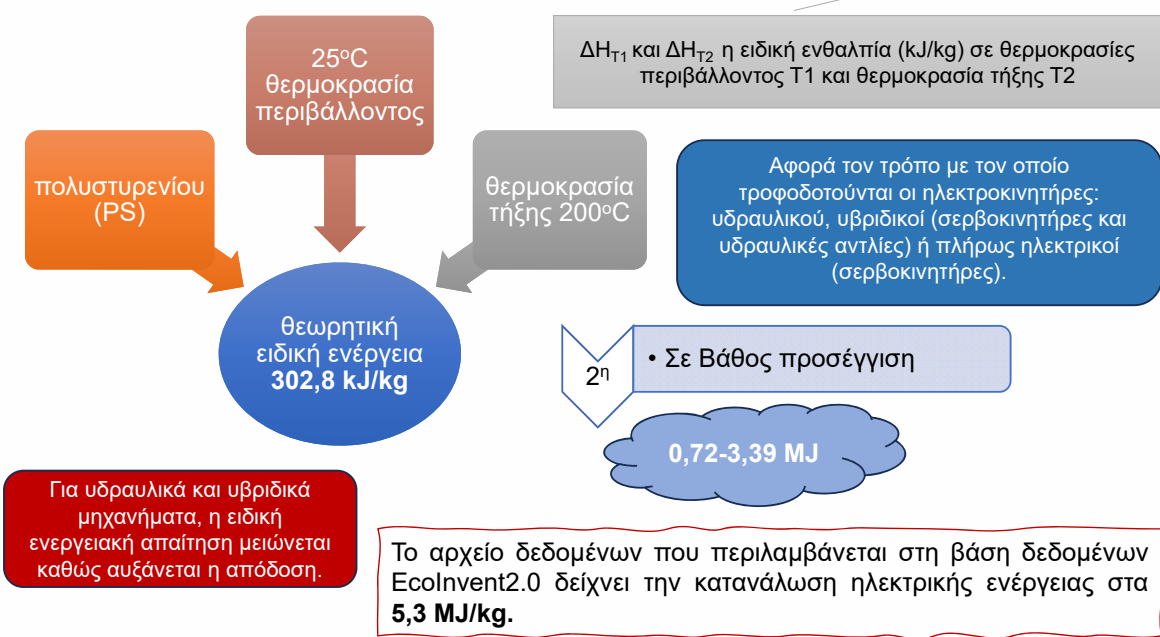
School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 18

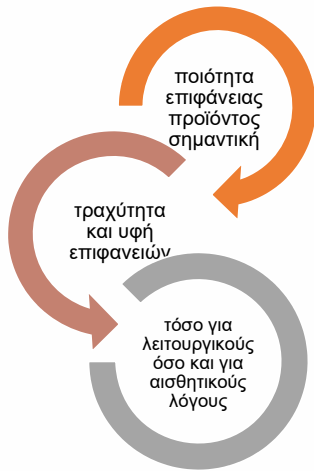
**Διαδικασίες επεξεργασίας πολυμερών**

- χύτευση με έγχυση

$$e_{th} = \Delta H_{T1} - \Delta H_{T2}$$



## Συσχέτιση της κατανάλωσης ενέργειας με την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος



### Τραχιές επιφάνειες

- αντανακλούν λιγότερο φως, διευκολύνει την προσκόλληση οποιασδήποτε συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια και τη δημιουργία ισχυρότερου δεσμού
- αυξημένη τριβή απαραίτητη σε εργασίες όπως σε χειρολαβές εργαλείων ή φρένα

### Λείες επιφάνειες

- επιθυμητές για εξαρτήματα που απαιτούν χαμηλή τριβή ή για διηλεκτρικές επαφές
- αισθητικά, σημαντικό ρόλο στην ελκυστικότητα ενός προϊόντος
- οι λείες/γυαλιστερές επιφάνειες ενισχύουν, το χαρακτήρα πολυτέλειας ή καθαρότητας, ενώ οι πιο θαμπές (ματ) επιφάνειες αποπνέουν ένα αίσθημα παλαιότητας



