



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΤΑΡΥΜΑ

ΠΑΤΡΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΜΑ:

ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ  
ΤΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

ΜΟΥΡΤΖΙΑΠΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΕΙΣΗΓΗΣΗ:

κ. Κακιδάκης Παυλιώτης

ΠΑΤΡΑ 2007

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1. Σχεδιασμός & εκπαίδευση σε παραγωγικές διαδικασίες.....	2
1.2. Σχεδιασμός & εκπαίδευση σε μηχανουργικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού.....	6
<b>2. Υλοποίηση του Μηχανουργείου του Μέλλοντος.....</b>	<b>9</b>
2.1. Υλοποίηση του Μηχανουργείου του Μέλλοντος.....	10
2.2. Δομή του προγράμματος.....	12
2.2.1. Γενική περιγραφή.....	12
2.2.2. Γενικός χειριστής εφαρμογής.....	13
2.2.3. Βιβλιοθήκες συστήματος.....	14
2.2.4. Χειριστές εργαλειομηχανών.....	14
2.2.5. Πυρήνες υπολογισμών.....	15
<b>3. Πιλοτικές εφαρμογές.....</b>	<b>19</b>
3.1. Διεργασία φρεζαρίσματος.....	20
3.1.1. Σενάριο πιλοτικής εφαρμογής.....	20
3.1.2. Εκτέλεση εικονικής διεργασίας.....	20
3.1.3. Αποτελέσματα.....	23
3.2. Διεργασία τρνιρίσματος.....	26
3.2.1. Σενάριο πιλοτικής εφαρμογής.....	26
3.2.2. Εκτέλεση εικονικής διεργασίας.....	26
3.2.3. Αποτελέσματα.....	28
<b>4. Συζήτηση.....</b>	<b>30</b>
4.1. Πλεονεκτήματα & περιορισμοί της νέας προσέγγισης.....	31
4.2. Πεδία εφαρμογής των ερευνητικών αποτελεσμάτων.....	33
<b>5. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>34</b>

# 1. Εισαγωγή

---

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μία σύντομη εισαγωγή στο αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Κατ' αρχήν παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα προβλήματα της σημερινής βιομηχανικής πρακτικής, τα οποία αποτέλεσαν την αφορμή για τη σύλληψη της ιδέας του Μηχανουργείου του Μέλλοντος. Η παρουσίαση αυτή περιλαμβάνει μία γενική αναφορά στις διαδικασίες σχεδιασμού και εκπαίδευσης παραγωγικών εργασιών, για να εστιάσει στη συνέχεια στο συγκεκριμένο τομέα των παραγωγικών διαδικασιών που απασχολούν την παρούσα εργασία, δηλαδή στις μηχανουργικές διεργασίες.

## 1.1. Σχεδιασμός & εκπαίδευση σε παραγωγικές διαδικασίες

Μία παραγωγική διαδικασία ορίζεται ως η χρήση ενός ή περισσότερων φυσικών μηχανισμών για το μετασχηματισμό του σχήματος και/ή της μορφής ενός υλικού (Chryssolouris 1992). Ακολουθώντας τις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις, οι παραγωγικές διαδικασίες έχουν σήμερα αυτοματοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό. Παρ' όλα αυτά, η δυνατότητα κατασκευής και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός πλήθους προϊόντων στηρίζονται ακόμη κατά ένα μεγάλο ποσοστό στην ανθρώπινη παρέμβαση κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Οι χειρωνακτικές εργασίες που περιλαμβάνονται στις διαδικασίες αυτές είναι πολύ σημαντικές, καθώς επηρεάζουν τη δυνατότητα, τον απαιτούμενο χρόνο και το κόστος υλοποίησης των διαδικασιών αυτών, καθώς και την ασφάλεια του προσωπικού που θα τις πραγματοποιήσει. Ο ανθρώπινος παράγοντας επηρεάζει τα χαρακτηριστικά αυτά σε δύο κυρίως φάσεις της ανάπτυξης ενός προϊόντος: στη φάση σχεδιασμού της παραγωγικής διαδικασίας και στη φάση εκπαίδευσης για την πραγματοποίηση της διαδικασίας (Εικ. 1).

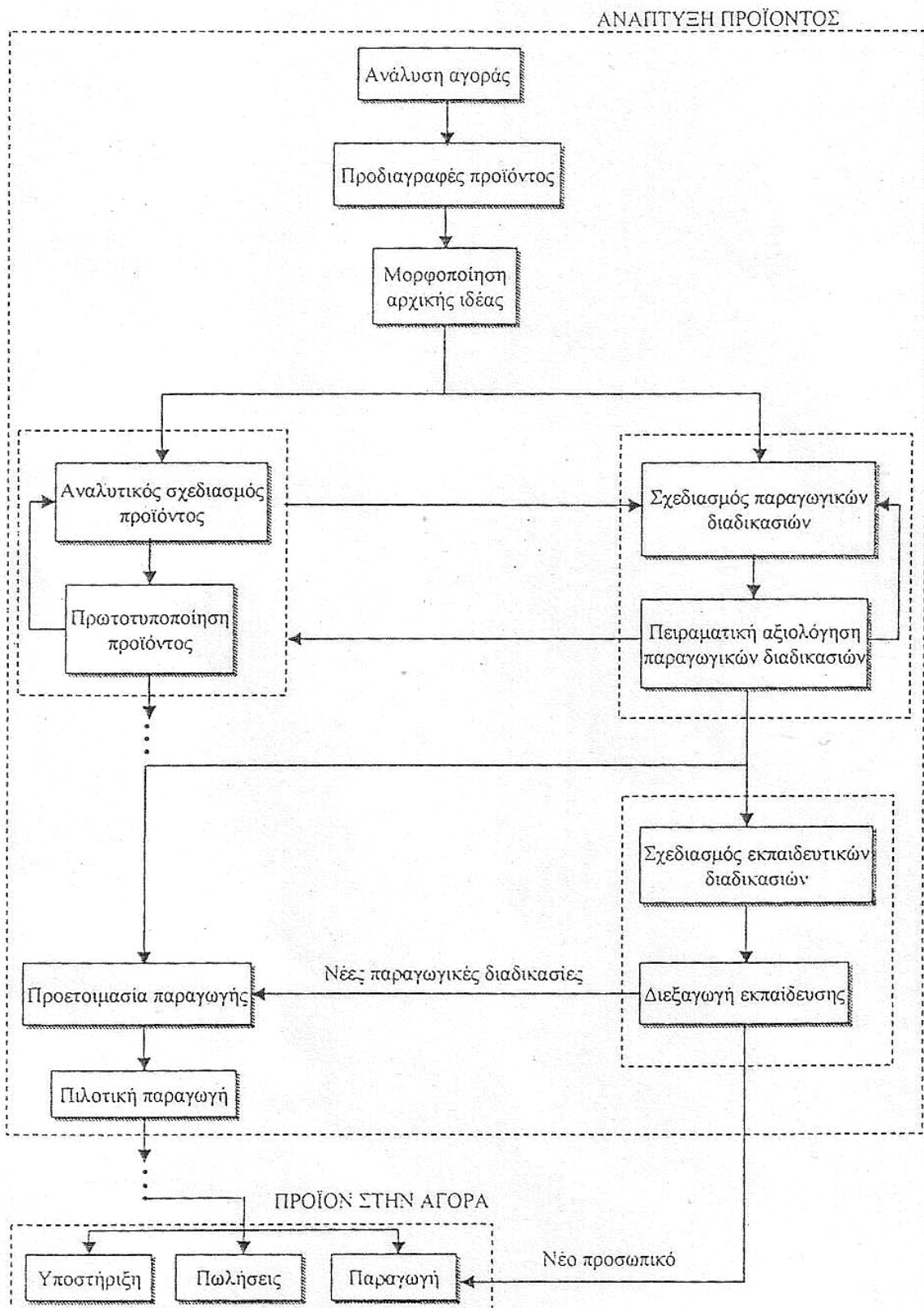
Όπως φαίνεται στην Εικ. 1, και σύμφωνα με τις σύγχρονες προσεγγίσεις στην ανάπτυξη βιομηχανικών προϊόντων, ο *σχεδιασμός των παραγωγικών διεργασιών* λαμβάνει χώρα παράλληλα με το σχεδιασμό του ίδιου του προϊόντος. Η ταυτόχρονη αυτή προσέγγιση καθιστά δυνατή μία ανταλλαγή πληροφοριών, η οποία επιτρέπει από τα πρώιμα ακόμα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος:

- να λαμβάνονται υπ' όψη κατά το σχεδιασμό του προϊόντος οι ιδιαιτερότητες και οι περιορισμοί των υφιστάμενων πόρων και συνθηκών παραγωγής και
- να λαμβάνονται υπ' όψη κατά το σχεδιασμό των παραγωγικών διαδικασιών τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του προϊόντος.

Κατά το σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας καθορίζεται η αλληλουχία των εργασιών που την αποτελούν, επιλέγονται οι παράμετροι των επιμέρους αυτών εργασιών, καθώς και οι παραγωγικοί πόροι (εργαλεία, μηχανές, ιδιοσκευές κτλ.) που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της διαδικασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού παραγωγικών διαδικασιών, η πολυπλοκότητα των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα είναι τέτοια, ώστε:

- το πλήθος των μεταβλητών απόφασης των οποίων οι τιμές καθορίζονται ή επιλέγονται είναι μεγάλο και
- η αναλυτική συσχέτιση των μεταβλητών αυτών με τα αποτελέσματα των διαδικασιών είναι πολύ δύσκολη ή αδύνατη.

Οι δύο αυτοί παράγοντες καθιστούν επιτακτική τη χρήση μιας προσέγγισης δοκιμής και λάθους (trial and error approach).



**Εικ. 1:** Ανάπτυξη προϊόντος

Η προσέγγιση δοκιμής και λάθους προϋποθέτει την πειραματική αξιολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας για την εκτίμηση των διάφορων εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων. Στην αξιολόγηση αυτή ελέγχεται η επίδραση τεχνικών και ανθρώπινων παραγόντων στο χρόνο και το κόστος υλοποίησης, καθώς και στην ποιότητα του αποτελέσματος της παραγωγικής διαδικασίας. Δεδομένα πιθανών προβλημάτων που διαπιστώνονται κατά την αξιολόγηση ανατροφοδοτούν τη διαδικασία σχεδιασμού προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στις παραμέτρους της παραγωγικής διαδικασίας, ή και του ίδιου του προϊόντος, και η πειραματική επαλήθευση επαναλαμβάνεται. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία ολοκληρώνεται όταν ικανοποιηθούν όλοι οι στόχοι και τα κριτήρια ενός αποδεκτού σχεδιασμού.

Στη σημερινή βιομηχανική πρακτική, η αξιολόγηση γίνεται κυρίως με τη φυσική εκτέλεση της παραγωγικής διαδικασίας (physical process verification). Για την πειραματική διεξαγωγή της διαδικασίας κάτω από φυσικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η χρήση κάποιων πρώτων υλών ή πρωτότυπων υποπροϊόντων, η απασχόληση παραγωγικών πόρων και η συμμετοχή εργαζομένων. Η αξιολόγηση των σχεδιαζόμενων παραγωγικών διαδικασιών υπό αυτές τις συνθήκες:

- αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο ανάπτυξης του προϊόντος, καθώς η προετοιμασία και εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών είναι χρονοβόρα και
- αυξάνει το κόστος ανάπτυξης του προϊόντος, λόγω της χρήσης πρώτων υλών ή υποπροϊόντων, καθώς και της απασχόλησης παραγωγικών πόρων.

Κατ' αυτόν τον τρόπο λειτουργεί σαν ανασταλτικός παράγοντας στην επίτευξη του στρατηγικού στόχου των κατασκευαστικών βιομηχανιών για τη μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης νέων προϊόντων.

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικ. 1, η *εκπαίδευση για την εκτέλεση μιας παραγωγικής διαδικασίας* λαμβάνει χώρα:

- είτε στο στάδιο της πιλοτικής παραγωγής ενός προϊόντος, όταν αυτή περιλαμβάνει καινούριες μεθόδους ή μέσα παραγωγής,
- ή στο στάδιο της μαζικής παραγωγής ενός προϊόντος, στην περίπτωση καινούριου προσωπικού.

