

Tehnologii de Fabricație Aditivă

# Curs 5: Aplicații Industriale ale Fabricației Aditive – De la Idee la Realitate Industrială

---

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie  
POLITEHNICA București

Facultatea de Mecanică și Tehnologie

Program de master: Ingineria și Managementul Fabricației Produselor

**Titular curs:**  
Prof. dr. ing. Daniel-Constantin ANGHEL

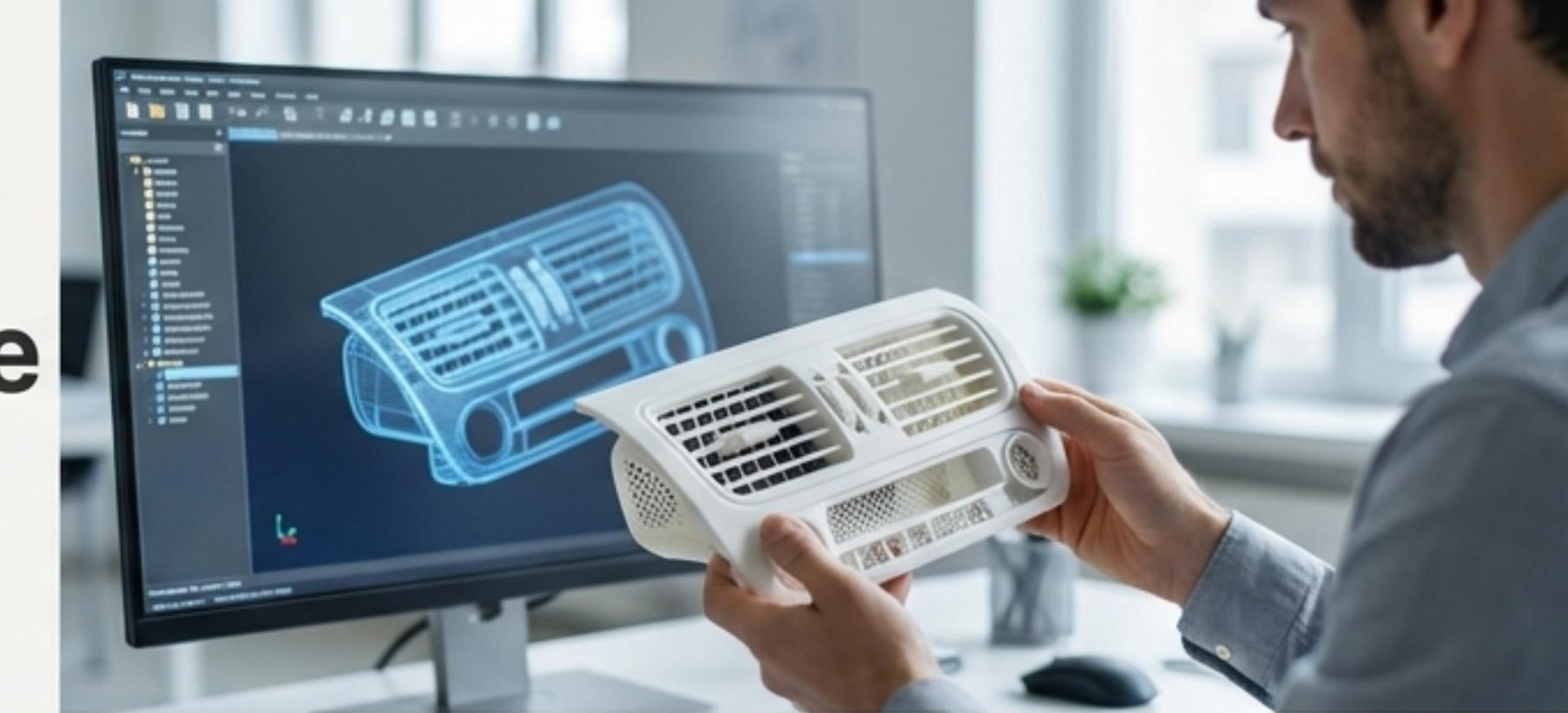


# Călătoria noastră: Evoluția Fabricației Aditive de la instrument de vizualizare la motor al inovației industriale.



- 1. Fundamentul: Prototiparea Rapidă**  
Materializarea rapidă a ideilor și validarea conceptelor.
- 2. Saltul Paradigmatic: Piesele Funcționale**  
Trecerea de la modele vizuale la componente de uz final, capabile să preia sarcini.
- 3. Transformarea Industrială: Studii de Caz**  
Analiza modului în care sectoarele cheie (Auto, Aerospațial, Medical) valorifică FA.
- 4. Provocarea Inginerului: Atingerea Preciziei**  
Un studiu de caz avansat despre optimizarea dimensională, esențială pentru componente funcționale.

# Fundamentul: Prototiparea Rapidă – Revoluția ciclului de dezvoltare a produsului.



**Fabricația Aditivă** a redus dramatic ciclul „Proiectare – Construire – Testare” de la **săptămâni/luni la ore/zile**.



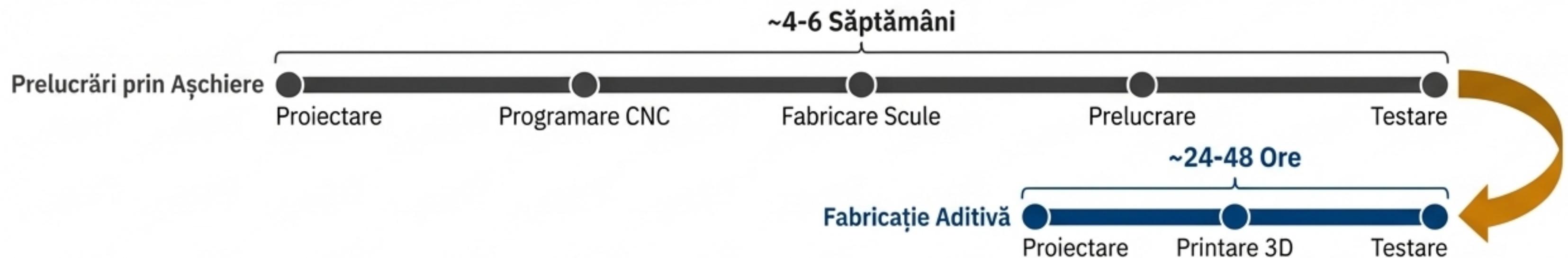
**Validare rapidă a designului:** Verificarea formei, ergonomiei și a modului de asamblare (fit and form).