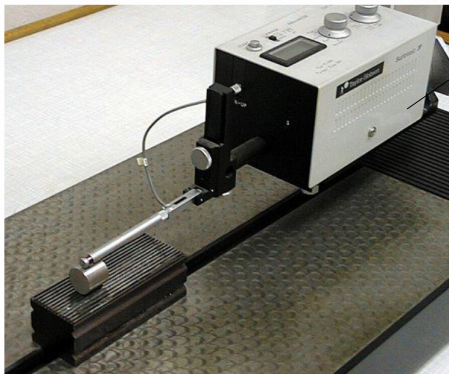
## Χαρακτηρισμός ποιότητας επιφανειών

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

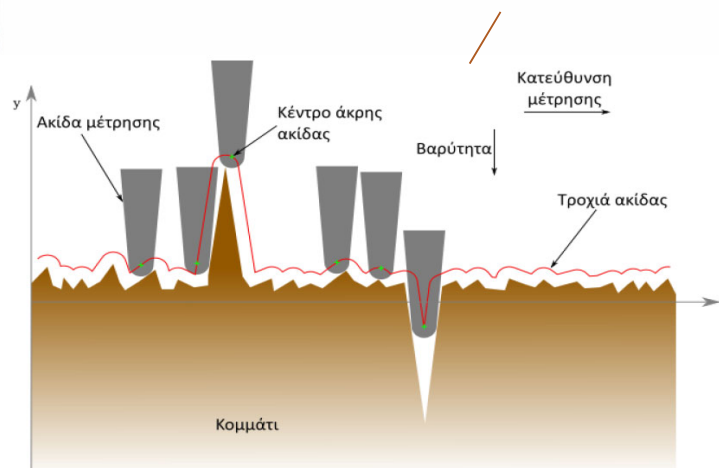
Χρυσάνθη Τασιώλα 21



Ηλεκτρονικό τραχύμετρο

Σχηματική αναπαράσταση της πορείας της ακίδας ενός τραχύμετρου κατά τη μέτρηση μιας επιφάνειας

- ακίδα/βελόνα από διαμάντι
  - κωνικό σχήμα
  - ακτίνα περίπου 0,005 mm στο άκρο της
- Καταγραφή και μέτρηση κάθετων κινήσεων βελόνας κατά το πέρασμά της μέσα από μια επιφάνεια.



## Μέτρηση χαρακτηριστικών επιφάνειας

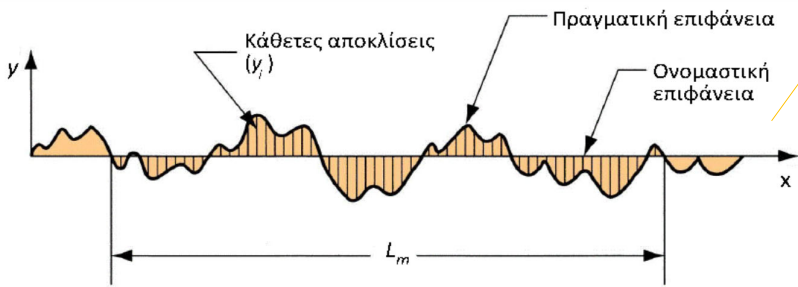
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 22

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της ποιότητας μιας επιφάνειας είναι από τη τραχύτητά της, η οποία είναι η μέση τιμή των σχετικά μικρών κάθετων αποκλίσεων από την ονομαστική/ιδεατή γραμμή της επιφάνειας για ένα συγκεκριμένο μήκος.



Μετρούμενες κάθετες αποκλίσεις (y) από την τιμή αναφοράς για μια επιφάνεια, κατά την κατεύθυνση της ακίδας (x).

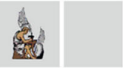
κάθετη απόκλιση στο σημείο x του διαστήματος μέτρησης

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y(x)| dx$$

μέση τραχύτητα

μήκος διαστήματος μέτρησης

Πρακτικά, το μέγεθος των μετρούμενων αποκλίσεων (y) είναι συνήθως αρκετά μικρό (μικρότερο του 1 mm) και έτσι η μέση τραχύτητα εκφράζεται συνήθως σε μικρόμετρα ή αλλιώς σε μικρά ( $\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ).