Στη σημερινή βιομηχανική πρακτική, ο σχεδιασμός των εκπαιδευτικών διαδικασιών έχει κυρίως τρεις στόχους:

- Την *απόκτηση επιδεξιότητας* (skills). Σαν επιδεξιότητα ορίζεται η ικανότητα του εκπαιδευόμενου να εκτελέσει μία διαδικασία (δουλεύοντας με τα χέρια του).
- Την *απόκτηση γνώσης* (knowledge). Σαν γνώση ορίζεται η πληροφορία που αποκτά και συγκρατεί ο εκπαιδευόμενος για τη διαδικασία που εκτελεί.
- Την *απόκτηση επιτηδειότητας* (competence). Σαν επιτηδειότητα ορίζεται η επαρκής συνδυαζόμενη χρήση επιδεξιότητας και γνώσης από τον εργαζόμενο.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βασικό μέρος της κατάρτισης (60 - 70% του συνόλου της εκπαιδευτικής διαδικασίας) λαμβάνει χώρα σε αίθουσες διδασκαλίας. Για την πρακτική εξάσκηση χρησιμοποιούνται συνήθως ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις, πιλοτικές γραμμές παραγωγής ή και οι ίδιοι οι παραγωγικοί πόροι ενός συστήματος. Ο έλεγχος της προόδου των εκπαιδευόμενων στηρίζεται σε ποιοτικές ή ποσοτικές

εκτιμήσεις παραμέτρων, όπως ο χρόνος διεξαγωγής της διαδικασίας, η ακρίβεια των εκτελούμενων ενεργειών, η συνέπεια με τις παρεχόμενες οδηγίες και οι ενέργειες που μπορούν να οδηγήσουν σε πρόκληση ατυχήματος.

Η εκπαίδευση του προσωπικού κρίνεται σαν ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την κατασκευαστική βιομηχανία. Στις μέρες μας, το ανταγωνιστικό βιομηχανικό περιβάλλον απαιτεί τη δυνατότητα υλοποίησης γρήγορων αλλαγών στο σχεδιασμό του προϊόντος και κατά συνέπεια και στις χρησιμοποιούμενες παραγωγικές διαδικασίες. Σαν αποτέλεσμα, είναι ιδιαίτερα δύσκολη η εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού, καθώς οι παραγωγικές διαδικασίες εξελίσσονται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Τα προβλήματα που καθιστούν την παροχή αποτελεσματικής εκπαίδευσης, υπό αυτές τις συνθήκες, δύσκολη είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- Η εκπαίδευση στα πλαίσια της παραγωγής, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν είναι εφικτή, διότι μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ομαλή διεξαγωγή της παραγωγικής διαδικασίας. Η εκπαίδευση εκτός συνθηκών παραγωγής όμως, δεν μπορεί να προετοιμάσει τους εργαζόμενους κατάλληλα για τις πραγματικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες εκτελείται μια παραγωγική διαδικασία.
- Η εκπαίδευση κάτω από πραγματικές συνθήκες μπορεί να καταστεί επικίνδυνη για τον εκπαιδευόμενο, στην περίπτωση που περιλαμβάνει χειρισμό μεγάλων αντικειμένων ή επιβλαβούς εξοπλισμού. Το κόστος της μπορεί επίσης να είναι μεγάλο λόγω της μη παραγωγικής χρήσης πρώτων υλών και εξοπλισμού, υπό συνθήκες που είναι επιπλέον επιρρεπείς σε πρόκληση σοβαρών ζημιών.

## 1.2. Σχεδιασμός & εκπαίδευση σε μηχανουργικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού

Οι παραγωγικές διαδικασίες μηχανικής αφαίρεσης υλικού (mechanical material removal processes) θεωρούνται σήμερα η ραχοκοκκαλιά της βιομηχανικής κατασκευαστικής πρακτικής. Αυτό συμβαίνει διότι αποτελούν μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες κατηγορίες παραγωγικών διαδικασιών που εμπλέκονται στη φάση παραγωγής ενός μεγάλου αριθμού προϊόντων. Τα κύρια χαρακτηριστικά των διεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι (Chryssolouris 1992):

- Το *κόστος* των μηχανών και των χρησιμοποιούμενων εργαλείων είναι μικρό, συγκρινόμενο με αυτό άλλων παραγωγικών διαδικασιών. Το κόστος εργασίας όμως είναι σχετικά υψηλό λόγω του υψηλού επιπέδου εξειδίκευσης που απαιτείται.
- Η *παραγωγικότητα* που επιτυγχάνεται είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με άλλες παραγωγικές διαδικασίες. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος προετοιμασίας (set-up) της διαδικασίας είναι σχετικά μικρός.
- Η *ποιότητα* της επιφάνειας είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού. Μεγάλο εύρος επιφανειακής ποιότητας μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη συνδυασμένη επιλογή των παραμέτρων κοπής.
- Η *ευελιξία* των διεργασιών αφαίρεσης υλικού θεωρείται από τις μεγαλύτερες μεταξύ των παραγωγικών διαδικασιών. Εξαρτήματα με μεγάλο εύρος μεγεθών, σχημάτων και επιφανειακής ποιότητας μπορούν να παραχθούν, λόγω της ποικιλίας στη γεωμετρία και την κινηματική των εργαλείων και του δοκιμίου.

Προκειμένου να υλοποιηθεί το σχέδιο ενός προϊόντος με τη χρήση διεργασιών αφαίρεσης υλικού σε συνθήκες μαζικής παραγωγής, απαιτείται ο προσδιορισμός ενός αριθμού δεδομένων που σχετίζονται με τις ίδιες τις διαδικασίες, τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί και τα άτομα που θα εμπλακούν σε αυτές. Ο προσδιορισμός τους λαμβάνει χώρα στη φάση *σχεδιασμού* των παραγωγικών αυτών διαδικασιών (process planning). Στη φάση αυτή καθορίζονται:

- το είδος (φρεζάρισμα, τρνίρισμα, λείανση κτλ.) και η αλληλουχία των διεργασιών που απαιτούνται,
- ο τύπος του εξοπλισμού (εργαλειομηχανές), των κοπτικών εργαλείων, των ιδιοσυσκευών και των ψυκτικών υγρών που θα χρησιμοποιηθούν,
- οι παράμετροι κοπής (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής κτλ.) καθεμιάς από τις επιμέρους διεργασίες και
- ο κώδικας αριθμητικού ελέγχου (NC code) των διεργασιών, όταν πρόκειται για αυτοματοποιημένη διαδικασία.

Για την επιλογή των διεργασιών και των λειτουργικών τους παραμέτρων κατά τη φάση σχεδιασμού, λαμβάνονται υπ' όψη παράγοντες όπως η μορφή, το μέγεθος και το υλικό του δοκιμίου, οι απαιτούμενες κατασκευαστικές ανοχές, η επιφανειακή ποιότητα και το μέγεθος της παρτίδας.

Πριν εγκριθεί ένα σχέδιο παραγωγής, όπως συμβαίνει και με τις περισσότερες παραγωγικές διαδικασίες, απαιτείται και στην περίπτωση των μηχανουργικών διεργασιών αφαίρεσης υλικού πειραματική επαλήθευση της διαδικασίας υπό φυσικές συνθήκες. Τα πειράματα αυτά διεξάγονται από τους μηχανικούς προκειμένου:



- να αξιολογηθούν οι επιδράσεις των παραμέτρων κοπής που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό στο αποτέλεσμα της διεργασίας,
- να προσδιοριστούν τεχνο-οικονομικά δεδομένα, όπως ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας και το κόστος της,
- να διερευνηθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως συγκρούσεις του κοπτικού εργαλείου ή υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας και
- να ελεγχθούν παράγοντες που σχετίζονται με την εμπλοκή του ανθρώπου, όπως είναι η εργονομία και η ασφάλεια των διαδικασιών.

Όπως συμβαίνει με όλες τις παραγωγικές διαδικασίες, η ανάγκη για τη διεξαγωγή φυσικών πειραμάτων για την επαλήθευση του σχεδιασμού προκαλεί σημαντικά προβλήματα και στην περίπτωση των διεργασιών αφαίρεσης υλικού. Πιο συγκεκριμένα:

- οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ανάπτυξης του προϊόντος, καθώς η προετοιμασία και διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας απαιτεί συνήθως έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων,
- προκαλεί αύξηση του κόστους ανάπτυξης του προϊόντος, μια και προϋποθέτει στη φάση αυτή σημαντικά έξοδα για απασχόληση προσωπικού, καθώς και χρήση πρώτων υλών και παραγωγικών πόρων,
- συνεπάγεται την πιθανότητα πρόκλησης ατυχημάτων για το χειριστή από απρόβλεπτα φαινόμενα, όπως η θραύση του κοπτικού εργαλείου ή του υλικού λόγω ανάπτυξης υπερβολικών δυνάμεων κοπής,
- εμπεριέχει τον κίνδυνο ζημιών για ιδιαίτερα ακριβό παραγωγικό εξοπλισμό, λόγω φαινομένων όπως οι συγκρούσεις τμημάτων της μηχανής από λάθος προγραμματισμό της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου και
- μειώνει την ευελιξία του σχεδιασμού, καθώς δεν επιτρέπει την αξιολόγηση του απαιτούμενου σε κάθε περίπτωση αριθμού εναλλακτικών επιλογών για την επίτευξη της καλύτερης τεχνο-οικονομικά λύσης.

Πέρα από την επαλήθευση του σχεδιασμού, η φυσική διεξαγωγή διαδικασιών αφαίρεσης υλικού για μη παραγωγικούς σκοπούς απαιτείται και για την *εκπαίδευση* των ατόμων που εμπλέκονται σε αυτές. Η ανθρώπινη παρέμβαση στις διαδικασίες αφαίρεσης υλικού εστιάζεται σήμερα κυρίως στην προετοιμασία τους (process set-up) και στο χειρισμό των εργαλειομηχανών. Η εκπαίδευση περιλαμβάνει:

- απόκτηση βασικής θεωρητικής γνώσης πάνω στα φαινόμενα που διέπουν τις διεργασίες, τις βασικές παραμέτρους τους, τις ιδιότητες των υλικών και των κοπτικών εργαλείων,
- εξοικείωση και απόκτηση επιδεξιότητας στο χειρισμό και έλεγχο των λειτουργιών πραγματικών εργαλειομηχανών,
- θεωρητική κατάρτιση και πρακτική εξάσκηση στην παραγωγή προγραμμάτων NC για την αυτόματη οδήγηση εργαλειομηχανών,
- απόκτηση επιτηδειότητας στη συνδυασμένη χρήση θεωρητικής γνώσης και πρακτικής εμπειρίας για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων της διεργασίας.

Το σημαντικότερο μέρος της εκπαίδευσης, δηλαδή η πρακτική εξάσκηση (hands-on practice), πραγματοποιείται σήμερα με χρήση πραγματικού παραγωγικού εξοπλισμού και υλικών. Αν και οι ρεαλιστικές συνθήκες εκπαίδευσης που εξασφαλίζει η χρήση αυτή

συντελούν στην αποτελεσματική εξοικείωση των εργαζομένων με τις διεργασίες, εντούτοις παρουσιάζουν σημαντικότερα προβλήματα:

- Δεσμεύουν παραγωγικό εξοπλισμό του συστήματος, ακριβό στις περισσότερες περιπτώσεις, για μη παραγωγικές διεργασίες.
- Απαιτούν κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων από αναλώσιμα διεργασιών (πρώτες ύλες, κοπτικά εργαλεία, λιπαντικά κτλ.).
- Εκθέτουν, στα πρώτα στάδια της εκπαίδευσης, τους άπειρους εργαζόμενους στις σχετικά επικίνδυνες συνθήκες λειτουργίας των πραγματικών εργαλειομηχανών.
- Εμπεριέχουν κινδύνους πρόκλησης σοβαρών ζημιών στον παραγωγικό εξοπλισμό λόγω έλλειψης επαρκούς γνώσης και εξοικείωσης στους εκπαιδευόμενους.
- Απαιτούν στις περισσότερες περιπτώσεις ικανό αριθμό εκπαιδευτών για την επιτήρηση και καθοδήγηση των εκπαιδευόμενων.

Με βάση τα προβλήματα αυτά, η εκπαίδευση για παραγωγικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού χαρακτηρίζεται στη σημερινή βιομηχανική πρακτική από υψηλό κόστος και σημαντικό βαθμό επικινδυνότητας.