**Comunicare eficientă:** Modelele fizice facilitează colaborarea între ingineri, designeri și management.



**Reducerea costurilor și a riscurilor:** Identificarea timpurie a erorilor de proiectare, înainte de a investi în scule scumpe.



# Saltul Paradigmatic: De la Prototip la Piesă Funcțională de Uz Final.



PROTOTIP VIZUAL



PIESĂ FUNCȚIONALĂ

**Piesă Funcțională:** O componentă integrată în produsul final, care preia sarcini mecanice, termice sau chimice și îndeplinește cerințe de performanță pe durata de viață a produsului.

Factorii tranziției:

**1. Evoluția Materialelor:**

- Polimeri de înaltă performanță (ex: PMMA, cu rezistență ridicată la impact).
- Materiale compozite (armare cu fibră de carbon/sticlă).
- Aliaje metalice (Titan, Inconel, Aluminiu) pentru aplicații critice.

**2. Maturitatea Proceselor:**

- Tehnologii mai rapide, mai fiabile și mai precise.
- Exemplu: Tehnologia CLIP (Continuous Liquid Interface Production) care elimină procesul strat-cu-strat discret pentru o viteză superioară.

# Industria Auto: Accelerarea inovației de la scule personalizate la componente de serie

## Studiu de caz 1: Scule, Dispozitive și Verificatoare (SDV-uri)



### Problema:

Proiectarea și fabricarea SDV-urilor prin metode tradiționale este costisitoare și lentă, încetind liniile de asamblare.

### Soluția AM:

Printarea 3D rapidă de SDV-uri personalizate, ergonomice și ușoare, direct pe linia de producție. Rezultat: Reduceri de costuri și timp de execuție de peste 80%.

## Studiu de caz 2: Prototipuri Funcționale și Piese de Serie Mică



### Problema:

Fabricarea de piese complexe (ex. galerii de admisie, carcase) pentru vehicule de test sau serii limitate este neeconomică prin metode clasice (matrițare).

### Soluția AM:

Producerea directă a acestor piese, permitând testarea și validarea rapidă a unor designuri inovatoare.

# Domeniul Aerospațial: Performanță redefinită prin greutate minimă și complexitate maximă.

## Dilema inginerului aerospațial:

Fiecare gram economisit se traduce în economii substanțiale de combustibil și performanță sporită. Obiectivul este maximizarea rigidității și rezistenței la o greutate minimă.

## Soluții unice oferite de Fabricația Aditivă:

- **Optimizare Topologică:**

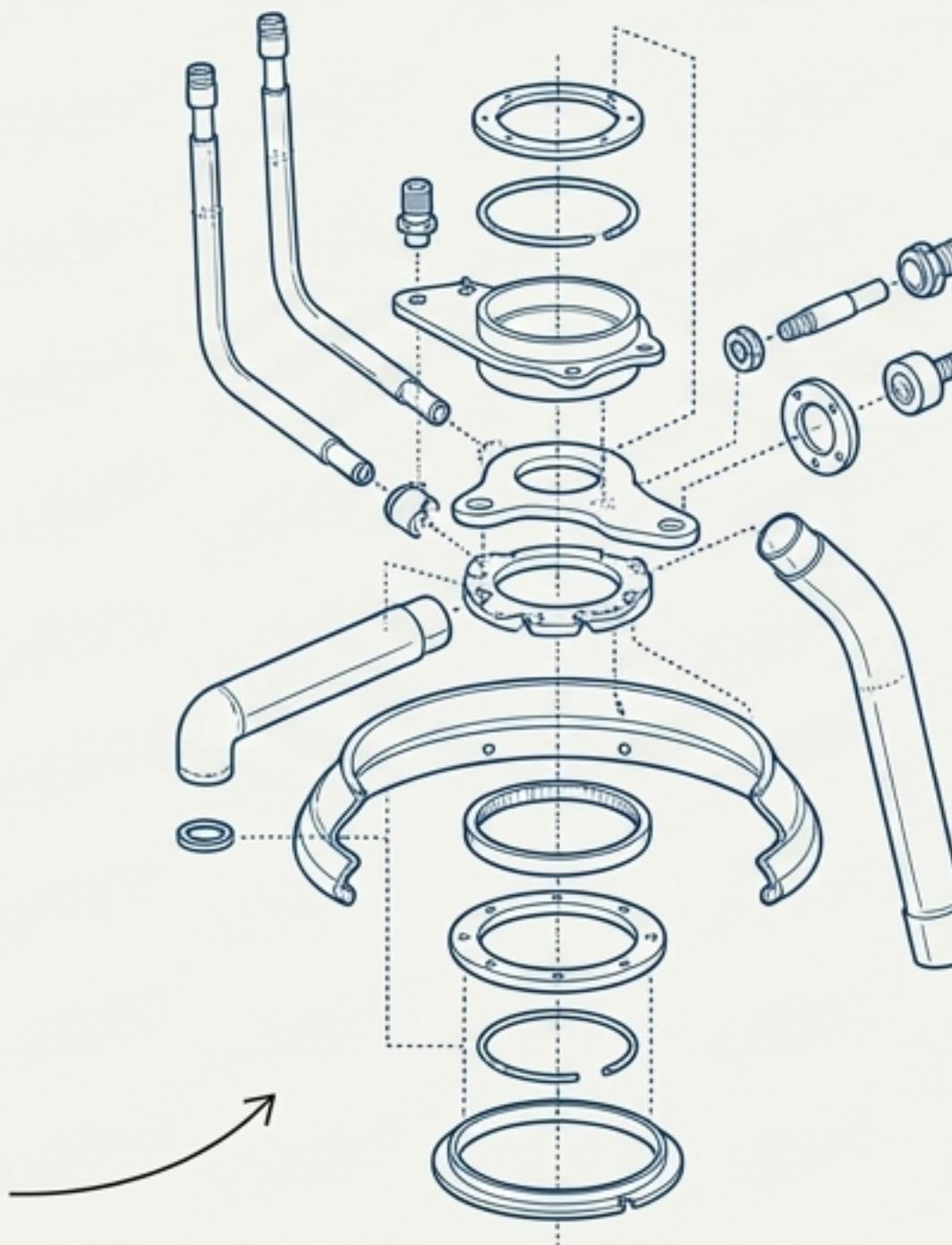
Algoritmi software care elimină materialul din zonele fără sarcini, creând structuri „organice”, extrem de eficiente.