- **Ενεργειακά μοντέλα εργαλειομηχανών**

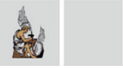
  - η κατανάλωση ενέργειας από τις εργαλειομηχανές δεν είναι σταθερή
  - η κατανάλωση ενέργειας από τον κινητήρα ατράκτου είναι υψηλή και αποτελεί μεγάλο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για μικρότερες εργαλειομηχανές
- **Ενεργειακά μοντέλα κοπής**

  - η ενέργεια κοπής σε επίπεδο κατεργασίας αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας
  - αφορά το σχηματισμό σπιν και τη δημιουργία νέας επιφάνειας
  - επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου
- **Ενεργειακά μοντέλα με βάση την κατάσταση**

  - τα εξαρτήματα μπορούν να υπάρχουν σε τρεις μορφές -on, off ή hold- σε κάθε κατάσταση λειτουργίας
  - το Cooperative Effort in Process Emission (CO<sub>2</sub>PE!) εξετάζει δύο καταστάσεις λειτουργίας: τη βασική κατάσταση και την κατάσταση κοπής
- **Ενεργειακά μοντέλα βασισμένα σε εξαρτήματα**

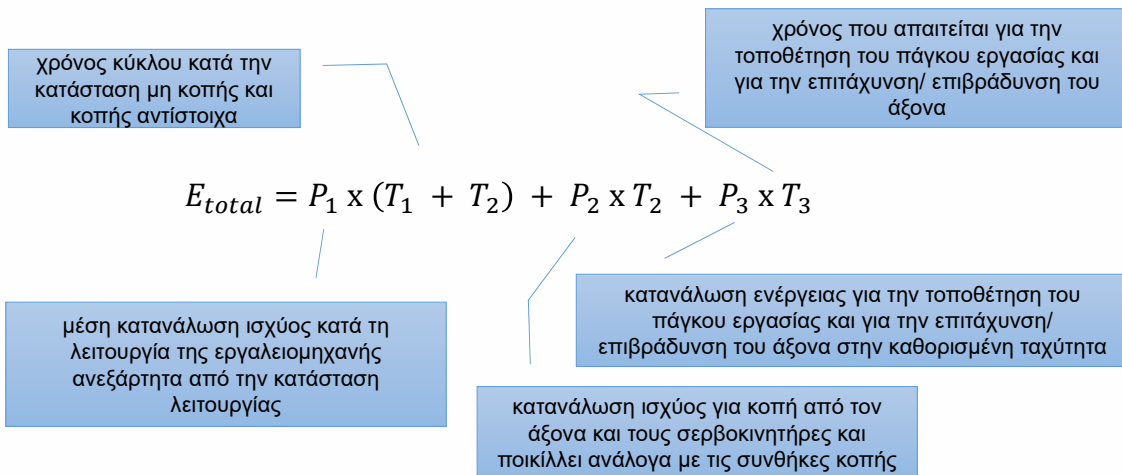
  - ορίζονται ως οι μηχανικές, ηλεκτρικές, υδραυλικές ή πνευματικές συσκευές μιας εργαλειομηχανής ή ο συνδυασμός τους όπως οι μονάδες ψύξης, μονάδες ατράκτου, άξονες μετάδοσης κίνησης, ελεγκτές
- **Ενεργειακά μοντέλα με βάση το Therblig**

  - προσέγγιση μοντελοποίησης κατανάλωσης ενέργειας βασισμένη σε 18 μικροκινήσεις στην εργαλειομηχανή
  - μέθοδο Therblig embedded Value Stream Mapping για τη χαρτογράφηση της κατανάλωσης ενέργειας από τη διαδικασία μηχανικής κατεργασίας σε μικροεπίπεδο. Παρέχει καλύτερη ενεργειακή διαφάνεια και δείχνει ξεκάθαρα τη σπατάλη ενέργειας κατά τη μηχανική κατεργασία



➤ **Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε διαφορετικά στάδια επεξεργασίας**

1) Μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας σε κατάσταση κοπής και μη κοπής