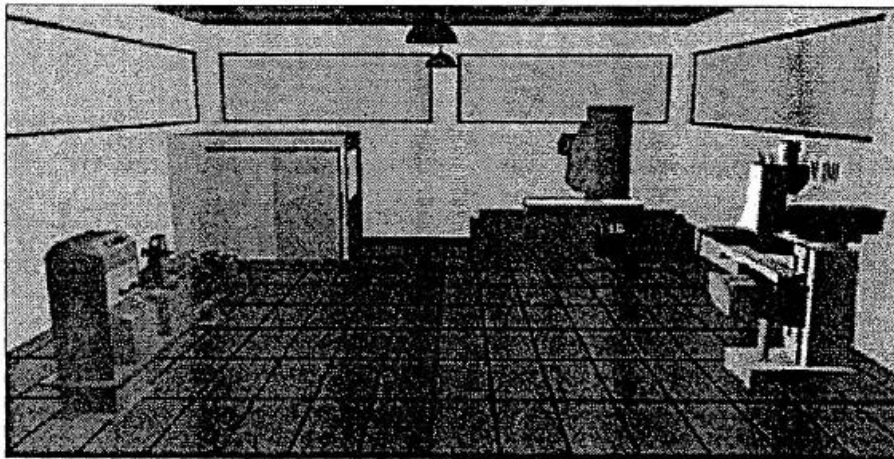
## **2. Υλοποίηση του Μηχανουργείου του Μέλλοντος**

---

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα βασικά στοιχεία της πιλοτικής υλοποίησης της νέας μεθοδολογίας προσομοίωσης μηχανουργικών διεργασιών. Κατ' αρχήν γίνεται μια εισαγωγική περιγραφή του Μηχανουργείου του Μέλλοντος, σε επίπεδο ροής εργασίας του χρήστη. Στη συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της συνολικής δομής του προγράμματος με το οποίο υλοποιήθηκε το περιβάλλον προσομοίωσης και οι λειτουργίες του. Μετά από μία εισαγωγή στη γενική δομή του συστήματος, περιγράφονται σε επίπεδο κώδικα τα βασικά του τμήματα, που περιλαμβάνουν το γενικό χειριστή της εφαρμογής, τους χειριστές των εργαλειομηχανών, τις βιβλιοθήκες του συστήματος και τους πυρήνες υπολογισμών.

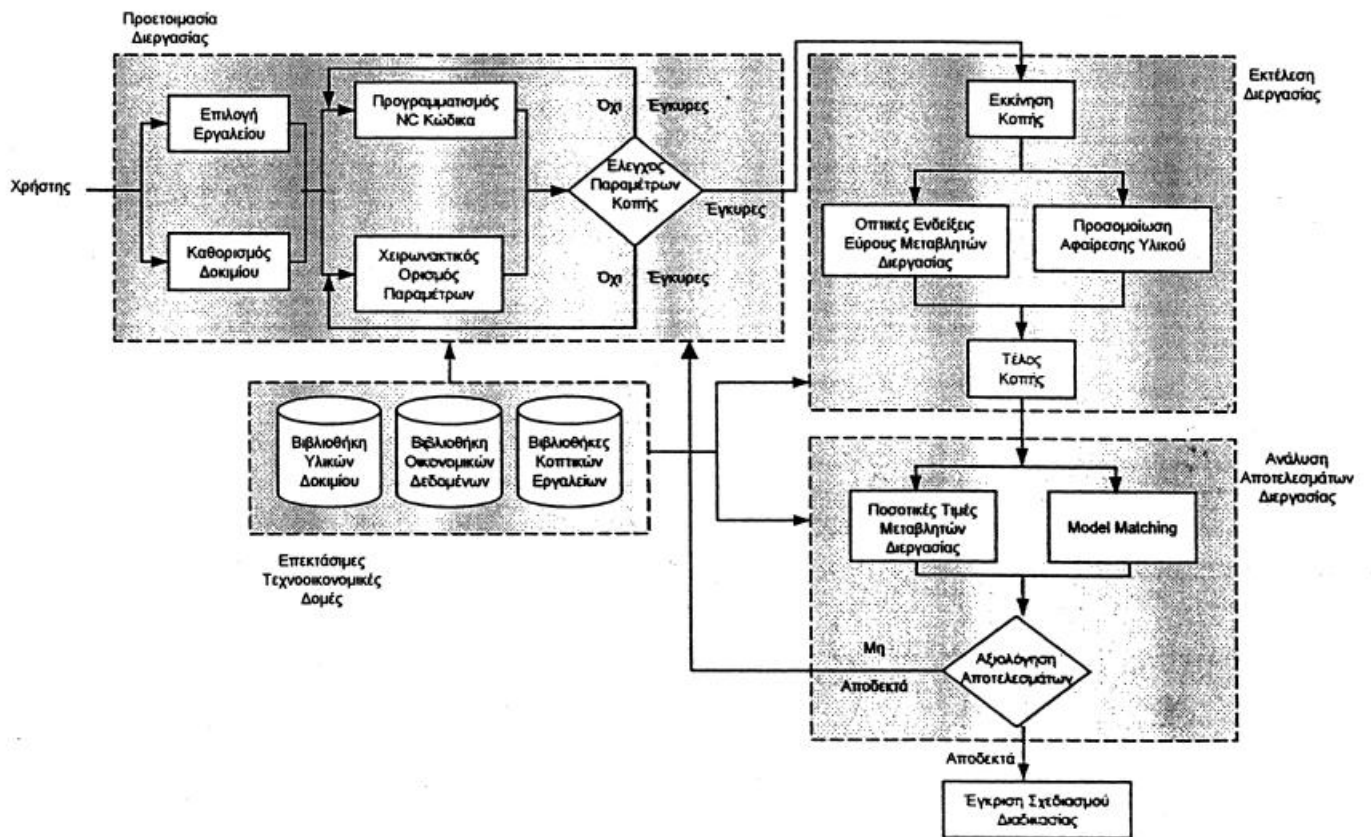
## 2.1. Το Μηχανουργείο του Μέλλοντος

Το Μηχανουργείο του Μέλλοντος (Εικ. 2) είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης που παρέχει τη δυνατότητα επαλήθευσης του σχεδιασμού μιας μηχανουργικής διεργασίας και εκπαίδευσης χειριστών εργαλειομηχανών, υπό ρεαλιστικές και ασφαλείς συνθήκες. Αποτελεί την πιλοτική υλοποίηση της μεθοδολογίας προσομοίωσης μηχανουργικών διεργασιών με χρήση τεχνικών Εικονικής Πραγματικότητας.



**Εικ. 2:** Το Μηχανουργείο του Μέλλοντος (γενική άποψη)

Η ιδέα στην οποία βασίστηκε η υλοποίησή του είναι η δυνατότητα προσομοίωσης του διαισθητικού τρόπου με τον οποίο ένας χειριστής εκτελεί μια μηχανουργική διεργασία στην πραγματικότητα (Εικ. 3). Με τη χρήση κατάλληλων περιφερειακών Εικονικής Πραγματικότητας, ο χρήστης εμβυθίζεται σε ένα εικονικό μηχανουργείο πραγματικών διαστάσεων. Δυνατότητες αλληλεπίδρασης παρέχονται τόσο για την προετοιμασία της διαδικασίας (process set-up) όσο και για τον έλεγχο των μηχανών είτε χειρωνακτικά είτε με τη χρήση κώδικα NC. Επιπλέον, λειτουργίες οπτικοποίησης και ποσοτικοποίησης δεδομένων που σχετίζονται με τη διαδικασία παρέχουν τη δυνατότητα εποπτείας πάνω στη διεργασία κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής της.



Εικ. 3: Η λογική προσομοίωσης στο Μηχανουργείο του Μέλλοντος

## 2.2. Δομή του προγράμματος

### 2.2.1. Γενική περιγραφή

Σε επίπεδο δομής λογισμικού (software structure), το σύστημα του Μηχανουργείου του Μέλλοντος είναι οργανωμένο σε τρία βασικά επίπεδα ιεραρχίας. Η οργάνωση αυτή επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπ' όψη την εξάρτηση και επικοινωνία των διαφόρων τμημάτων του συστήματος με το ίδιο το εικονικό περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο έλεγχος του εικονικού περιβάλλοντος αποτελεί ουσιαστικά τον πυρήνα όλης της εφαρμογής. Όσο πιο άμεσα συνδέεται ένα τμήμα του συστήματος με το εικονικό περιβάλλον, σε τόσο υψηλότερο επίπεδο ιεραρχίας βρίσκεται. Για την καλύτερη οργάνωση της εφαρμογής στο σύνολό της, κάθε τμήμα επικοινωνεί μόνο με άλλα τμήματα που ανήκουν στο ίδιο ή σε γειτονικά επίπεδα ιεραρχίας με αυτό. Τα τρία επίπεδα ιεραρχίας του συστήματος (Εικ. 4) είναι τα ακόλουθα:

- *επίπεδο εικονικού περιβάλλοντος* το οποίο αναφέρεται ως δομές εντός του εικονικού περιβάλλοντος,
- *επίπεδο ελέγχου*, το οποίο συνδέεται άμεσα με Το εικονικό περιβάλλον ελέγχοντας τη λειτουργικότητα όλων των δομών του προηγούμενου επιπέδου,
- *επίπεδο δεδομένων και υπολογισμών*, το οποίο σχετίζεται με την αποθήκευση των δεδομένων και την προσομοίωση της ίδιας της διεργασίας.

Στην Εικ. 4 φαίνονται τα κυριότερα τμήματα που αποτελούν το κάθε επίπεδο ιεραρχίας καθώς και οι δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ τους. Τα τμήματα αυτά είναι:

Στο επίπεδο εικονικού περιβάλλοντος:

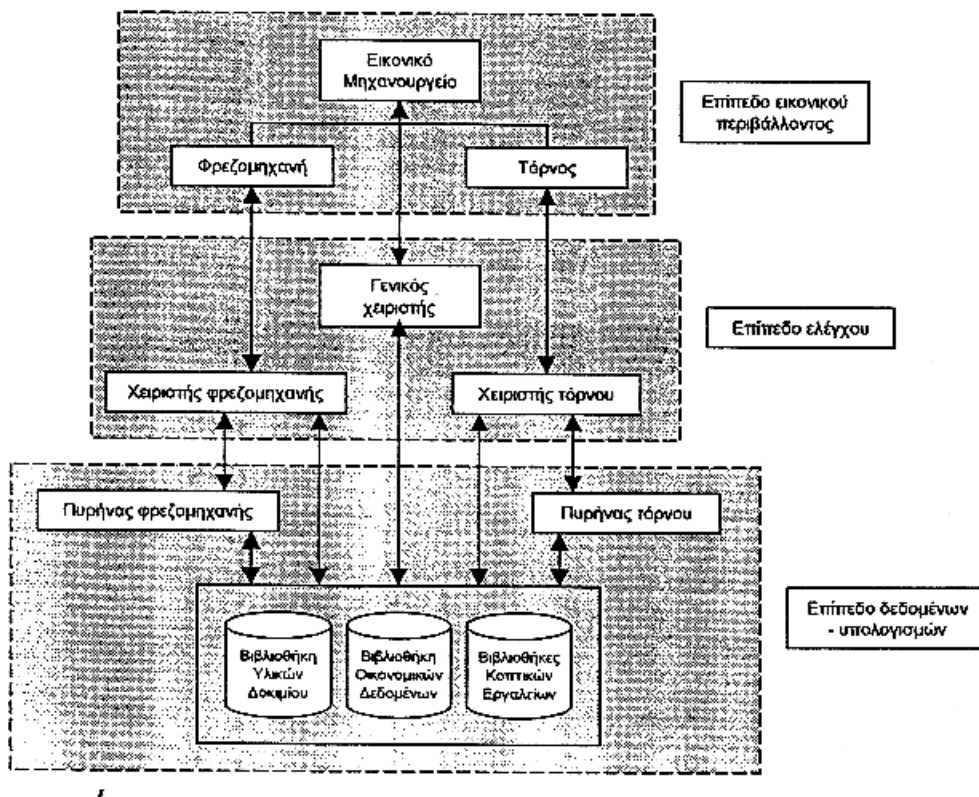
- το σύνολο όλων των εικονικών αντικειμένων που αποτελούν το περιβάλλον εργασίας
- τα μοντέλα των εικονικών εργαλειομηχανών, δηλαδή του τόνου και της φρεζομηχανής

Στο επίπεδο ελέγχου:

- ο γενικός χειριστής (handler), που είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση και τον κεντρικό έλεγχο της εφαρμογής
- ο χειριστής κάθε εργαλειομηχανής, ο οποίος καθορίζει και ελέγχει τη λειτουργική συμπεριφορά της

Στο επίπεδο δεδομένων και υπολογισμών:

- οι βιβλιοθήκες (libraries), που περιέχουν όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για τους υπολογισμούς που αφορούν στην προσομοίωση της διεργασίας
- ο υπολογιστικός πυρήνας κάθε εργαλειομηχανής, στον οποίο μοντελοποιείται η αντίστοιχη διεργασία και διεξάγονται όλοι οι σχετικοί υπολογισμοί



Εικ. 4: Επίπεδα ιεραρχίας και βασικά τμήματα της δομής του συστήματος

### 2.2.2. Γενικός χειριστής εφαρμογής

Ο γενικός χειριστής είναι υπεύθυνος για την καθολική διαχείριση και το συγχρονισμό της εφαρμογής, την αρχικοποίηση και την τελική παύση της, καθώς και για τον έλεγχο των λειτουργιών του συστήματος που δεν είναι άμεσα συνδεδεμένες με κάποια εικονική εργαλειομηχανή.