- **Consolidarea Ansamblurilor:**

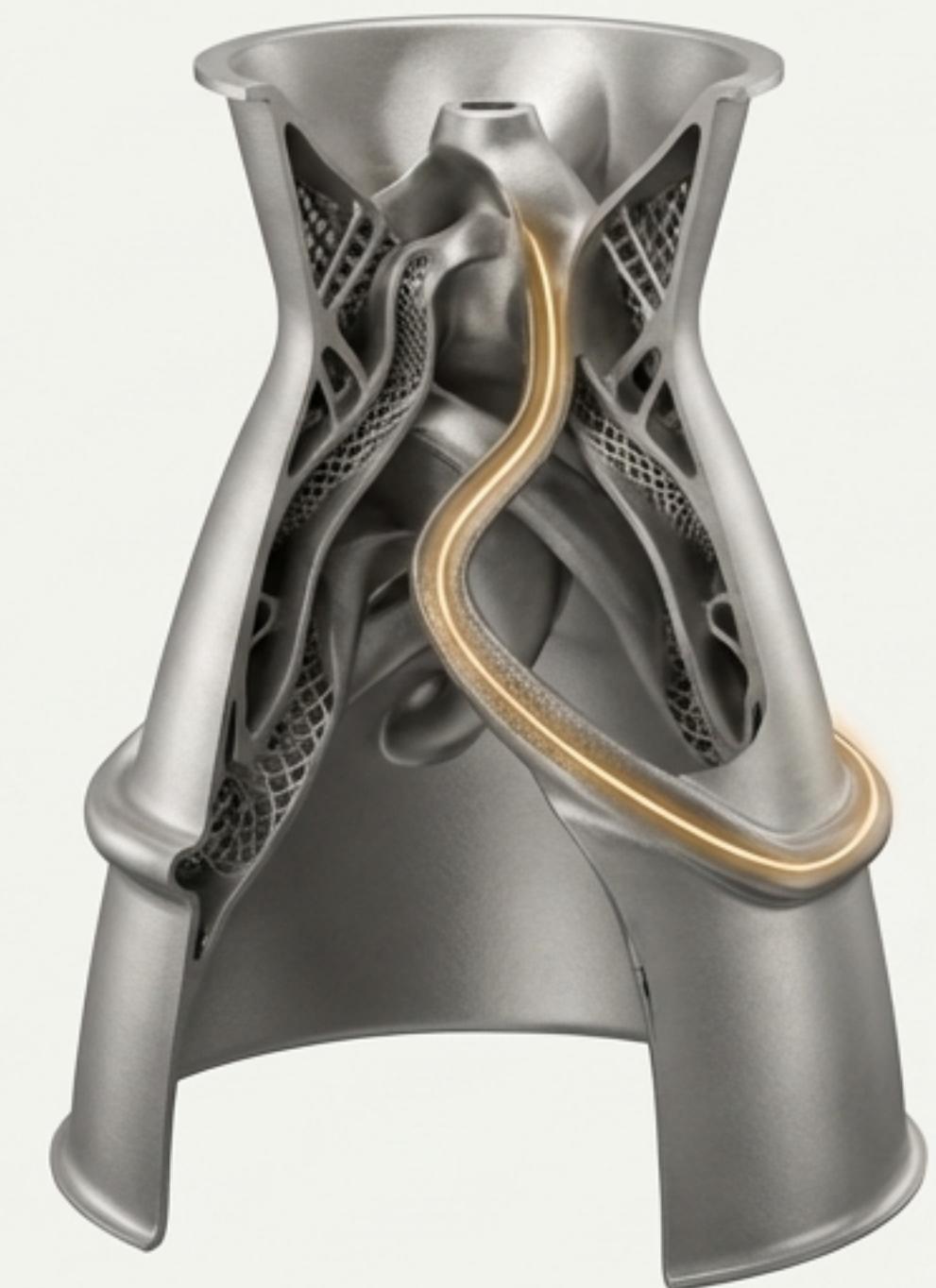
O singură piesă printată 3D poate înlocui un ansamblu complex format din zeci de componente. Avantaje: eliminarea elementelor de fixare, reducerea greutății și simplificarea lanțului de aprovizionare.