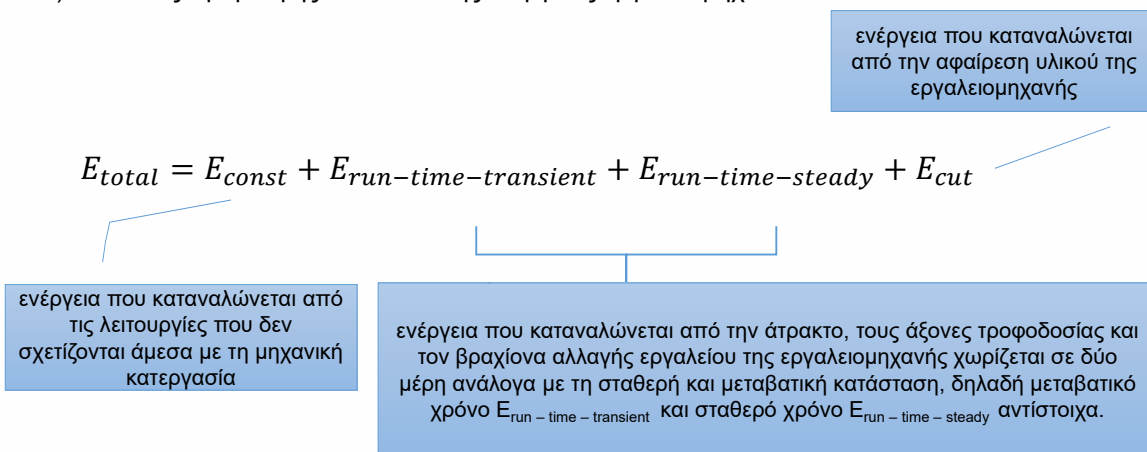


2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



2) Μέθοδος πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών



Κατά τη λειτουργία μη κοπής, το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ισχύος προκύπτει από την **εκκίνηση του μηχανήματος (45%)**, την **ισχύ του άξονα (15%)**, τη **θέση του σερβομηχανισμού (10%)**, τις **υδραυλικές αντλίες (8,9%)** και τις **αντλίες ψυκτικού υγρού (8,2%)**. Προφανώς, ο χρόνος μη κοπής θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατό συντομότερα, προκειμένου να βελτιωθεί η χρήση εργαλειομηχανών και η ενεργειακή απόδοση.

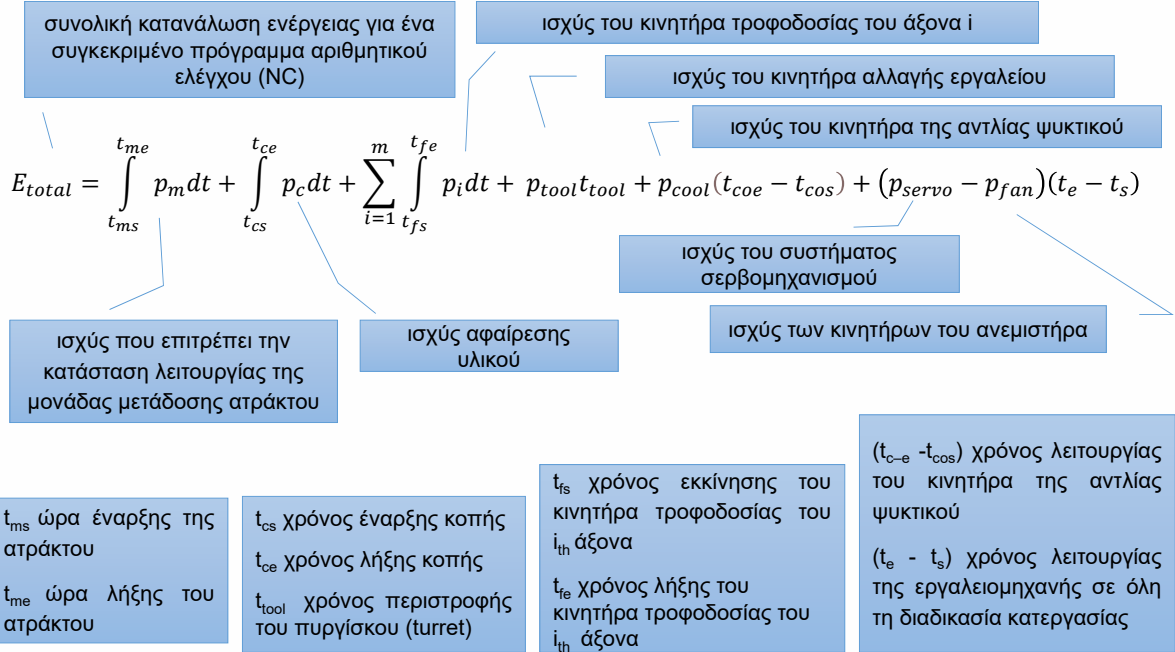
2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