Στο γενικό χειριστή υπάγεται το χρονόμετρο της εφαρμογής από το οποίο παίρνουν χρονικά δεδομένα όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος. Το χρονόμετρο αυτό παρέχει τον ακριβή χρόνο ανάμεσα σε δύο διαδοχικά στιγμιότυπα δειγματοληψίας της εφαρμογής σε msec, αλλά και δεδομένα ημερολογιακού χρόνου, ή χρόνου, σε δευτερόλεπτα που απαιτούνται από τους χειριστές των εργαλειομηχανών. Από τον γενικό χειριστή του συστήματος γίνεται επίσης ο έλεγχος δεδομένων, όπως σταθερές και ονόματα αρχείων, που χρησιμεύουν στην αρχικοποίηση ή στη ρύθμιση τον τρόπου λειτουργίας της εφαρμογής. Επιπλέον, σε αυτόν υπάγονται και οι βασικές λειτουργίες που πρέπει να εκτελέσει το σύστημα πριν την έξοδο από την εφαρμογή.

Τέλος, ο γενικός χειριστής ελέγχει τις βιβλιοθήκες υλικών, κοπτικών εργαλείων και οικονομικών δεδομένων του συστήματος. Είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση και την ανάγνωση των βιβλιοθηκών από τα αντίστοιχα αρχεία, κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, αφήνοντας ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα τους από τα άλλα τμήματα του συστήματος που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας, δηλαδή τους χειριστές των εργαλειομηχανών.

### 2.2.3. Βιβλιοθήκες συστήματος

Οι βιβλιοθήκες του συστήματος παρέχουν την απαραίτητη δομημένη οργάνωση της πληροφορίας που απαιτείται στα πλαίσια των υπολογισμών που συνεπάγεται η προσομοίωση των διεργασιών. Στην παρούσα έκδοση το σύστημα περιλαμβάνει τη βιβλιοθήκη υλικών δοκιμίου, βιβλιοθήκες κοπτικών εργαλείων για τις υποστηριζόμενες διεργασίες και τη βιβλιοθήκη οικονομικών δεδομένων. Τα δεδομένα των βιβλιοθηκών διατίθενται μόνο για ανάγνωση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η οποία διεξάγεται από αντίστοιχο αρχείο κατά την έναρξη της εφαρμογής. Η τροποποίηση των δεδομένων τους γίνεται με άμεση επέμβαση στο αρχείο πριν την ανάγνωσή του με οποιονδήποτε απλό επεξεργαστή κειμένου.

Ο κάθε τύπος πληροφορίας δομείται σε μορφή στοιχείων, τα οποία αποτελούν την ελάχιστη μονάδα διακίνησης πληροφορίας που μπορεί να διαβαστεί ή να αποθηκευτεί σε μία βιβλιοθήκη. Για κάθε στοιχείο του τύπου πληροφορίας, υπάρχει αντίστοιχα και μία σημαία η οποία καθορίζει τη διαθεσιμότητά του. Η ανυπαρξία κάποιου στοιχείου στο αρχείο της βιβλιοθήκης σηματοδοτείται αντίστοιχα, ώστε η προσομοίωση να μπορεί να συνεχιστεί κανονικά για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων για τα οποία δεν απαιτείται το συγκεκριμένο στοιχείο πληροφορίας. Κάθε τύπος πληροφορίας αντιστοιχεί σε μία βιβλιοθήκη του συστήματος.

Για κάθε βιβλιοθήκη υπάρχει ξεχωριστό αρχείο κειμένου από το οποίο διαβάζονται όλα τα στοιχεία της. Συνολικά, οι βιβλιοθήκες οργανώνονται σε μία ενιαία βάση δεδομένων που παρέχει ξεχωριστές κλήσεις για την προσπέλαση κάθε μιας από αυτές. Κάθε βιβλιοθήκη, παρέχει κατ' αρχήν μία κλήση για την ανάγνωσή της από κάποιο συγκεκριμένο αρχείο και μια κλήση για τη μέτρηση των στοιχείων της, δηλαδή των μονάδων τύπων αποθήκευσης που έχουν διαβαστεί με επιτυχία από το σύστημα. Η αναφορά σε κάποιο στοιχείο μπορεί να γίνει είτε με το όνομά του, είτε με τον αύξοντα αριθμό του στη βιβλιοθήκη. Ειδικά για τα κοπτικά εργαλεία, μπορεί να γίνει αναφορά και βάσει του αριθμού ετικέτας, δηλαδή του μοναδικού αριθμού με τον οποίο περιγράφεται το κοπτικό εργαλείο στα προγράμματα κοπής. Για τη σύνδεση του ονόματος ή του αριθμού ετικέτας με τον αύξοντα αριθμό του στοιχείου στη βιβλιοθήκη υπάρχει ειδική κλήση. Τέλος, άλλες κλήσεις επιτρέπουν την ανάκτηση ενός στοιχείου, με λήψη ενός αντιγράφου, ή ακόμα και τη διαγραφή του.

### 2.2.4. Χειριστές εργαλειομηχανών

Στον χειριστή κάθε εργαλειομηχανής υπάγεται ο έλεγχος της λειτουργικής της συμπεριφοράς. Ο χειριστής μιας εργαλειομηχανής αναλαμβάνει, εκτός από τον έλεγχο των κινήσεων των μερών της μηχανής, και τη δημιουργία, την εμφάνιση και τη λειτουργία όλων των χειριστηρίων της, συμπεριλαμβανομένων των πινάκων καθορισμού δοκιμίου και κοπτικού εργαλείου, καθώς και απεικόνισης των αποτελεσμάτων της διεργασίας. Επιπλέον είναι υπεύθυνος για την αναπαράσταση του δοκιμίου, πριν και κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Ο χειριστής μιας εργαλειομηχανής, όπως και ο γενικός χειριστής της εφαρμογής, ανήκει στο επίπεδο ελέγχου του συστήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποτελεί ουσιαστικά Το μέσο διασύνδεσης του μοντέλου της εργαλειομηχανής, στο επίπεδο εικονικού περιβάλλοντος, με τον αντίστοιχο υπολογιστικό πυρήνα, στο επίπεδο δεδομένων και



υπολογισμών. Με βάση τις ενέργειες του χρήστη στο επίπεδο του εικονικού περιβάλλοντος, ελέγχει τον πυρήνα που είναι υπεύθυνος για την προσομοίωση της αντίστοιχης διεργασίας, παρέχοντας τις κατάλληλες εντολές για τη διεξαγωγή της. Επιπλέον, χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το επίπεδο δεδομένων και υπολογισμών για να παρέχει στο χρήστη την απαραίτητη ανάδραση (feedback).

### 2.2.5. Πυρήνες υπολογισμών

Το τμήμα του συστήματος που είναι υπεύθυνο για την προσομοίωση της ίδιας της διεργασίας που διεξάγεται σε μία εικονική εργαλειομηχανή, είναι ο πυρήνας υπολογισμών της. Στο τμήμα αυτό περιλαμβάνεται το μοντέλο εκτέλεσης της διεργασίας, γίνονται οι σχετικοί έλεγχοι εγκυρότητας πριν την εκκίνησή της, εκτελούνται όλοι οι υπολογισμοί που σχετίζονται με τη διαδικασία αφαίρεσης υλικού και τον προσδιορισμό των μεταβλητών της διεργασίας, και εξάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο εικονικό περιβάλλον.

Ο χειριστής της κάθε εργαλειομηχανής παρέχει την απαραίτητη απομόνωση του πυρήνα υπολογισμών από τις λειτουργίες του χειρισμού της μηχανής στο εικονικό περιβάλλον, δυνατότητα πολύ χρήσιμη τόσο για την ανάπτυξη και τον έλεγχο του πυρήνα υπολογισμών όσο και για τη συμβατότητά του με κάθε λειτουργικό σύστημα. Στην πραγματικότητα, ο πυρήνας υπολογισμών δεν συνδέεται ούτε με την πλατφόρμα ανάπτυξης, αφού επικοινωνεί μόνο με το χειριστή της μηχανής μέσω κάποιων πολύ συγκεκριμένων κλήσεων αυτού προς τον πυρήνα. Οι πυρήνες των εργαλειομηχανών ανήκουν στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος.

Συνοπτικά, ο κάθε πυρήνας υπολογισμών είναι υπεύθυνος για το χειρισμό του δοκιμίου και του κοπτικού εργαλείου, τους εκτελούμενους υπολογισμούς, τη δυναμική αναπαράσταση του δοκιμίου την κατάσταση της εργαλειομηχανής και όλους τους ελέγχους που αφορούν στη διεργασία. Ανάλογα με την περίπτωση της εκτελούμενης λειτουργίας, η επικοινωνία από και προς τον πυρήνα γίνεται με:

- υπηρεσίες για την εισαγωγή νέου δοκιμίου και την επιλογή υλικού
- υπηρεσίες για την επιλογή κοπτικού εργαλείου,
- υπηρεσίες για τον έλεγχο της κατάστασης της εργαλειομηχανής,
- υπηρεσίες ή προσπελάσματα δεδομένα για τη διακίνηση παραμέτρων και αποτελεσμάτων της διεργασίας,
- υπηρεσίες για τον έλεγχο της διεργασίας,
- κλήση για χρονοισμό του πυρήνα με τα άλλα επίπεδα ιεραρχίας.

Ειδικά στην περίπτωση της εικονικής φρεζομηχανής, η οποία μπορεί να εκτελέσει NC κώδικα, πολλές από τις εντολές ελέγχου δίδονται από το ανώτερο επίπεδο σε μορφή G κώδικα.

Ο αριθμός των λειτουργιών που εκτελεί ο πυρήνας της κάθε εργαλειομηχανής επιβάλλει τη διαίρεσή του σε επιμέρους τμήματα. Το συγχρονισμό τους αναλαμβάνει ένα άλλο τμήμα, το τμήμα ελέγχου. Το τμήμα αυτό ανήκει στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας οργάνωσης των τμημάτων του πυρήνα και είναι το μόνο που επικοινωνεί προς τα έξω παρέχοντας τις κλήσεις του πυρήνα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα βασικά τμήματα του πυρήνα είναι:

- το *τμήμα ελέγχου*, το οποίο εμφανίζεται ως υπεर्सύνολο του τμήματος του πυρήνα που είναι υπεύθυνο για τους υπολογισμούς,
- το *τμήμα υπολογισμών*, το οποίο είναι υπεύθυνο για όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με τη διεργασία και το χειρισμό και έλεγχο των σχετικών δεδομένων, και
- το *τμήμα γεωμετρίας*, που χειρίζεται την αναπαράσταση του δοκιμίου, εκτελώντας επίσης όλους τους απαραίτητους μετασχηματισμούς.

### *Τμήμα ελέγχου*

Αποτελεί βασικό μέρος του πυρήνα υπολογισμών, αναλαμβάνοντας το συγχρονισμό και τον έλεγχο όλων των τμημάτων του. Όλες οι υπηρεσίες που παρέχονται από τον πυρήνα προς τα έξω, προέρχονται από το τμήμα αυτό, το οποίο επίσης μεταβιβάζει τις απαραίτητες εντολές στα άλλα τμήματα. Όσον αφορά στη δομή του, αποτελεί μία επέκταση του τμήματος υπολογισμών, και κρατά όλους τους δείκτες και τις μεταβλητές για τον έλεγχο του τμήματος γεωμετρίας, χρησιμοποιώντας τις σχετικές υπηρεσίες των τμημάτων αυτών.