*Exemplu emblematic: Duza de combustibil pentru motorul GE LEAP.*

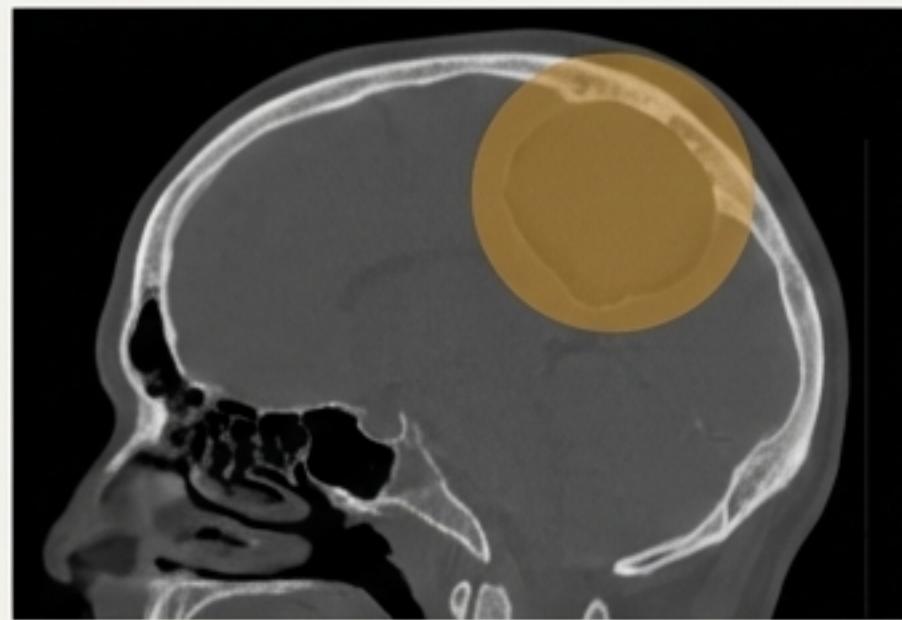
ANSAMBLU TRADITIONAL



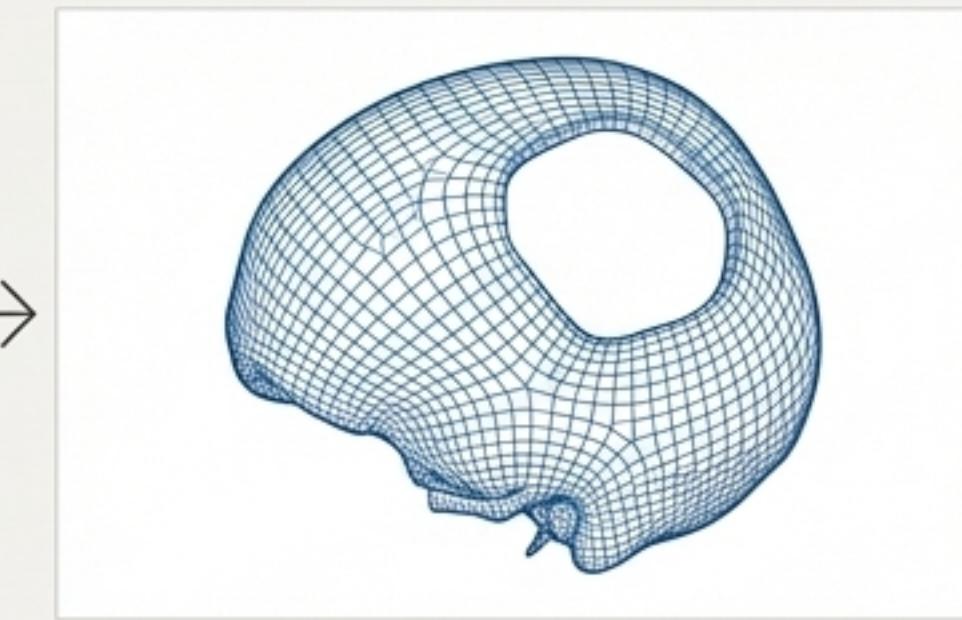
PIESĂ UNICĂ PRINTATĂ 3D



# Domeniul Medical: Revoluția medicinei personalizate



1. Date CT/MRI specifice pacientului



2. Modelare CAD a implantului personalizat



3. Printare 3D a implantului final

## Paradigma:

Anatomia umană este unică. Soluțiile standardizate sunt un compromis. FA permite crearea de dispozitive 100% personalizate.

## Aplicații:



- **Implanturi specifice pacientului:** Pe baza datelor CT/MRI, se printează implanturi (craniene, maxilo-faciale, ortopedice) care se potrivesc perfect. Se menționează utilizarea PMMA ca ciment osos pentru fixarea protezelor.



- **Ghiduri chirurgicale:** Instrumente printate 3D, specifice unei operații, care ghidează tăieturile și perforările chirurgului cu o precizie submilimetrică.



- **Orizontul următor: Bioprintarea:** Introducerea conceptului de printare cu „bio-cerneală” (celule vii și biomateriale) pentru a crea structuri biologice. Se menționează compania Cellink și cerneala pe bază de alginat.

# Bunuri de Consum și Construcții: De la personalizare în masă la geometrii fără precedent.

## Bunuri de Consum & Design

Focus: Libertate de design și personalizare.

- Echipament sportiv adaptat anatomiei atletului, bijuterii complexe, obiecte decorative cu finisaje unice.

## Inovații materiale:

Filamentele de la Fiberlogy (ex. **FIBERSATIN** pentru finisaj semi-mat, **FIBERWOOD** cu aspect de lemn) ilustrează varietatea estetică.

## Construcții – O frontieră nouă

**3D Concrete Printing (3DCP)** – extrudarea controlată de robot a unui mortar special pentru a construi structuri strat cu strat.

- Viteză de execuție, reducerea deșeurilor, libertate geometrică pentru arhitecți.