➤ **Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε εξαρτήματα εργαλειομηχανών**

Μέθοδος εκτίμησης κατανάλωσης ενέργειας στη μηχανουργική κατεργασία



2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



Ενεργειακή μοντελοποίηση για τη διαδικασία μιας μηχανουργικής κατεργασίας

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

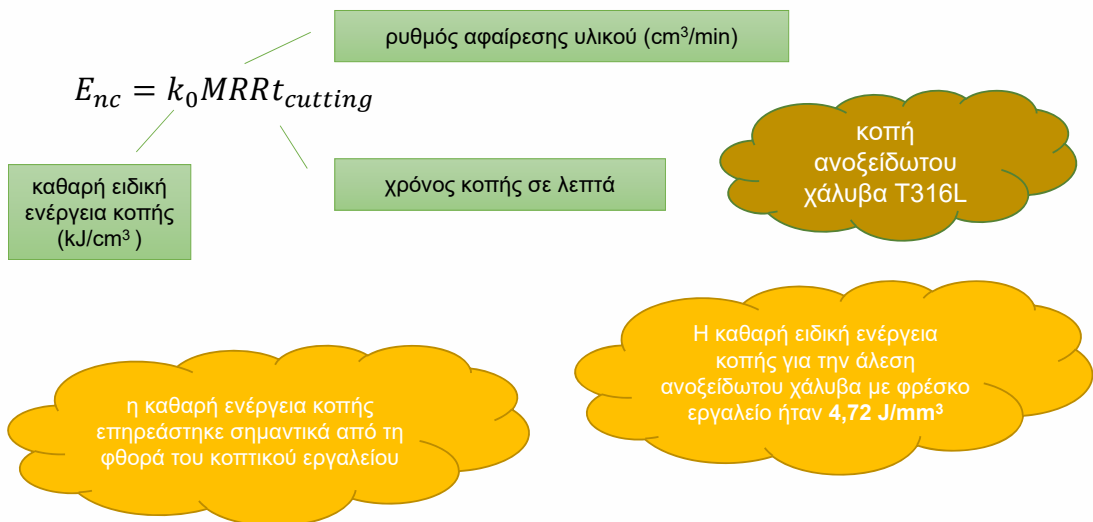


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 27

➤ **Καθαρή κοπή ειδικής ενέργειας**

Σε επίπεδο κατεργασίας, η ειδική ενέργεια ορίζεται ως καθαρή ειδική ενέργεια κοπής και λαμβάνει υπόψη μόνο την ενέργεια που καταναλώνεται από την πραγματική αφαίρεση υλικού.



2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



Ενεργειακή μοντελοποίηση κατά την κοπή

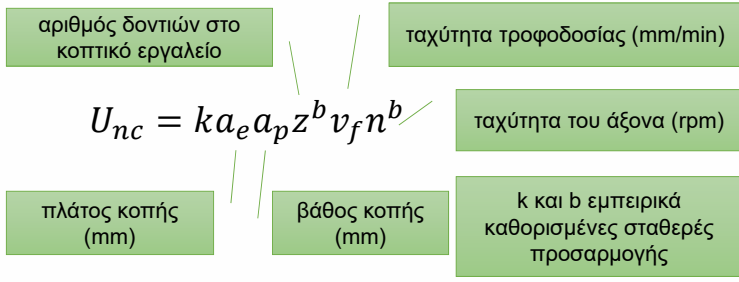
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 28

Εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης καθαρής ειδικής ενέργειας κοπής χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους κοπής.