Το τμήμα ελέγχου μεταφέρει τις εντολές ελέγχου των οικονομικών παραμέτρων του κοπτικού εργαλείου και του υλικού του δοκιμίου, προς το τμήμα υπολογισμών εφ' όσον δεν εκτελείται τη στιγμή εκείνη διεργασία. Επίσης μετά από κάθε στοιχειώδη φάση αφαίρεσης υλικού δίνει εντολή για την εκτέλεση των υπολογισμών της διεργασίας, αποτελώντας παράλληλα το μέσο μεταφοράς των δεδομένων αυτών προς το ανώτερο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος.

Το τμήμα ελέγχου μπορεί να καταστρέφει ή να αρχικοποιεί, μετά από σχετική αίτηση, το τμήμα γεωμετρίας. Στο τμήμα γεωμετρίας δίνει τις εντολές αναπαράστασης του σχήματος του δοκιμίου σε κάθε περίπτωση κινήσεως του κοπτικού εργαλείου όταν πρόκειται για διεργασία του δοκιμίου, ή απλού ελέγχου σύγκρουσης όταν πρόκειται για ελεύθερη κίνηση του κοπτικού εργαλείου στην οποία δεν αναμένεται κοπή. Τέλος, το τμήμα ελέγχου δίνει τις εντολές για τη δημιουργία των αντίγραφων της γεωμετρίας, με σκοπό την απεικόνιση στο εικονικό περιβάλλον και - στην περίπτωση της φρέζας - τη σύγκριση με ένα πρότυπο σχήμα. Ειδικά στην περίπτωση της φρέζας, το τμήμα ελέγχου είναι ειδικά διαμορφωμένο για την εκτέλεση εντολών NC κώδικα.

### *Τμήμα υπολογισμών*

Σε επίπεδο δομής αποτελεί ένα υποσύνολο του τμήματος ελέγχου αν και έχει ικανοποιητική απομόνωση από αυτόν. Διαιρείται σε δύο μέρη, ένα για τη διαχείριση των δεδομένων και ένα για την εκτέλεση των ίδιων των υπολογισμών. Το πρώτο μέρος χειρίζεται τις παραμέτρους των κοπτικών εργαλείων, των υλικών δοκιμίου, των οικονομικών παραμέτρων, καθώς και των παραμέτρων της εκτελουμένης κοπής, και παρέχει τις κλήσεις για την αλλαγή και τον μηδενισμό τους. Το δεύτερο μέρος λαμβάνει τα δεδομένα που χειρίζεται το πρώτο και εκτελεί τους υπολογισμούς που ορίζονται στο πεδίο μοντέλων υπολογισμών.

Το πεδίο μοντέλων υπολογισμών αποτελεί μία δομή που περιλαμβάνει τα μοντέλα κοπής τα οποία αντιστοιχούν στο τύπο της διεργασίας που εκτελείται σε κάθε εργαλειομηχανή. Για κάθε μοντέλο υπάρχει μία μεταβλητή για την αποθήκευση της τιμής του αντίστοιχου χαρακτηριστικού της διεργασίας, μία σημαία ενεργοποίησης που δηλώνει

αν το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ζητείται να υπολογιστεί, και μια σημαία που τίθεται στο τέλος σαν ένδειξη ότι ο υπολογισμός του ήταν επιτυχής. Πριν τον υπολογισμό της τιμής του χαρακτηριστικού της διεργασίας που αντιστοιχεί σε κάποιο μοντέλο, ελέγχεται αν υπάρχουν όλες οι παράμετροι στα πεδία δεδομένων του πρώτου μέρους και τίθεται η σχετική σημαία επιτυχίας όταν ο υπολογισμός ολοκληρωθεί κανονικά. Σε αντίθετη περίπτωση - ή αν δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα - η σημαία αποτυχίας πέφτει χωρίς να παρουσιάζεται λάθος στο υπόλοιπο σύστημα ή να επηρεάζονται τα άλλα μοντέλα.

Στα πλαίσια των λειτουργιών του πυρήνα κάθε εργαλειομηχανής, το τμήμα υπολογισμών παρέχει συνολικά τις παρακάτω υπηρεσίες:

- αλλαγή κοπτικού εργαλείου
- αλλαγή υλικού του δοκιμίου,
- αλλαγή των οικονομικών παραμέτρων,
- θέση των παραμέτρων της κοπής και
- εκτέλεση των υπολογισμών.

### *Τμήμα γεωμετρίας*

Πρόκειται για το τμήμα που είναι υπεύθυνο για την αναπαράσταση του γεωμετρικού σχήματος του δοκιμίου. Αποτελεί ένα τελείως ανεξάρτητο τμήμα, που δημιουργείται, καταστρέφεται και ελέγχεται από εντολές του τμήματος ελέγχου του πυρήνα υπολογισμών. Παρέχει τις ακόλουθες υπηρεσίες:

- Αρχικοποίηση του σχήματος. Η υπηρεσία αυτή παρέχεται με τη δημιουργία του τμήματος.
- Έλεγχος συγκρούσεων. Η υπηρεσία αυτή ελέγχει για κάποια υποθετική θέση του κοπτικού εργαλείου το ενδεχόμενο σύγκρουσής του με το δοκίμιο. Οι έλεγχοι που αφορούν στη γεωμετρία γίνονται με βάση το εκάστοτε σχήμα τον δοκιμίου τη δεδομένη χρονική στιγμή της κατεργασίας και όχι το αρχικό του σχήμα.
- Υπολογισμός βάθους κοπής. Αναφέρεται στον υπολογισμό του βάθους διείδυσης κατά την πρώτη σύγκρουση που θα παρουσιάζονταν μεταξύ του δοκιμίου και ενός υποθετικού όγκου σάρωσης. Η υπηρεσία χρησιμοποιεί την πληροφορία της διεύθυνσης της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου που δημιουργεί έναν όγκο σάρωσης, η οποία ορίζεται με βάση τις συντεταγμένες του αρχικού και τελικού σημείου της.
- Αφαίρεση ενός όγκου σάρωσης από το δοκίμιο. Η υπηρεσία αναλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της αναπαράστασης του δοκιμίου ως προς τη δομή και την οργάνωση των στοιχειωδών χωρικών τμημάτων του.
- Δημιουργία ενός αντίγραφου του σχήματος τον δοκιμίου σε μορφή τριγώνων απεικονίσιμων στο εικονικό περιβάλλον. Η γεωμετρική πληροφορία κάθε τριγώνου αποθηκεύεται σε ένα αντικείμενο μέρος του τμήματος γεωμετρίας, και είναι προσπελάσιμη από το χειριστή της εργαλειομηχανής, στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος.
- Δημιουργία ενός αντιγράφου του σχήματος του δοκιμίου σε μορφή νέφους σημείων. Η γεωμετρική πληροφορία του σχήματος αποθηκεύεται σε αρχείο, το όνομα του οποίου παρέχεται με την κλήση της υπηρεσίας. Τα όρια του αριθμού

των σημείων που λαμβάνονται και αποθηκεύονται στο αρχείο είναι ελέγξιμα από την υπηρεσία.

### 3. Πιλοτικές εφαρμογές

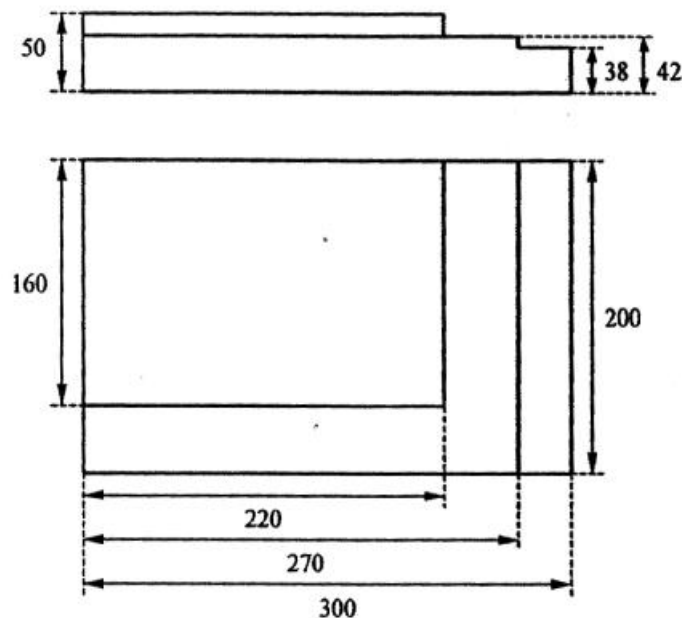
---

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή δύο χαρακτηριστικών πιλοτικών εφαρμογών με τη χρήση του Μηχανουργείου του Μέλλοντος. Στόχος είναι η παρουσίαση των δυνατοτήτων του εικονικού περιβάλλοντος προσομοίωσης να ανταποκριθεί στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά πραγματικών σεναρίων διεξαγωγής μηχανουργικών διεργασιών. Οι πιλοτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διεξαγωγή μιας διεργασίας φρεζαρίσματος και μιας διεργασίας τρνιρίσματος. Για κάθε μία από αυτές παρουσιάζεται το σενάριο εφαρμογής, η διαδικασία εκτέλεσης της εικονικής διεργασίας καθώς και τα αποτελέσματά της.

### 3.1. Διεργασία φρεζαρίσματος

#### 3.1.1. Σενάριο πιλοτικής εφαρμογής

Η γεωμετρία του εξαρτήματος που ζητείται να παραχθεί φαίνεται στην Εικ. 5. Το δοκίμιο είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κομμάτι Αλουμινίου 2024 T3 με διαστάσεις 300 × 250 × 50 mm. Ο τύπος κοπτικού εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί είναι μετωπική φρέζα από High Speed Steel S4, με 8 δόντια και διάμετρο 100 mm (DIN 1880).



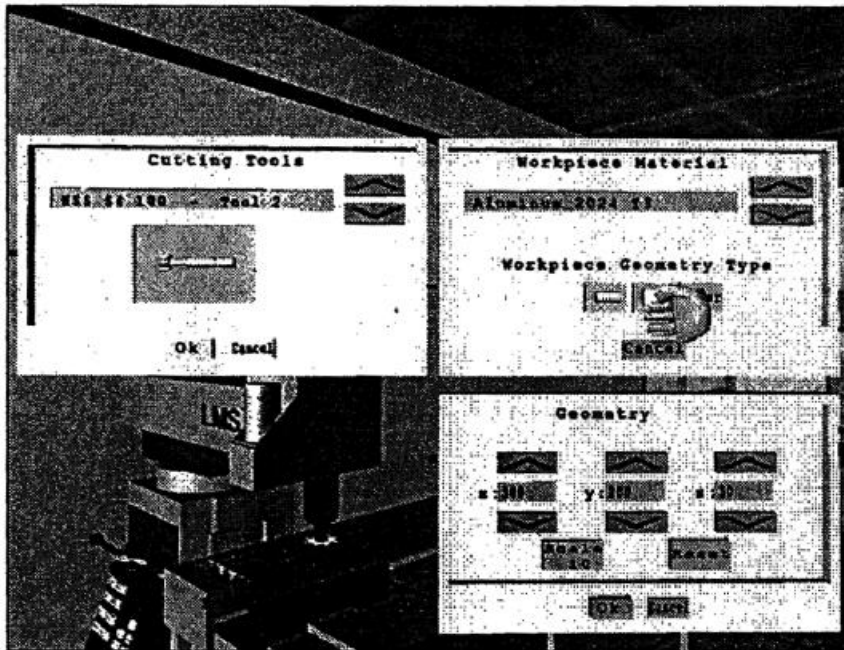
Εικ. 5: Το προς κατασκευή εξάρτημα

#### 3.1.2. Εκτέλεση εικονικής διεργασίας

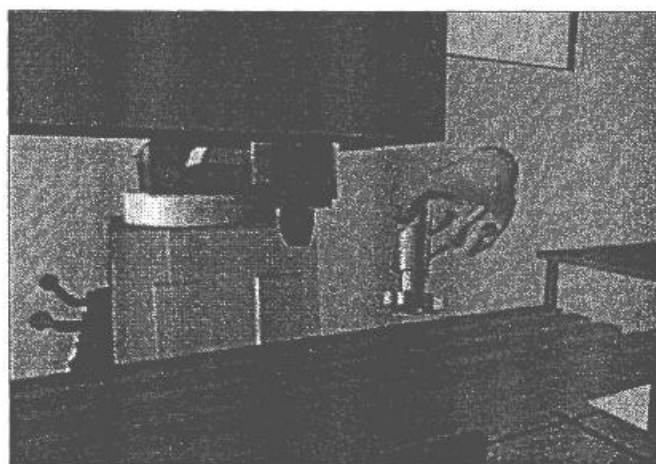
Ο καθορισμός του δοκιμίου και η επιλογή των κοπτικού εργαλείου γίνονται μέσα από το γραφικό interface της Βιβλιοθήκης Υλικών και της Βιβλιοθήκης Κοπτικών Εργαλείων της φρεζομηχανής (Εικ. 6). Το κατάλληλο δοκίμιο και κοπτικό εργαλείο τοποθετούνται πάνω στην εικονική εργαλειομηχανή (Εικ. 7). Στη συνέχεια, ο χειριστής της εικονικής φρεζομηχανής, χρησιμοποιώντας τον ρεαλιστικό πίνακα ελέγχου τον ελεγκτή (Εικ. 8), πληκτρολογεί άμεσα τον NC κώδικα ο οποίος χρησιμοποιείται για την κατεργασία του δοκιμίου.