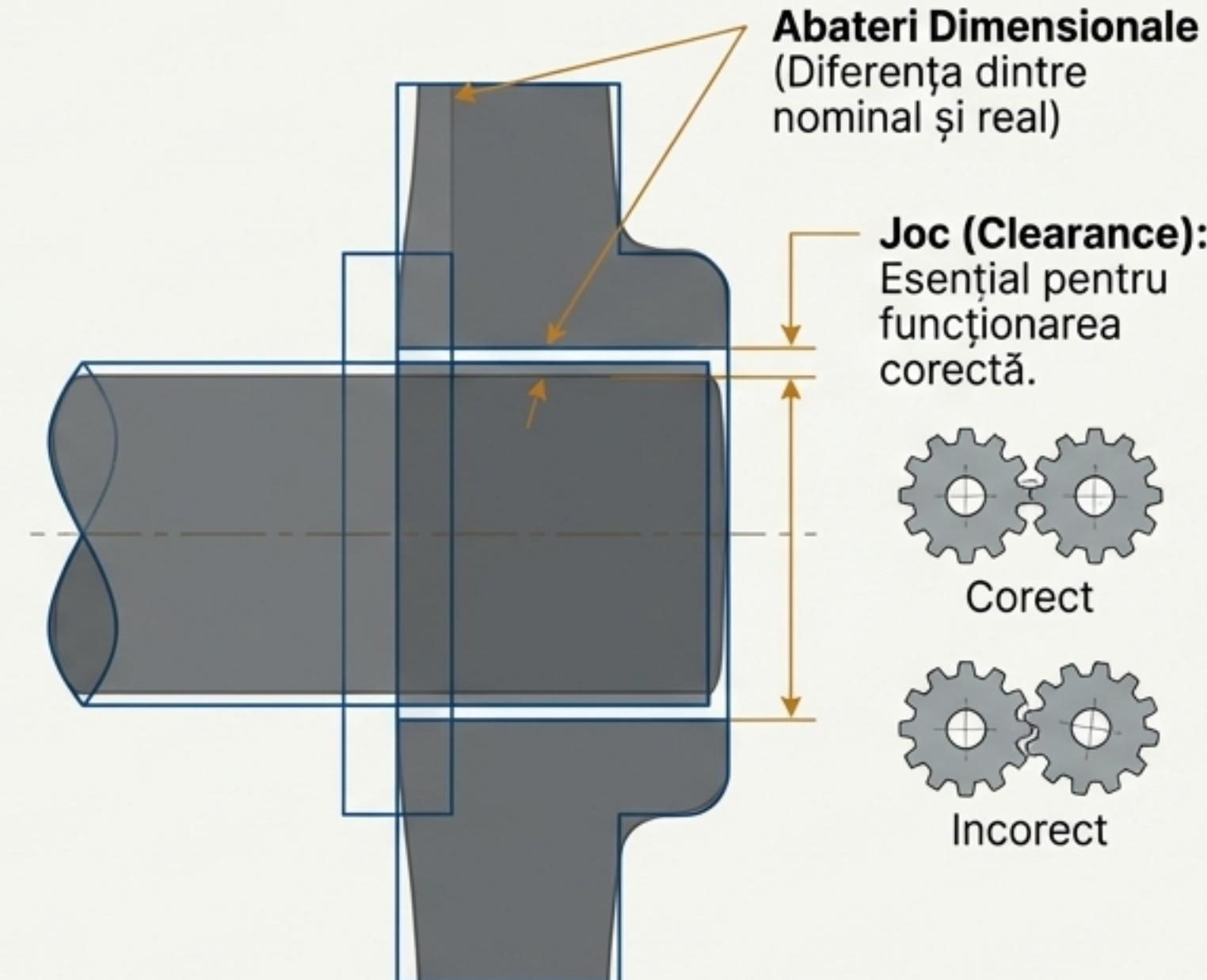


# Provocarea reală a inginerului: Precizia dimensională.

## Idea Centrală

Pentru piese funcționale, în special cele care fac parte din ansambluri, nu este suficient să printezi forma.

Trebuie să controlezi dimensiunile cu precizie.



## Cauzele Abaterilor în FDM

- Contractia termică a materialului la răcire.
- Deformarea (warping) din cauza tensiunilor interne.
- Erori inerente procesului de depunere strat cu strat.

**Întrebarea cheie pentru inginer:** Cum gestionăm **zecile de parametri** ai procesului de printare (grosime strat, viteză, temperatură, umplere) pentru a obține **dimensiunile dorite, în toleranțele prescrise de proiect?**

# Studiu de Caz Avansat: Optimizarea preciziei dimensionale pentru arbori și butuci canelați (FDM).

## Contextul problemei (extras din lucrarea științifică)

### Rolul componentei:

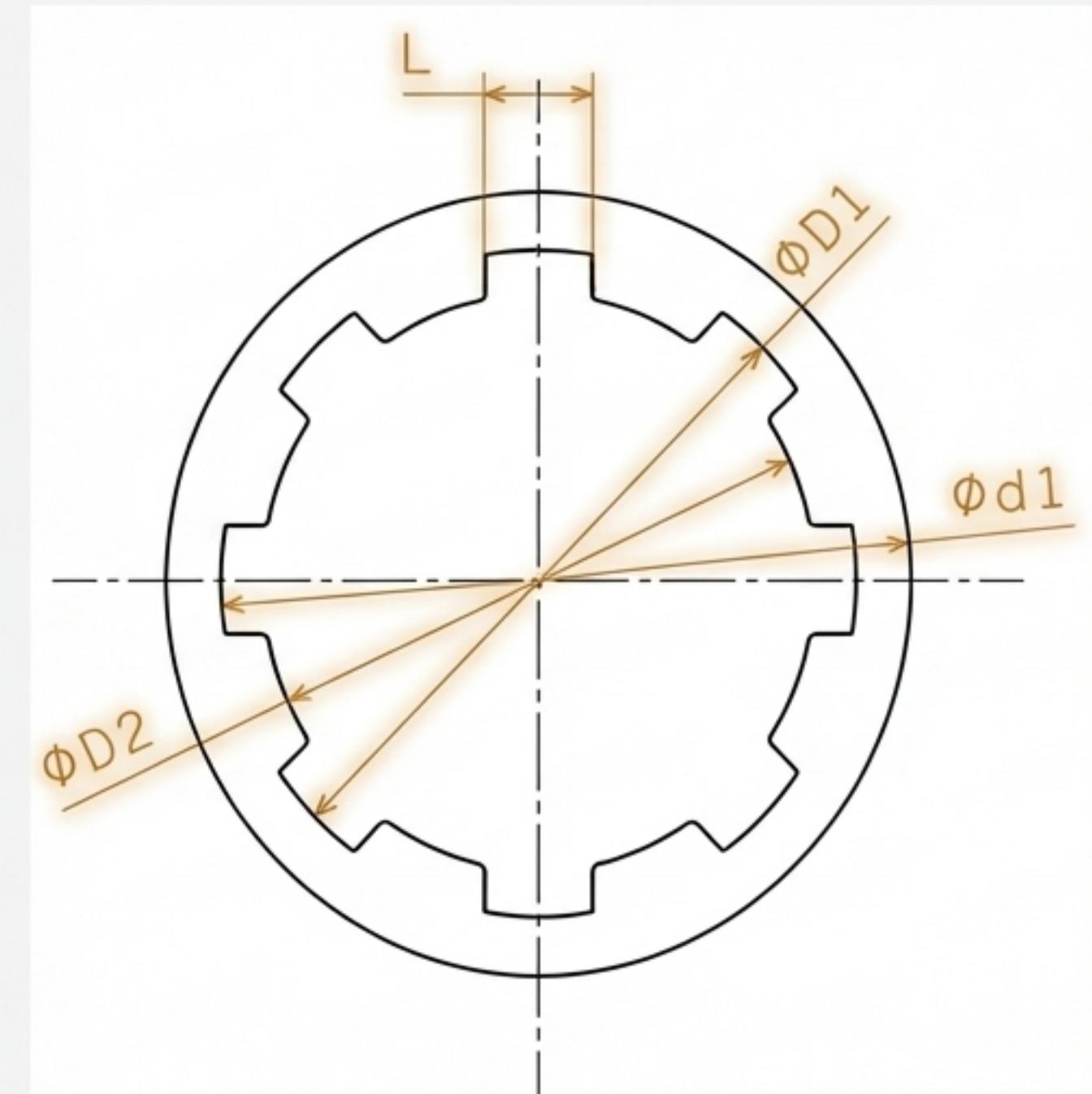
Îmbinările canelate sunt critice în sistemele mecanice pentru transmiterea precisă a cuplului și aliniere.

