



Enhanced Functional and Surgical Outcomes With 3D Printing in Orthopedic Oncology: A Comparative Meta-Analysis Against Conventional Techniques

Rezultate funcționale și chirurgicale îmbunătățite prin utilizarea imprimării 3D în oncologia ortopedică: o meta-analiză comparativă cu tehnicile convenționale

Date generale ale sursei

Titlul documentului	<i>Enhanced Functional and Surgical Outcomes With 3D Printing in Orthopedic Oncology: A Comparative Meta-Analysis Against Conventional Techniques</i>
Autori	Mounsef PJ, Blackman B, Sharma O, Aoude A, Bozzo A.
Publicație / An	Journal of Surgical Oncology, 2025; 132:1131–1142
Tipul sursei	Meta-analiză comparativă (PRISMA)
Sursa	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40923871/
Cuvinte cheie	Printare 3D, oncologie ortopedică, implanturi personalizate

Obiectivul studiului și problema medicală abordată

Meta-analiza sugerează că integrarea printării 3D (3DP) în chirurgia tumorilor musculoscheletale este asociată cu **rezultate funcționale postoperatorii mai bune și o reducere a pierderii sanguine**, fără dovezi că ar compromite rezultatul oncologic. Totuși, avantajele nu sunt uniforme pentru toate aplicațiile 3DP.

Rezultatul cel mai interesant este pentru implanturile 3D personalizate, unde beneficiile privind timpul operator și pierderea sanguină sunt mai pronunțate decât pentru ghidurile 3D utilizate izolat. În schimb, nu există în prezent dovada unei reduceri a riscului de recidivă tumorală.

Interpretarea trebuie temperată de **eterogenitatea foarte mare, caracterul predominant retrospectiv al studiilor și riscul de erori sistematice**. Nivelul de evidență atribuit este III.

Analiza detaliată a sursei

De ce este importantă această meta-analiză?

Printarea 3D are trei utilizări conceptual diferite în oncologia ortopedică: **modele anatomice pentru planning, ghiduri/instrumentar chirurgical personalizat și implanturi/proteze personalizate**.

Avantajul teoretic este evident mai ales în anatomia complexă: datele imagistice sunt convertite într-un model tridimensional specific pacientului, permițând planificarea mai exactă a rezecției, fabricarea ghidurilor și/sau reconstrucția adaptată defectului rezultat.

Întrebarea relevantă clinic este însă dacă această precizie tehnică se traduce în **beneficii măsurabile pentru pacient**. Aceasta este problema pe care meta-analiza încearcă să o clarifice.

Metodologie

Review-ul a fost efectuat conform PRISMA, cu căutare în **Ovid MEDLINE, Embase, Scopus și Web of Science până în noiembrie 2024**. Au fost eligibile numai studiile comparative 3DP versus tehnici convenționale în oncologia ortopedică.

Din **3.570 de articole identificate**, după eliminarea duplicatelor și screening au rămas doar **14 studii**, cu **478 pacienți**: 214 tratați utilizând 3DP și 264 prin tehnici convenționale. Figura PRISMA de la pagina 3 ilustrează selecția foarte importantă 3570 → 2553 articole unice → 30 evaluate integral → 14 incluse.

Tumorile cel mai des tratate au fost **condrosarcomul, osteosarcomul și sarcomul Ewing**. Localizările au fost foarte eterogene: pelvis, membre și coloană. Cinci studii au analizat ghiduri 3DP, cinci implanturi 3DP, iar patru combinația implant + ghid.

Această heterogenitate anatomică și tehnologică este esențială pentru interpretarea rezultatelor.

1. Funcția postoperatorie: cel mai convingător rezultat clinic

Opt studii au furnizat date MSTs.

Rezultatul consolidat favorizează semnificativ 3DP:

MD MSTs = +2,17 puncte

95% CI 1,40–2,95

p < 0,001

I² = 58%

Aceasta este probabil constatarea cu cea mai mare relevanță pentru pacient: avantajul tehnologic pare să se traducă într-o **funcție postoperatorie mai bună**, nu doar într-un parametru intraoperator.

Dar este diferența de 2,17 puncte clinic relevantă?

Aici autorii sunt prudenți în privința concluziilor.

Pentru MSTs **nu există un MCID bine stabilit**, astfel încât semnificația statistică nu poate fi echivalată automat cu un beneficiu clinic perceptibil.