Κατά τη διάρκεια καθορισμού των μεταβλητών της διαδικασίας, το σύστημα ελέγχει τις τιμές τους λαμβάνοντας υπ' όψη τα πρότυπα κατεργασιών. Όπου χρειάζεται, παρέχονται υποδείξεις στο χρήστη (Εικ. 9). Ο κώδικας NC που χρησιμοποιείται τελικά για να παραχθεί το εξάρτημα παρουσιάζεται στην Εικ. 10. Κατά τη διεύθυνση του κοπτικού

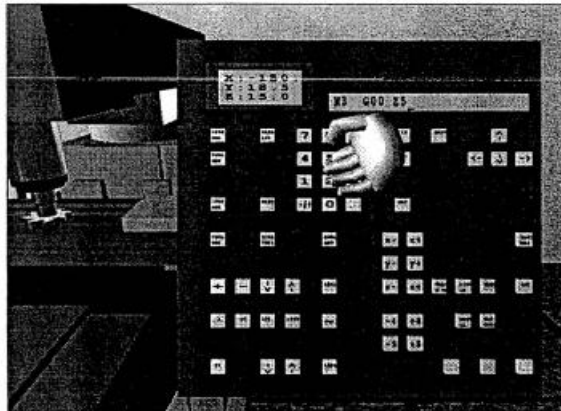
εργαλείου στο δοκίμιο, ο κώδικας προσομοίωσης τον συστήματος αναπαριστά σε πραγματικό χρόνο την αφαίρεση υλικού από το δοκίμιο (Εικ. 11). Ταυτόχρονα, οι τιμές των μεταβλητών ενδιαφέροντος της διεργασίας που επιλέχθηκαν από τον χρήστη υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω των κατάλληλων μοντέλων κοπής. Οι ποσοτικές εκτιμήσεις για αυτά τα χαρακτηριστικά φαίνονται στα αντίστοιχα γραφικά interfaces παρουσίασης αποτελεσμάτων (Εικ. 12).



**Εικ. 6:** Ορισμός δοκιμίου και επιλογή κοπτικού εργαλείου



**Εικ. 7:** Τοποθέτηση κοπτικού εργαλείου στη φρεζομηχανή



**Εικ. 8:** Προγραμματισμός NC κώδικα



**Εικ. 9:** Ορισμός μη ενδεικνυόμενων τιμών σε παραμέτρους της διεργασίας

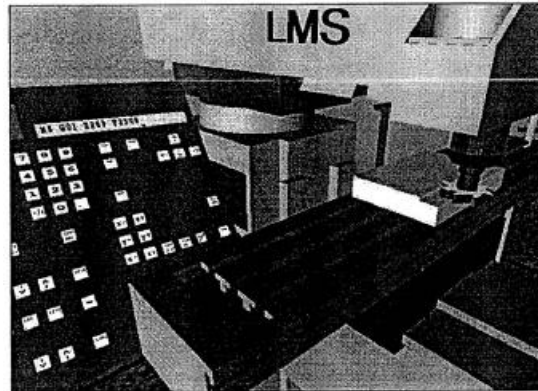
```

N1 G21 G80 G40 G90
N2 M06 T2
N3 G00 Z55
N4 G00 X-65 Y-10
N5 G00 Z42
N6 M03 S600
N7 G01 X269 F2500
N8 G01 Y255
N9 G00 X320
N10 G00 Z38
N11 M03 S800
N12 G01 Y-55 F2500
N13 M05
N14 M02

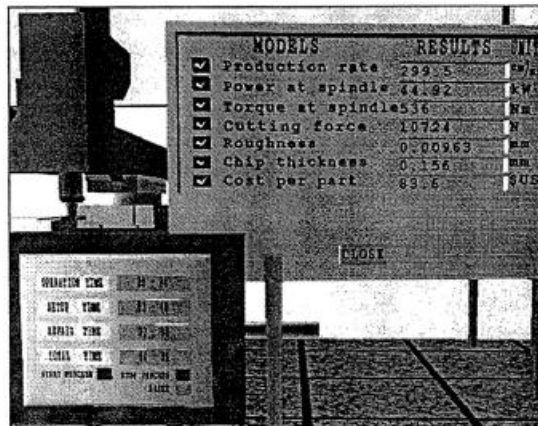
```

**Εικ. 10:** Ο NC κώδικας κατεργασίας του δοκιμίου





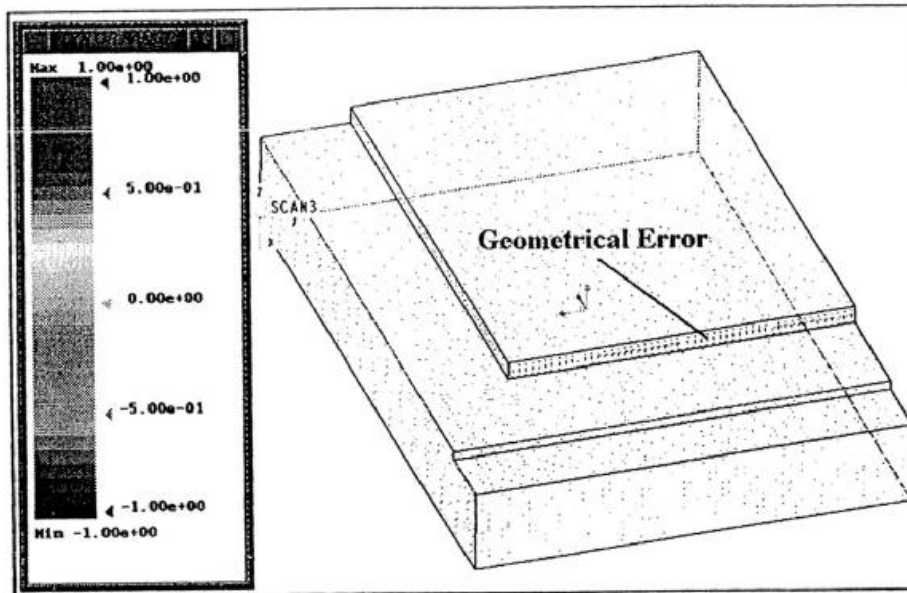
**Εικ. 11:** Αφαίρεση υλικού δοκιμίου



**Εικ. 12:** Αριθμητικές εκτιμήσεις τεchnο-οικονομικών δεδομένων της διεργασίας

### 3.1.3. Αποτελέσματα

Το εξάρτημα που κατασκευάστηκε ελέγχεται από τον χρήστη σχετικά με πιθανά γεωμετρικά λάθη. Αυτό επιτυγχάνεται με την καθολική σύγκριση των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών με το πρωτότυπο μοντέλο CAD του εξαρτήματος (Εικ. 13). Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής δείχνουν πως υπάρχει μια απόκλιση της τάξεως του 1 mm στο πλάτος κοπής του δεύτερου πάσου κατά τον άξονα y. Η αιτία αυτής της απόκλισης, όπως διαπιστώνεται είναι ένα λάθος προγραμματισμού στην εισαγωγή τον NC κώδικα (σκιασμένο κείμενο στη λίστα του NC κώδικα όπως φαίνεται στην Εικ. 10).



**Εικ. 13:** Αποτελέσματα της διαδικασίας του Model Matching

Οι τιμές των τεχνο-οικονομικών μεταβλητών της διαδικασίας, καθώς και οι τιμές των συνιστωσών του χρόνου κύκλου εργασίας παρουσιάζονται στους Πιν. 1 και 2.

Μεταβλητές διεργασίας	Τιμές		
	Πρώτο πάσο	Δεύτερο πάσο	Τρίτο πάσο
Ρυθμός παραγωγής (cm <sup>3</sup> /min)	798.9	1609.7	299.5
Ισχύς στην άτρακτο (kW)	119.85	241.45	44.92
Ροπή στην άτρακτο (N·m)	1907	3842	536
Δύναμη κοπής (N)	38149	76857	10724
Επιφανειακή τραχύτητα (mm)	0.01725	0.01725	0.00963
Πάχος αποβλήτου (mm)	0.295	0.295	0.156
Κόστος ανά κομμάτι (\$)			83.6

**Πιν. 1:** Εκτιμήσεις τεχνο-οικονομικών μεταβλητών της διαδικασίας

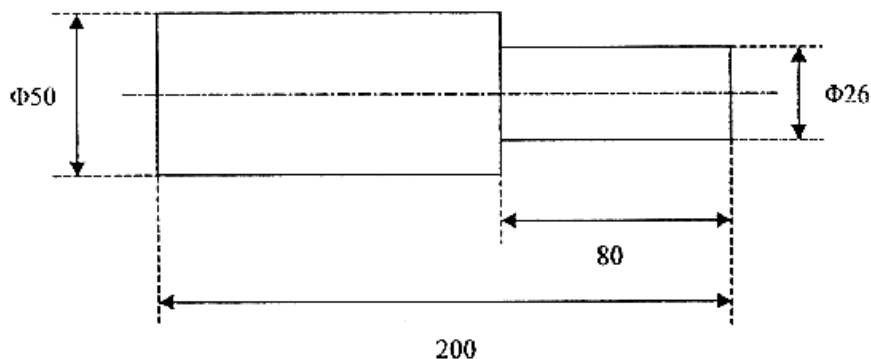
<b>Συνιστώσα χρόνου</b>	<b>Τιμή χρόνου (min : sec)</b>
Χρόνος κατεργασίας (machining)	0 : 24
Χρόνος προετοιμασίας (set-up)	3 : 40
Χρόνος επιδιόρθωσης (repair)	0 : 00
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ</b>	<b>4 : 04</b>

**Πιν. 2:** Εκτίμηση χρόνου κύκλου εργασίας

## 3.2. Διεργασία торνιρίσματος

### 3.2.1. Σενάριο πιλοτικής εφαρμογής

Η γεωμετρία του σχήματος που ζητείται να παραχθεί φαίνεται στην Εικ. 14. Το δοκίμιο είναι ένα κυλινδρικό κομμάτι Carbon Steel 1045 (cold drawn), μήκους 200 mm και ακτίνας 50 mm. Θα χρησιμοποιηθεί κοπτικό εργαλείο τύπου High Speed Steel S4.