Τα παρακάτω μοντέλα μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης. Απαιτείται μεγάλος αριθμός πειραμάτων για τον προσδιορισμό των εμπειρικών συντελεστών.

Η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής να μπορεί να υπολογιστεί με τη μετρούμενη διαφορά ισχύος της ατράκτου κατά την κοπή και την κοπή με αέρα.



Μοντέλο παλινδρόμησης ισχύος για να προβλέψει την καθαρή ειδική ενέργεια κοπής με παραμέτρους διεργασίας ( $a_p, a_e, v, f_z$ ) και τη φθορά του εργαλείου ( $w$ ):

$$U_{nc} = \frac{P_s - P_{ac}}{MRR}$$

$$U_{nc} = a_0 a_p a_e v^{a_3} f_z (1 + w)^{a_5}$$

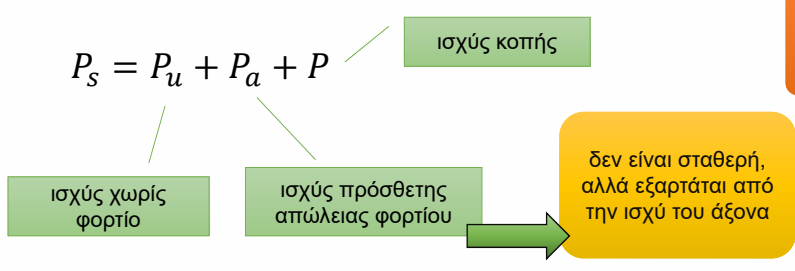
Τόσο για αιχμηρά όσο και για φθαρμένα εργαλεία, η ακρίβεια πρόβλεψης είναι κοντά στο 90%.

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  και  $a_5$  εμπειρικοί συντελεστές

2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων

➤ **Ειδική ενέργεια ατράκτου**  
Μοντέλο ισχύος της μονάδας ατράκτου.



Η απόδοση μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από το φόρτο εργασίας των εργαλειομηχανών.

Μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας άξονα.

$$E_s = P_u t_M + \int_0^{t_M} P_a(t) dt + \int_0^{t_M} P_c(t) dt$$

Μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας για τη μονάδα άξονα, με βάση την εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοση του συστήματος ατράκτου.

$$U_s = \frac{P_c}{60\eta MRR}$$

ενεργειακή απόδοση της ατράκτου που κυμαίνεται μεταξύ 0,15 και 0,85 με τις δοκιμασμένες πειραματικές συνθήκες

2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων

➤ **Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών**

- ❖ Βασισμένο στην ενέργεια της μηχανής

Ειδική κατανάλωση ενέργειας της μηχανής στο φραιζάρισμα

$$e_{cut} = k \frac{1}{MRR} + b$$

ειδική ενέργεια σε σταθερή κατάσταση

Σταθερά με μονάδες ισχύος

- ❖ Βελτιωμένο εμπειρικό μοντέλο SEC ως συνάρτηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και της ταχύτητας του άξονα

ισχύς αναμονής

ταχύτητα περιστροφής άξονα

$$SEC = \frac{P_{standby} + k_1 n + b + k_0 MRR}{MRR} = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{1}{MRR}$$

$k_0, k_1$  και  $k_2$  πειραματικοί συντελεστές

- ❖ Βασισμένο σε μετρήσεις ισχύος στη μηχανή τόνρευσης υπό συνθήκες ξηρής κοπής

ειδική ενέργεια μηχανής

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR}$$

$C_0, C_1$  εμπειρικοί συντελεστές

$$E_M = SEC * Q$$

όγκος υλικών που θα πρέπει να αφαιρεθούν

ακρίβεια μεγαλύτερη από 90%



➤ **Μέθοδοι πρόβλεψης βασισμένες σε νευρωνικό δίκτυο**

- ❖ Μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας τόννου βασισμένο σε δίκτυο BP.