### Provocarea:

Abaterile dimensionale în aceste geometrii complexe pot afecta grav precizia asamblării, stabilitatea și durabilitatea.

## Obiectivele Cercetării

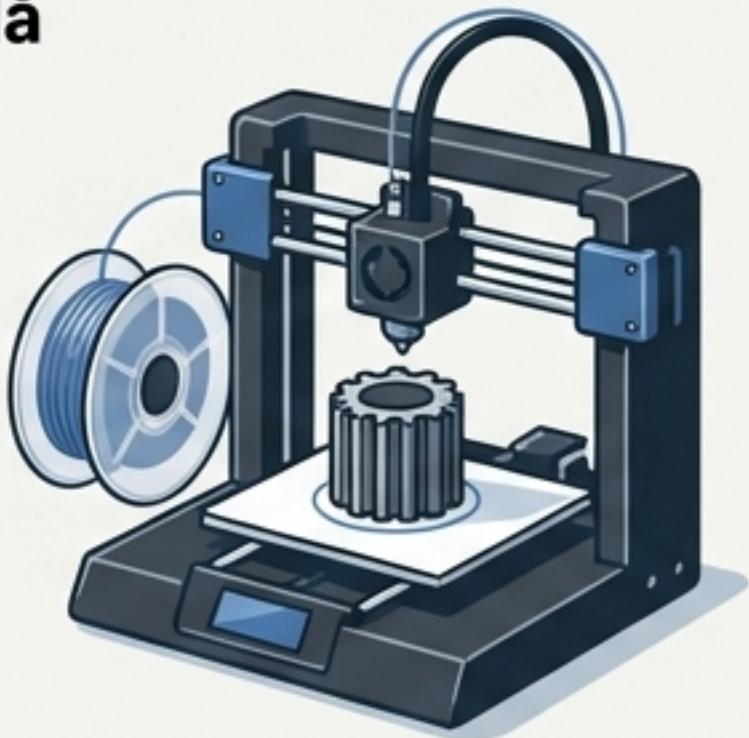
1. Analiza influenței parametrilor cheie de printare FDM: grosimea stratului, densitatea umplerii și diametrul nominal.
2. Dezvoltarea unui model predictiv folosind Rețele Neuronale Artificiale (ANN) pentru a estima abaterile.
3. Optimizarea multi-obiectiv a parametrilor folosind Algoritmi Genetici (GA) pentru a minimiza simultan erorile dimensionale.



# Metodologia: O abordare hibridă – de la experiment la optimizare AI.

## 1. Proiectare Experimentală (DOE):

S-a utilizat un plan experimental factorial complet pentru a acoperi sistematic spațiul de parametri (3 parametri x 3 niveluri = 27 de configurații unice, replicate).

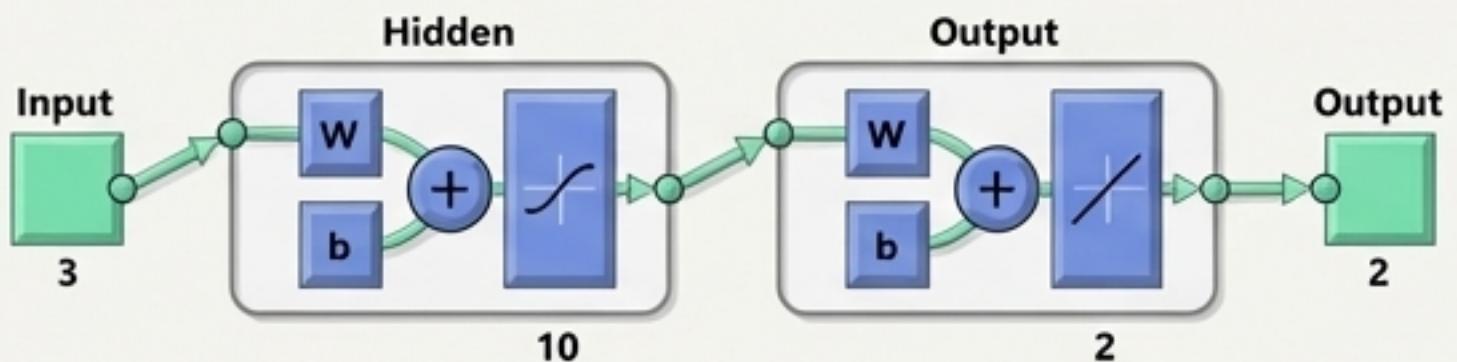


## 2. Fabricare și Măsurare:

Probele au fost printate 3D și lăsate 24h pentru stabilizare. Măsurările au fost realizate cu o mașină de măsurat în coordonate (CMM) de înaltă precizie (Tesa Micro-Hite 3D, acuratețe  $\pm 1\mu\text{m}$ ).