Εικ. 10: Το προς κατασκευή εξάρτημα

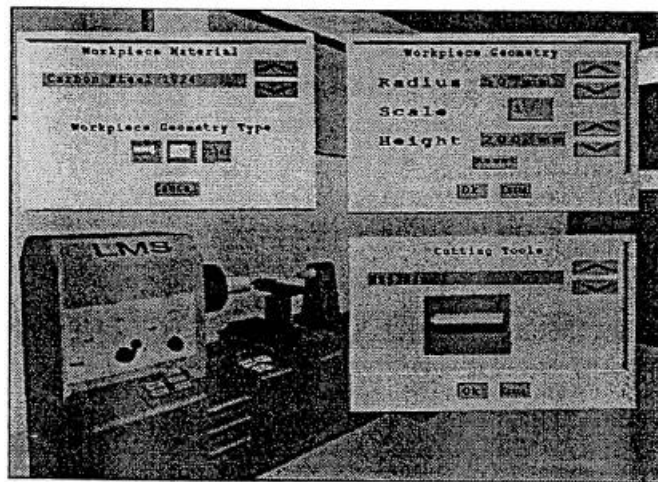
### 3.2.2. Εκτέλεση εικονικής διεργασίας

Ο καθορισμός τον δοκιμίου και η επιλογή του κοπτικού εργαλείου γίνονται μέσα από το γραφικό interface της *Βιβλιοθήκης Υλικών* και της *Βιβλιοθήκης Κοπτικών Εργαλείων* του τόρνου (Εικ. 15). Το κατάλληλο δοκίμιο και κοπτικό εργαλείο τοποθετούνται πάνω στην εικονική εργαλειομηχανή (Εικ. 16). Η διαδικασία κοπής πραγματοποιείται με δύο πάσα χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 3. Ο χειριστής καθορίζει τις παραμέτρους αυτές αλληλεπιδρώντας με τα χειριστήρια του πίνακα ελέγχου του εικονικού τόρνου.

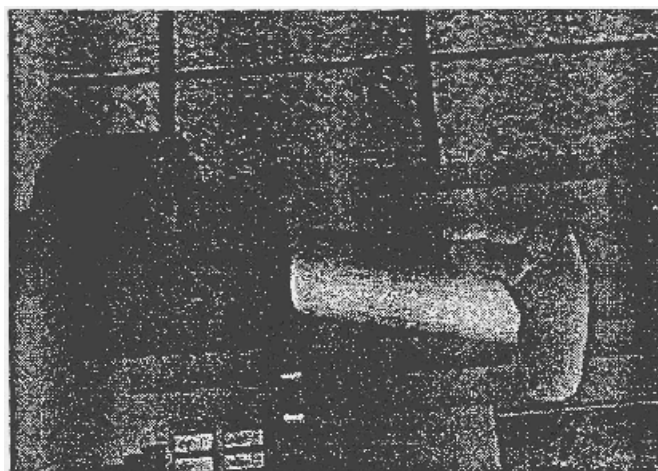
Κατά τη διεξόδυση του κοπτικού εργαλείου στο δοκίμιο ο κώδικας προσομοίωσης του συστήματος αναπαριστά σε πραγματικό χρόνο την αφαίρεση υλικού από το δοκίμιο (Εικ. 17). Ταυτόχρονα, οι τιμές των μεταβλητών ενδιαφέροντος της διεργασίας που επιλέχθηκαν από τον χρήστη υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω των κατάλληλων μοντέλων κοπής. Το περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει ποιοτικές ενδείξεις για το εύρος της δύναμης και της θερμοκρασίας κοπής με χρήση τεχνικών χρωματικής απεικόνισης στη ζώνη κοπής (Εικ. 17). Πέρα από τις οπτικές ενδείξεις, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εποπτείας πάνω στις ποσοτικές εκτιμήσεις για όλα τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος της διεργασίας μέσω των αντίστοιχων γραφικών interfaces παρουσίασης αποτελεσμάτων (Εικ. 18).

Παράμετροι κοπής	Τιμές	
	Πρώτο πάσο	Δεύτερο πάσο
Βάθος κοπής (mm)	8	4
Μήκος κοπής (mm)	80	80
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	48	48
Ταχύτητα ατράκτου (rot/min)	90	120

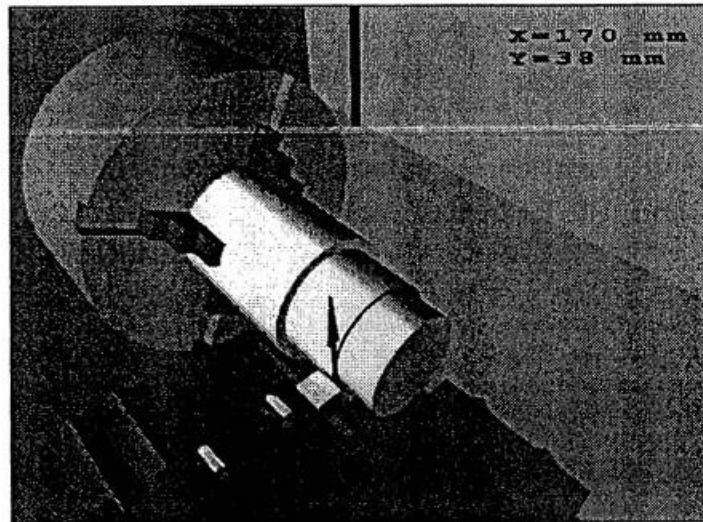
**Πιν. 3:** Παράμετροι κοπής της διεργασίας



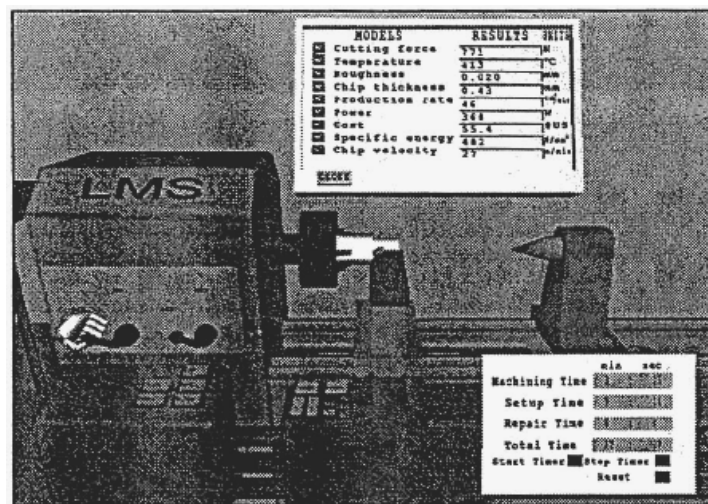
**Εικ. 15:** Ορισμός δοκιμίου και επιλογή κοπτικού εργαλείου



**Εικ. 16:** Τοποθέτηση δοκιμίου στον τόρνο



Εικ. 17: Αφαίρεση υλικού και οπτικοποίηση των χαρακτηριστικών της διεργασίας



Εικ. 18: Αριθμητικές εκτιμήσεις τεχνο-οικονομικών δεδομένων της διεργασίας

### 3.2.3. Αποτελέσματα

Οι τιμές των τεχνο-οικονομικών μεταβλητών της διαδικασίας, καθώς και οι τιμές των συνιστωσών του χρόνου κύκλου εργασίας παρουσιάζονται στους Πιν. 4 και 5.

Μεταβλητές διεργασίας	Τιμές	
	Πρώτο πάσο	Δεύτερο πάσο
Δύναμη κοπής (N)	2057	771
Θερμοκρασία (°C)	428	413
Επιφανειακή τραχύτητα (mm)	0.036	0.020
Ειδική ενέργεια (N/mm <sup>2</sup> )	482	482
Ισχύς (kW)	814	368
Πάχος αποβλήτου (mm)	0.57	0.43
Ταχύτητα αποβλήτου (m/min)	22	27
Ρυθμός παραγωγής (cm <sup>3</sup> /min)	101	46
Κόστος ανά κομμάτι (\$)	-	55.4

**Πιν. 4:** Εκτιμήσεις τεχνο-οικονομικών μεταβλητών της διαδικασίας

Συνιστώσα χρόνου	Τιμή χρόνου (min : sec)
Χρόνος κατεργασίας (machining)	3 : 23
Χρόνος προετοιμασίας (set-up)	9 : 14
Χρόνος επιδιόρθωσης (repair)	0 : 0
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ</b>	<b>12 : 37</b>

**Πιν. 5:** Εκτίμηση χρόνου κύκλου εργασίας

## 4. Συζήτηση

---

Στο κεφάλαιο αυτό διεξάγεται μία συζήτηση πάνω στα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συνολική θεώρηση της νέας μεθοδολογίας προσομοίωσης και της πιλοτικής της υλοποίησης. Κατ' αρχήν γίνεται μια συγκριτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που χαρακτηρίζουν τα αποτελέσματα της παρούσας μεθοδολογίας, σε σχέση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις προσομοίωσης μηχανουργικών διεργασιών. Ακολούθως παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογών των ερευνητικών αποτελεσμάτων, καθώς και τα αντίστοιχα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτή.



## 4.1. Πλεονεκτήματα & περιορισμοί της νέας προσέγγισης

Ακολουθεί μία συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πιλοτικές εφαρμογές του Μηχανουργείου του Μέλλοντος, σε σχέση με ευρέως χρησιμοποιούμενες σήμερα προσεγγίσεις.

Συγκρινόμενες προσεγγίσεις	Πλεονεκτήματα του ΜtM	Μειονεκτήματα του ΜtM
<i>Αλφαριθμητική προσομοίωση</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σχεδιασμός και έλεγχος της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου.</li> <li>• Προσομοίωση φαινομένου αφαίρεσης υλικού και γεωμετρικής διαμόρφωσης.</li> <li>• Προσομοίωση φυσικών αλληλεπιδράσεων κρίσιμων συντελεστών της διεργασίας.</li> <li>• Υποστήριξη για διαδικασίες εκπαίδευσης στη διεξαγωγή των διεργασιών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρήση απλών μοντέλων εκτίμησης μεταβλητών της διεργασίας</li> <li>• Αγνόηση εξειδικευμένων φαινομένων, όπως ταλαντώσεις, τρισδιάστατες κατανομές τάσεων-παραμορφώσεων κτλ.</li> <li>• Βελτιστοποίηση παραμέτρων κοπής μέσω δοκιμής και λάθους</li> </ul>
<i>Γραφική προσομοίωση στην οθόνη του ΗΥ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προσομοίωση φυσικών αλληλεπιδράσεων κρίσιμων συντελεστών της διεργασίας.</li> <li>• Ποσοτικές εκτιμήσεις για βασικές μεταβλητές των διεργασιών.</li> <li>• Ρεαλιστική αλληλεπίδραση με διεργασία, μηχανές και περιβάλλον εργασίας</li> <li>• Υποστήριξη για διαδικασίες εκπαίδευσης στη διεξαγωγή των διεργασιών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένος αριθμός υποστηριζόμενων διεργασιών και αξόνων κατεργασίας.</li> <li>• Έλλειψη εργαλείων μετεπεξεργασίας δεδομένων κοπής.</li> </ul>
<i>Προσομοίωση σε εικονικά περιβάλλοντα (υπάρχουσες εφαρμογές)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ποσοτικές εκτιμήσεις για βασικές μεταβλητές των διεργασιών.</li> <li>• Αλληλεπίδραση μέσω “εμβύθισης” και διαισθητικού χειρισμού αντικειμένων.</li> <li>• Υποστήριξη εκπαίδευσης μέσω ρεαλιστικής εξάσκησης και παροχής καθοδήγησης.</li> </ul>	

**Πιν. 6:** Συγκριτικά πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα του Μηχανουργείου του Μέλλοντος (MtM)

Βασιζόμενο σε τεχνικές Εικονικής Πραγματικότητας, το Μηχανουργείο του Μέλλοντος καθιστά δυνατή την εμβύθιση σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον εργασίας και την αλληλεπιδραστική εκτέλεση μηχανουργικών διεργασιών. Μέσα στο περιβάλλον αυτό, ο χρήστης μπορεί να προετοιμάσει τη διεξαγωγή μιας διεργασίας, να χειριστεί μια εργαλειομηχανή, να επεξεργαστεί και να εκτελέσει ένα NC πρόγραμμα κοπής. Λειτουργίες

ποιοτικής και ποσοτικής ανάδρασης πραγματικού χρόνου από το περιβάλλον υποστηρίζουν την εκτέλεση της διεργασίας και παρέχουν εποπτεία στα τεχνο-οικονομικά χαρακτηριστικά της. Στα πλαίσια πιλοτικών χρήσεων του Μηχανουργείου του Μέλλοντος περιγράφηκαν δύο εφαρμογές, μια διεργασία φρεζαρίσματος και μία διεργασία τορνιρίσματος. Οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζουν τις δυνατότητες του εικονικού περιβάλλοντος προσομοίωσης να ανταποκριθεί στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά πραγματικών σεναρίων διεξαγωγής μηχανουργικών διεργασιών.