Există însă un semnal concordant din scorurile regionale. În două studii asupra reconstrucției după rezecția tumorilor periacetabulare, **Harris Hip Score a fost semnificativ mai bun cu protezele 3D personalizate**. Similar, două studii asupra tumorii cu celule gigante a radiusului distal au găsit scoruri Mayo Wrist postoperatorii mai bune în grupurile 3DP.

Prin urmare, rezultatul funcțional este consistent, dar **magnitudinea clinică reală rămâne insuficient definită**.

2. Pierderea sanguină: semnificativ statistic, dar nu neapărat clinic în analiza globală

În 11 studii, 3DP a redus pierderea sanguină cu:

MD = -69,8 mL

95% CI -109,6 până la -30,0 mL

p < 0,001

Problema majoră este eterogenitatea:

$$I^2 = 93\%.$$

Autorii atrag atenția asupra unui aspect foarte relevant: în chirurgia sarcoamelor pelvine, unde pierderea sanguină poate depăși 1.000 mL, o reducere medie de aproximativ **70 mL este probabil modestă clinic**. În plus, studiile nu precizează uniform dacă pierderea sanguină a fost estimată sau măsurată.

Situația se schimbă însă pentru implanturile 3D

În analiza subgrupurilor pentru **implanturi 3DP**, reducerea pierderii sanguine a fost mult mai mare:

$$\begin{aligned} & -214,52 \text{ mL} \\ & 95\% \text{ CI } -326,5 \text{ până la } -102,54 \text{ mL} \\ & p < 0,001. \end{aligned}$$

Mai mult, autorii raportează că în patru studii de chirurgie pelvină diferența ponderată a fost de aproximativ **-568 mL** în favoarea 3DP, magnitudine care poate deveni clinic relevantă pentru necesarul transfuzional și stabilitatea hemodinamică.

Aceasta este una dintre cele mai interesante observații ale lucrării: beneficiul 3DP poate deveni mult mai relevant odată cu creșterea complexității anatomice și a magnitudinii reconstrucției.

3. Timpul operator: analiza globală NU demonstrează beneficiu

Pentru toate tehnicile 3DP combinate:

$$\begin{aligned} & MD = -12,2 \text{ minute} \\ & 95\% \text{ CI } -36,18 \text{ până la } +11,79 \text{ minute} \\ & p = 0,32 \end{aligned}$$

Deci diferența **nu este statistic semnificativă**.

Heterogenitatea este din nou foarte mare:

$$I^2 = 89\%.$$

Acest rezultat este important deoarece concluziile generale pot crea impresia că 3DP reduce în mod demonstrat timpul operator. Analiza globală **nu susține această afirmație cu semnificație statistică**.

Implanturile 3DP sunt din nou excepția

În subgrupul implanturilor personalizate, timpul operator a fost redus cu aproximativ:

$$\begin{aligned} & 23,1 \text{ minute,} \\ & 95\% \text{ CI aproximativ } -38,2 \text{ până la } -8,0 \text{ minute,} \\ & p < 0,001, I^2 = 18\%. \end{aligned}$$

Aici atât efectul, cât și heterogenitatea redusă sunt mai convingătoare.

4. Ghidurile 3D singure: beneficiul este mult mai puțin convingător

Pentru **ghidurile/instrumentarul chirurgical personalizat fără implant 3DP**, nu s-au găsit diferențe semnificative privind:

timpul operator: **-13,35 min; p=0,55;**

pierderea sanguină: **-95 mL; p=0,29;**

recidiva: **RR 0,88; p=0,60.**

Prin urmare, datele actuale nu permit afirmația că simpla introducere a unui ghid printat 3D îmbunătățește în mod demonstrabil aceste rezultate.

Mai mult, autorii notează un posibil dezavantaj tehnic: unele ghiduri pot necesita **disecție suplimentară de țesuturi moi pentru poziționare**, ceea ce ar putea contrabalansa parțial avantajul preciziei.

5. Controlul oncologic: 3DP nu reduce recidiva, dar nici nu pare să o crească

Acesta este un punct fundamental.

În toate cele 14 studii:

RR recidivă = 0,88

95% CI 0,59–1,29

p = 0,50

I² = 0%

Deci **nu există diferență semnificativă a recidivei tumorale** între 3DP și tehnicile convenționale.