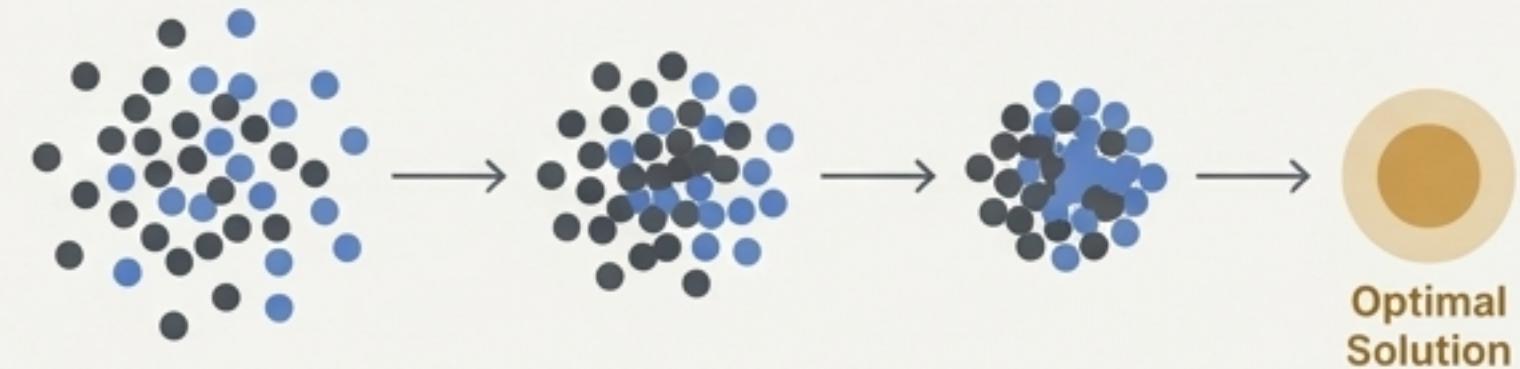


## 3. Modelare Predictivă (ANN):



Datele experimentale (intrări: parametri; ieșiri: abateri) au fost folosite pentru a antrena o rețea neuronală artificială (ANN) capabilă să prezică abaterile.

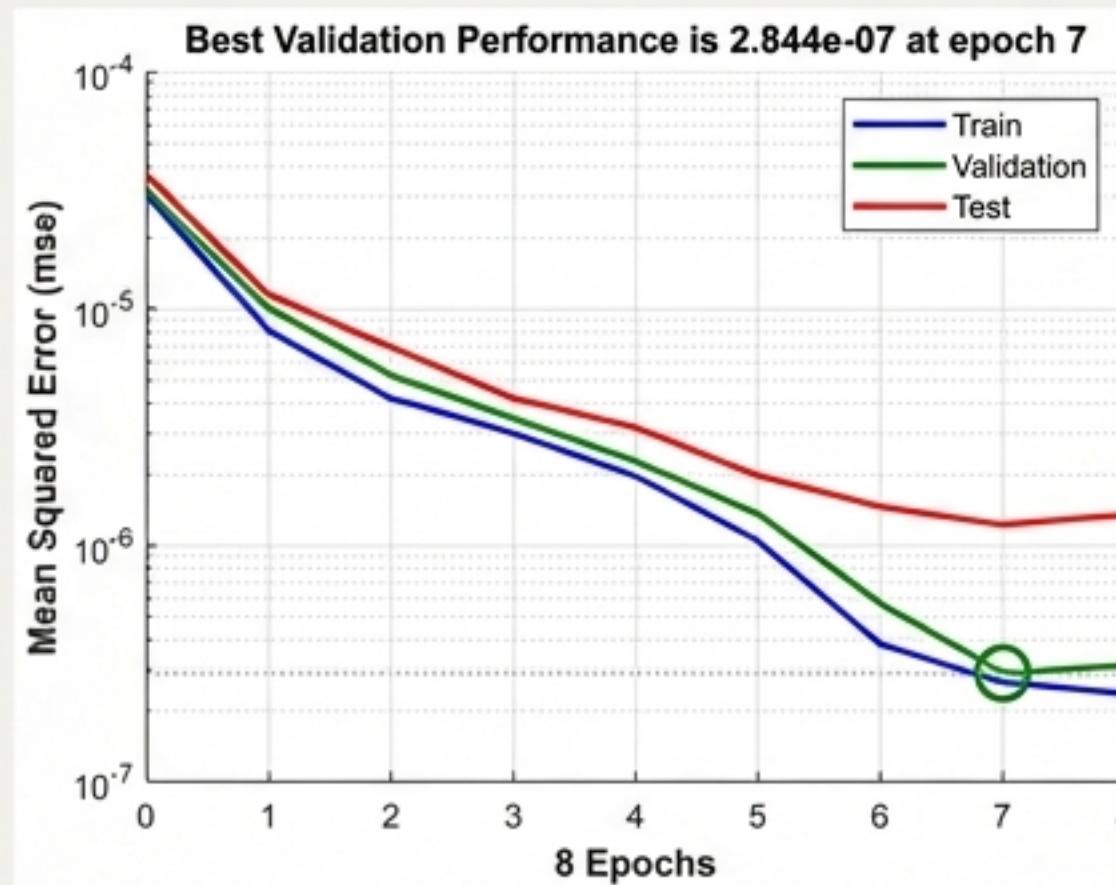
## 4. Optimizare (GA):



Un algoritm genetic a fost utilizat pentru a interoga modelul ANN și a identifica setul de parametri care minimizează abaterile dimensionale.

# Rezultate Cheie: Găsirea setului optim de parametri pentru precizie maximă.

## Validarea Modelului Predictiv (ANN)



Modelele ANN au demonstrat o capacitate de predicție excelentă, cu coeficienți de corelație ( $R^2$ ) foarte ridicați. Exemplu:  $R^2 = 0.961$  ( $\varnothing d_1/D_1$ ),  $R^2 = 0.947$  ( $\varnothing d_2/D_2$ ),  $R^2 = 0.910$  ( $I/L$ ).