Η απαραίτητη λειτουργικότητα για την επίτευξη ακριβούς αναπαράστασης της πραγματικότητας ή την αντιμετώπιση εξειδικευμένων απαιτήσεων στα πλαίσια διεξαγωγής μιας διεργασίας, δεν παρέχεται ακόμα από το Μηχανουργείο του Μέλλοντος. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των πιλοτικών εφαρμογών αποδεικνύουν τη δυνατότητα εφαρμογής και τη χρησιμότητα της νέας προσέγγισης εικονικού πειραματισμού για την υποστήριξη διαδικασιών σχεδιασμού και εκπαίδευσης μηχανουργικών διεργασιών. Επιπλέον, καταδεικνύουν τη δυνατότητα της προσέγγισης να παρέχει σημαντικά οφέλη σε αυτόν τον τομέα εφαρμογών, σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους και τεχνικές προσομοίωσης. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει η πιλοτική υλοποίηση της νέας προσέγγισης σε σχέση με αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πιν. 6.

## 4.2. Πεδία εφαρμογής των ερευνητικών αποτελεσμάτων

Το περιβάλλον του Μηχανουργείου του Μέλλοντος αποτελεί ένα εργαλείο σχεδιασμού και επαλήθευσης μηχανουργικών διεργασιών αφαίρεσης υλικού. Οι λειτουργίες που παρέχει υποστηρίζουν μηχανικούς και χειριστές εργαλειομηχανών στην αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών μεταβλητών απόφασης κατά τη διάρκεια σχεδιασμού της διεργασίας. Η υποστήριξη αυτή αναφέρεται στη διεξαγωγή της διαδικασίας σχεδιασμού, επαλήθευσης επανασχεδιασμού, μέσα από την προετοιμασία και εκτέλεση μιας διεργασίας σε ένα εικονικό περιβάλλον προσομοίωσης. Πέρα από την αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών μεταβλητών απόφασης, το Μηχανουργείο του Μέλλοντος βρίσκει εφαρμογή στην εκτίμηση χαρακτηριστικών σχεδιασμού της παραγωγικής διαδικασίας που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του ανθρώπου-χειριστή με τη διεργασία, την εργαλειομηχανή και το περιβάλλον εργασίας. Σε επίπεδο παραγωγικού συστήματος, τα πεδία αυτά εφαρμογών σχετίζονται με τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται ο σχεδιασμός μιας νέας διαδικασίας για την παραγωγή ενός προϊόντος, ή η προσαρμογή μιας υπάρχουσας διαδικασίας σε καινούργιο παραγωγικό εξοπλισμό.

Με τη δυνατότητα ρεαλιστικού εικονικού πειραματισμού που παρέχει το περιβάλλον προσομοίωσης του Μηχανουργείου του Μέλλοντος μειώνεται σημαντικά η ανάγκη διεξαγωγής φυσικών πειραματισμών στα πλαίσια της επαλήθευσης του σχεδιασμού μιας φυσικής διεργασίας. Σαν αποτέλεσμα περιορίζεται το κόστος επαλήθευσης εναλλακτικών σχεδιασμών, καθώς μειώνεται η ανάγκη δέσμευσης πραγματικών παραγωγικών πόρων του συστήματος και ανάλωσης πρώτων υλών και εργαλείων. Επιπλέον, εξελίσσεται ο κίνδυνος ατυχημάτων ή ζημιών σε ακριβό παραγωγικό εξοπλισμό.

Το περιβάλλον του Μηχανουργείου του Μέλλοντος αποτελεί επίσης ένα εργαλείο εκπαίδευσης χειριστών εργαλειομηχανών. Οι λειτουργίες ρεαλιστικής αλληλεπίδρασης που παρέχει στον χρήστη βρίσκουν εφαρμογή σε διαδικασίες εξοικείωσης και απόκτησης βασικής επιδεξιότητας στον χειρισμό και έλεγχο των λειτουργιών πραγματικών εργαλειομηχανών. Επιπλέον, κατάλληλα εργαλεία επιτρέπουν την πρακτική εξάσκηση στην παραγωγή NC προγραμμάτων κοπής, με χρήση αντίστοιχων πινάκων ελέγχου, για την αυτόματη οδήγηση πραγματικών εργαλειομηχανών. Καθοδήγηση και προειδοποιητικά μηνύματα που παρέχονται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται για την απόκτηση επιτηδειότητας στη συνδυασμένη χρήση θεωρητικής γνώσης και πρακτικής εμπειρίας για την αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη διεξαγωγή της διεργασίας. Σε επίπεδο παραγωγικού συστήματος, τα πεδία αυτά εφαρμογών σχετίζονται με τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται η εκπαίδευση νέου προσωπικού, ή η εκπαίδευση υπάρχοντος προσωπικού στη διεξαγωγή μιας νέας διαδικασίας ή στη χρήση καινούριου παραγωγικού εξοπλισμού.

Η δυνατότητα ρεαλιστικής πρακτικής εξάσκησης που παρέχει το Μηχανουργείο του Μέλλοντος επιτρέπει τη μείωση του χρόνου που απαιτείται υπό πραγματικές συνθήκες εργασίας για την εκπαίδευση χειριστών εργαλειομηχανών. Σαν αποτέλεσμα, μειώνεται σημαντικά το κόστος εκπαίδευσης που προέρχεται από τη χρήση παραγωγικού εξοπλισμού και την ανάλωση πρώτων υλών και εργαλείων. Επιπλέον, αποφεύγεται η άμεση αλληλεπίδραση του εκπαιδευόμενου με πραγματικές εργαλειομηχανές στα πρώτα στάδια εκπαίδευσης τα οποία είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε ατυχήματα και πρόκληση ζημιών.

## 5. Βιβλιογραφία

---

1. Angster, S., and Jayaram S., 1997, "Architecture for Flexible Virtual Manufacturing Environments", *International Journal of Virtual Reality* Vol. 3, No. 1, pp. 6-18.
2. ASM Handbook Committee, 1978, "Metals Handbook", American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
3. Astheimer, P., Felger W., and Mueller S., 1993, "Virtual Design: A Generic VR System for Industrial Applications", *Computers & Graphics* Vol. 17, No. 6, pp. 671-677.
4. Aukstakalnis S., and Blatner D., 1992, "Silicon Mirage, The Art and Science of Virtual Reality", Peachpit-Press.
5. Barrus, J. W., 1993, "The Virtual Workshop: A Simulated Environment for Mechanical Design", Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
6. Beier, K. P., 1994, "Virtual Reality in Automotive Design and Manufacturing", *Proceedings of the Convergence '94 International Congress on Transportation Electronics*, SAE (Society of Automotive Engineers), Dearborn, Michigan, pp. 241-247.
7. Blackmore, D., Leu, M. C., and Wang L. P., 1997, "The sweep-envelope differential equation algorithm and its application to NC machining verification", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 629-637.
8. Bowyer, A.; Bayliss G., Taylor R., and Willis P., 1996, "A Virtual Factory", *International Journal of Shape Modelling*; Vol. 2, No. 4, pp. 215-226:
9. Chryssolouris, G., 1992, "Manufacturing Systems, Theory and Practice", Springer-Verlag, New York.
10. Chryssolouris G., Mavrikios D., Fragos D., and Karabatsou V., 2000. "A Virtual Reality based experimentation environment for the verification of human related factors in assembly processes", *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 16, No 4, pp. 267-276.
11. Chryssolouris G., Mavrikios D., Fragos D., Karabatsou V., and Pistiolis K., 1999 $\alpha$ , "A novel virtual experimentation approach to planning and training for manufacturing processes", submitted for publication to the *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.
12. Chryssolouris G., Mavrikios D., Karabatsou V., Fragos D., Sarris I., and Mourtzi $\acute{s}$  D., 1999b, "A Virtual Reality based approach for the verification of human related factors in assembly and maintenance processes", *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Ergonomics and Safety*, Barcelona, Spain, pp. 19-21.
13. Chryssolouris G., Mavrikios D., Mourtzi $\acute{s}$  D., Pistioli $\acute{s}$  K., and Fragos D., 1999c, "An Integrated Virtual Manufacturing Environment for Interactive Process Design and

Training-The Virtual Machine Shop", Proceedings of the 32<sup>nd</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Leuven, pp. 409-415.

14. Dai, F., 1998, "Virtual Reality for Industrial Applications", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

15. Dani, T., and Gadh R., 1997, "Creation of concept shape designs via a virtual reality interface", Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, pp. 555-563.

16. DeVries, W. R., 1992, "Analysis of Material Removal Processes", Springer-Verlag, New York.

17. Dragomatz, D., and Mann S., 1997, "A classified bibliography of literature on NC milling path generation", Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 3, pp. 239-247.

18. Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes J., 1997, "Computer Graphics. Principles and Practice", Addison Wesley.

19. Garcia-Alonso, A., Serrano, N., and Flaquer J., 1994, "Solving the collision detection problem", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 13, No. 3; pp. 36-43.

20. Goebel, M., 1996. "Industrial Applications of Virtual Environments." IEEE Computer Graphics & Applications, pp. 10-13.

21. Gupta, R., Whitney, D., and Zeltzer D., 1997. "Prototyping and Design for Assembly analysis using Multimodal virtual environments", Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, pp. 585-597.

22. Hartquist, E. E., Menon J. P., Suresh, K., Voelcker, H. B., and Zagajac J., 1999. "A computing strategy for applications involving offsets, sweeps, and Minkowski operations". Computer-Aided Design, Vol. 31, No. 3, pp. 175-183.

23. Hubbard, P. M., 1995. "Collision Detection for Interactive Graphics Applications", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 1, No. 3, pp. 218-230.

24. Iwata, K., Onosato, M., Teramoto, K., and Osaki S., 1995, "A Modelling and Simulation Architecture for Virtual Manufacturing Systems", Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 399-402.

25. Jawahir, LS., Dillon, O.W. Jr., Balaji, A.K., Redetzky, M., and Fang N., 1998, "Predictive modeling of machining performance in turning operations", Machining Science and Technology. Vol. 2, pp. 253-276.

26. Jayaram, S., Connacher, H.I., and Lyons K. W., 1997, "Virtual assembly using virtual reality techniques", Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, pp. 575-584.

27. Kalpakjian, S., 1985, "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Addison . Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

28. Kimura, F., 1993, "Product and Process Modelling as a Kernel for Virtual Manufacturing Environment", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 147-150.
29. Kress, H., Rix, J., and Kiolein I., 1995, "CAD data preparation in a virtual prototyping environment", *Proceedings of the IFIP WG 5.3 International Conference on Life-Cycle Modeling for Innovative Products and Processes*, Berlin, pp. 301-312.
30. Krueger, M., 1991, "Artificial Reality II", Addison Wesley.
31. Lu, S. C-Y., Shpitalni, M., and Gadh R., 1999, "Virtual and Augmented Reality Technologies for Product Realization", *Annals of the CIRP*, Vol. 48, No. 2, pp. 1-25.
32. Machinability Data Center, 1980, "Machining Data Handbook", Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, Ohio.
33. Mackerle, J., 1999, "Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 86, pp. 17-44.
34. Marshall, S., and Griffiths J. G., 1994, "A survey of cutter path construction techniques for milling machines", *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 12, pp. 2861-2877.
35. Mavrikios D., and Chryssolouris G., 1998, "Digital Mock-up Process Simulation", *Proceedings of the 3'd Aero days Post-Conference, Nouvelle Revue d' Aeronautique et d' Astronautique*, No 2, pp. 29-33.
36. Mavrikios, D., Mourtzis D., Fragos D., and Chryssolouris G., 1998, "A Simulation Environment For Interactive Virtual Performance Of Machining Processes", *Proceedings of the 9th International Conference on Production Technology*, Berlin, pp. 323-329.
37. National Research Council, 1995. "Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges", National Academy Press, Washington.
38. Onosato, M., and Iwata K., 1993. "Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models", *Annals of the CIRP* Vol. 42, No. 1, pp. 475-478.
39. Park, K. S., and Kim S. H., 1998, "Artificial intelligence approaches to determination of CNC machining parameters in manufacturing: a review", *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 12, pp. 127-134.
40. Ponamgi, M. K., Manocha, D., and Lin M. C., 1997, "Incremental Algorithms for Collision Detection Between Polygonal Models", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, No. 1, pp. 51-64.
41. Rowe, W.B., Yan L., Inasaki I., and Malkin S., 1994, "Applications of Artificial Intelligence in Grinding", *Annals of the CIRP* Vol. 43, No. 2, pp. 521-531.