ακρίβεια πρόβλεψης μοντέλου πάνω από 92%

- ❖ Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών για χάλυβα AISI 4340 υψηλής ταχύτητας σκληρής στροφής.

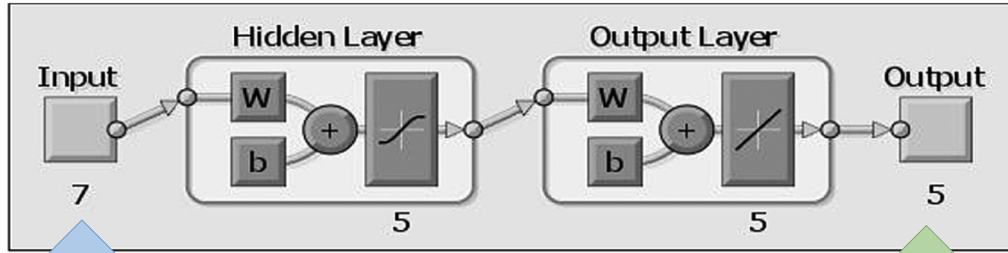


απόκλιση περίπου 2,6% από τις πραγματικές τιμές





- ❖ Μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στην κατανάλωση ισχύος σε κατεργασίες φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας σε σφαιρίδια σε χάλυβα AISI H13.



- ταχύτητα ατράκτου
- ταχύτητα τροφοδοσίας
- δόντι τροφοδοσίας
- αξονικό βάθος κοπής
- ακτινικό βάθος κοπής
- ακτίνα εργαλείου
- συνθήκες ψυκτικού υγρού που αντιπροσωπεύονται από 0 ή 1

Η τιμή της παλινδρόμησης R μετρά τη συσχέτιση μεταξύ των εξόδων και των μετρούμενων δεδομένων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το R πλησιάζει το 100% και η ακρίβεια πρόβλεψης του μοντέλου είναι κοντά στο 98%.

Το μοντέλο επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους της διαδικασίας κοπής.

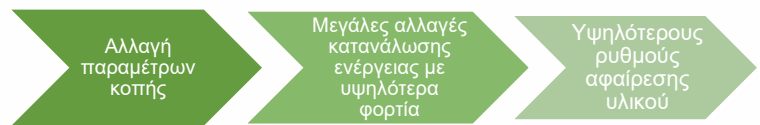
- κατανάλωση ισχύος ατράκτου
- άξονα X
- άξονα Y
- άξονα Z
- συνολική κατανάλωση ισχύος εργαλειομηχανών στην κοπή



- ✓ Βελτιστοποίηση παραμέτρων διαδικασίας



Εξάρτημα πολλαπλών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται στα πειράματα κατανάλωσης ενέργειας



Για ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και καλύτερη ακεραιότητα της επιφάνειας, βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι της διαδικασίας για ξηρή κατεργασία κετόνης πολυαιθερικού αιθέρα ενισχυμένο με 30% ίνες άνθρακα.

Τα αποτελέσματα του πειράματος αποκάλυψαν ότι η **ταχύτητα κοπής 100m/min**, ο **ρυθμός τροφοδοσίας 0,05 mm/rev** και το **βάθος κοπής 0,25 mm** είναι ο **βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων κοπής**.

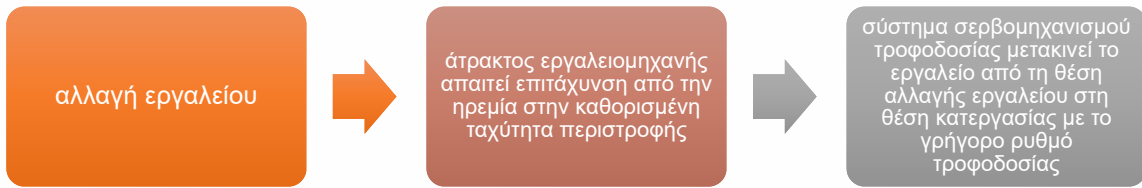
Το **βάθος κοπής** είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας, ακολουθούμενο από την ταχύτητα κοπής και το ρυθμό τροφοδοσίας.