## Soluția de Optimizare (GA)

f1 (Abatere arbore)	f2 (Abatere butuc)	x1 (Grosime strat)	x2 (Densitate umplere)	x3 (Diam. nominal)
f1: 0.004	f2: 0.005	x1: 0.102	x2: 46.995	x3: 49.83
f1: 0.003	f2: 0.006	x1: 0.093	x2: 46.995	x3: 49.83
f1: 0.004	f2: 0.006	x1: 0.046	x2: 46.995	x3: 49.78
f1: 0.005	f2: 0.007	x1: 0.088	x2: 46.995	x3: 49.83
f1: 0.004	f2: 0.007	x1: 0.103	x2: 46.995	x3: 49.83

Exemplu de set optim identificat (pentru diametrul exterior):

- Grosime strat (x1): 0.102 mm
- Densitate umplere (x2): 46.995 %
- Diametru nominal (x3): 49.83 mm.

Rezultat: Abatere relativă arbore (f1) = 0.004, Abatere relativă butuc (f2) = 0.005.

**\*\*Concluzie practică:\*\*** Prin această metodologie hibridă, se poate trece de la o abordare bazată pe încercări la una predictivă și optimizată pentru controlul calității.

# Sinteză: Cum gândim ca un inginer în Fabricația Aditivă?



## 1. Identificarea Oportunității: Când este FA soluția potrivită?

- **Complexitate Ridicată:** Geometrii imposibil de realizat prin metode convenționale.
- **Greutate Redusă (Lightweighting):** Aplicații critice în aerospațial și auto.
- **Personalizare / Unicitate:** Fiecare produs este diferit (ex: medical).
- **Viteză și Agilitate:** Prototipare și producție de serie mică, fără costuri de matrițe.



## 2. Proiectare pentru Fabricație Aditivă (DfAM):

Nu doar 'convertim' un model CAD. Trebuie să proiectăm specific pentru procesul aditiv, luând în considerare orientarea piesei, necesitatea suporturilor și oportunitățile (optimizare topologică, consolidare de piese).



## 3. Selectia Procesului și a Materialului:

Alegerea corectă a tehnologiei (FDM, SLA, SLS) și a materialului este la fel de importantă ca designul.



## 4. Controlul și Optimizarea Preciziei:

Precizia nu este implicită. Ea trebuie obținută prin experimentare, măsurare și optimizare, folosind metode sistematice (ca în studiul de caz).

# Aplicabilitate Directă: Conexiuni cu Laboratorul și Proiectul de An.

Punte între teorie și practică, conform Fișei Disciplinei:



## Pentru Activitățile de Laborator

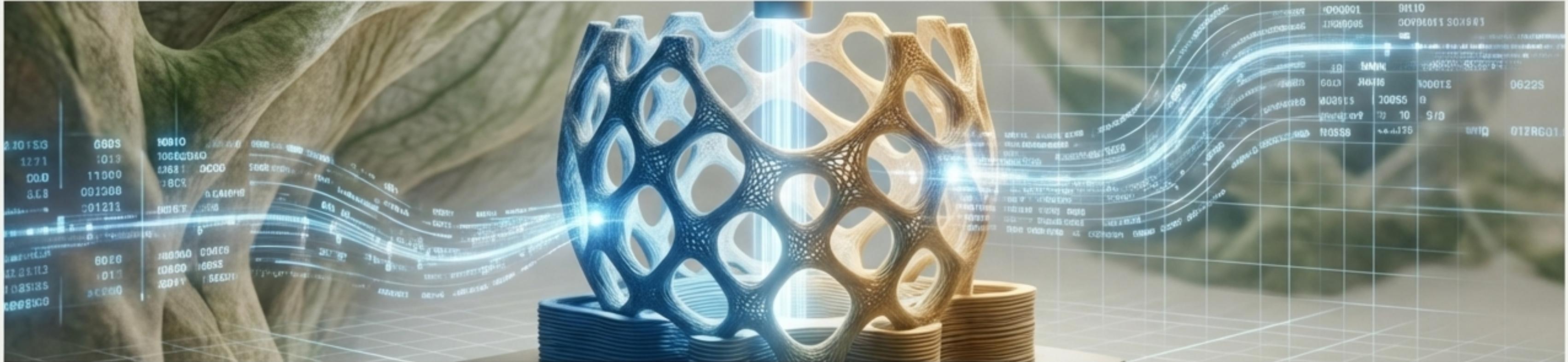
- **Lab 3 & 4 (Imprimarea cu polimeri și compozite):** Când setați parametrii imprimantei, veți observa direct compromisul dintre grosimea stratului (viteză vs. calitate suprafață) și densitatea umplerii (temp vs. rigiditate).
- **Lab 5 & 6 (Analiza pieselor și optimizarea):** Veți folosi tehnici de inspecție dimensională pentru a evalua calitatea pieselor, similar cu pasul de măsurare din studiul de caz.



## Pentru Proiectul Final

- **Etapa 1 (Proiectarea componentei funcționale):** Aplicați principiile DfAM. Nu proiectați pentru aşchiere, ci pentru printare.
- **Etapa 2 (Selectarea materialului și tehnologiei):** Justificați alegerea în funcție de cerințele funcționale (rezistență, temperatură etc.), nu doar de geometrie.
- **Etapa 4 (Realizarea și evaluarea prototipului):** Validarea prototipului vostru va trebui să includă și o analiză a preciziei dimensionale, în special dacă este o componentă de asamblare.

# Orizonturi Deschise: Care sunt următoarele frontiere în Fabricația Aditivă?



- **Printarea 4D și Materiale Inteligente:** Obiecte programate să își schimbe formă sau funcția ca răspuns la un stimул extern.
- **Gemenii Digitali (Digital Twins):** Simularea și monitorizarea în timp real a procesului de printare printr-o replică virtuală.
- **Inteligenta Artificială Integrată:** Utilizarea AI pentru descoperirea de noi materiale (ex: Aliaje cu Entropie Ridicată) și controlul autonom al proceselor.
- **Sustenabilitate și Reziliență:** Rolul FA în crearea unor lanțuri de aprovizionare locale și reducerea deșeurilor.

Întrebare de reflectie: \*Ce problemă inginerească, pe care o considerați astăzi extrem de dificilă sau ‘imposibilă’, ar putea fi rezolvată de următoarea generație de tehnologii aditive?\*