Μείωση κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να θυσιάζεται η ακεραιότητα της επιφάνειας



## ✓ Βελτιστοποίηση επιτάχυνσης-επιβράδυνσης



Συγχρονίζοντας την επιτάχυνση της ατράκτου με την ταχύτητα ταχείας τροφοδοσίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση περίπου 10% στην κατανάλωση ενέργειας.

Μια κατάλληλη προσέγγιση επιτάχυνσης-επιβράδυνσης μπορεί να μειώσει τον χρόνο μη κοπής και την κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αναμονής.

Οι προσεγγίσεις γραμμικής επιτάχυνσης-επιβράδυνσης μπορεί να προκαλέσουν κραδασμούς στις εργαλειομηχανές και να επηρεάσουν τη σταθερότητα και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Επομένως, η προσέγγιση επιτάχυνσης επιβράδυνσης πρέπει να βελτιστοποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, την ποιότητα κοπής και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



## Στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 35

## ✓ Βελτιστοποίηση ενεργειακών εξαρτημάτων εργαλειομηχανών

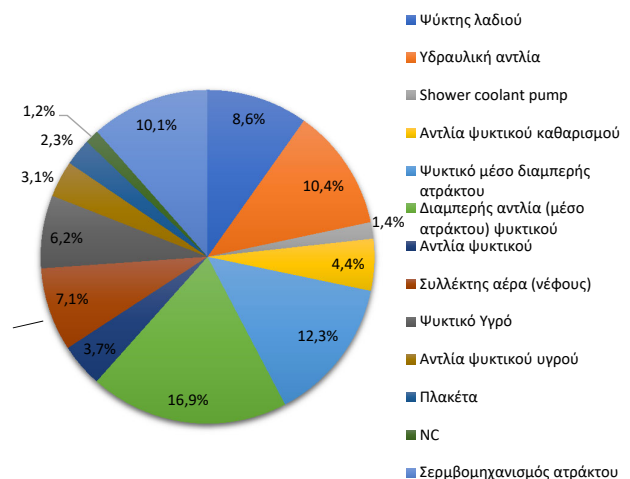
Χρήση αποδοτικών κινούμενων εξαρτημάτων με υψηλή απόδοση μετάδοσης, όπως ακριβείς σφαιρικές βίδες και γρανάζια.

Βελτιστοποίηση του κινητήρα του άξονα και του μηχανικού συστήματος μετάδοσης είναι σημαντική για τη μείωση της πρόσθετης απώλειας φορτίου και τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

## ✓ Βελτίωση της απόδοσης του περιφερειακού εξοπλισμού

Τα υδραυλικά συστήματα και τα συστήματα ψύξης και λίπανσης θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν έως και 58% της σταθερής κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι η εργαλειομηχανή είναι έτοιμη.

ο εξοπλισμός που σχετίζεται με το ψυκτικό καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια, περίπου 54%, μεταξύ του περιφερειακού εξοπλισμού, ακολουθούμενος από την υδραυλική αντλία, το ψυκτικό υγρό και το περιφερειακό που σχετίζεται με το σερβομηχανισμό της ατράκτου.



2023

Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε Μηχανουργικές Κατεργασίες σε σχέση με την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων



## Στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας

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



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Χρυσάνθη Τασιώλα 36

- ✓ Βελτίωση της βιωσιμότητας
  - 1) Ανάπτυξη δείκτη κατανάλωσης ενέργειας
  - 2) Ενεργειακή μοντελοποίηση έως μικροεπίπεδο
  - 3) Επιλογή στόχων βελτιστοποίησης από ενέργεια και περιβαλλοντικές προοπτικές
- ✓ Αναλύσεις δεδομένων και εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης
  - 1) Αναλύσεις ενεργειακών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
  - 2) Χρήση ενεργειακών δεδομένων για παρακολούθηση κατάστασης και προγνωστική συντήρηση
- ✓ Ενοποίηση με εφαρμογές 4<sup>ης</sup> βιομηχανίας