Același rezultat apare în subgrupuri: implanturile 3DP au RR 1,04, p=0,94, iar ghidurile RR 0,88, p=0,60.

Interpretarea corectă pentru specialist este:

3DP nu are în prezent un beneficiu oncologic demonstrat asupra riscului de recidivă tumorală, dar datele disponibile nu sugerează nici compromiterea controlului oncologic.

Totuși, recidiva este un endpoint incomplet pentru evaluarea preciziei oncologice. Autorii consideră că studiile viitoare trebuie să raporteze sistematic și **marginele de rezecție**, nu doar recidiva.

6. Probabil cea mai importantă noutate: „3D printing” nu trebuie tratat ca o singură intervenție

Această meta-analiză sugerează că trebuie să separăm cel puțin:

ghidurile 3D ≠ implanturile 3D ≠ ghiduri + implanturi

Pentru ghiduri izolate nu există beneficii semnificative pentru principalii parametri operatori.

Pentru **implanturile personalizate 3DP**, în schimb, apar simultan:

- ✓ reducerea semnificativă a timpului operator;
- ✓ reducerea mai mare a pierderii sanguine;
- ✓ rezultate funcționale postoperatorii superioare;
- ✓ fără creșterea demonstrată a riscului de recidivă tumorală.

Combinarea „implant + guide” nu a produs, surprinzător, diferențe semnificative pentru timp operator, pierdere sanguină sau recidivă.

Așadar, **nu tehnologia 3DP în sine pare să fie cheia, ci aplicația sa specifică și selecția cazului.**

7. Costul și timpul de fabricație rămân bariere reale

Pentru endoprotezele pelvine 3D personalizate, costurile raportate au fost de aproximativ **3.000–7.000 USD**, aproximativ **1,5 ori costul** unor reconstrucții convenționale precum "titanium mesh cage" sau "screw-rod systems".

De la design până la implantare au fost raportate aproximativ **2–4 săptămâni**, procesul efectiv de fabricație necesitând aproximativ **3–7 zile**.

Acest aspect are consecințe oncologice practice: pentru o intervenție care nu poate fi amânată, timpul necesar designului, producției și livrării poate limita fezabilitatea unei proteze individualizate.

În consecință, **3DP este momentan mai logică pentru cazurile complexe elective, în care beneficiul reconstrucției personalizate justifică timpul și costul suplimentar**, decât ca tehnologie universală pentru toate rezecțiile oncologice.

8. Limitările care trebuie cunoscute înainte de a schimba practica

Calitatea dovezilor este principalul obstacol.

Studiile incluse sunt predominant **retrospective și observaționale**, cu metodologii foarte diferite.

Heterogenitatea este impresionantă pentru unele outcome-uri:

- timp operator global: **I² 89%**;
- pierderea de sânge globală: **I² 93%**;
- pierderea de sânge pentru implanturi: **I² 98%**;
- MSTs: **I² 58%**.

Tumorile, localizările, tehnicile reconstructive, experiența chirurgilor și duratele de follow-up diferă substanțial.

În plus, evaluarea funcțională este vulnerabilă la apariția unor erori sistemice: nici pacienții, nici clinicianul nu erau aleși aleator, iar scorul **MSTS este evaluat de către clinician**.

Mai există un detaliu metodologic important: evaluarea ROBINS-I arată că **doar un studiu a fost considerat cu risc scăzut de erori sistemice**, restul prezentând cel puțin unele suspiciuni. Figura 2 de la pagina 4 exprimă acest lucru foarte clar.

Ce este realmente nou pentru practica de oncologie ortopedică?

Meta-analiza nu demonstrează că 3DP trebuie să înlocuiască tehnicile convenționale. Demonstrează mai degrabă că există suficiente rezultate clinice pentru a considera tehnologia **mai mult decât un instrument de planning sau o inovație tehnică**.

În special, **implantul personalizat (patient-specific)** pare să fie aplicația cu cel mai mare potențial.

Pentru tumori pelvine/periacetabulare, unde anatomia este complexă, rezecțiile sunt extinse și reconstrucția este dificilă, beneficiul poate fi disproporționat mai mare: reducerea raportată a pierderii sanguine în subsetul pelvin (~568 mL) este mult mai convingătoare clinic decât reducerea globală de 69,8 mL.

În același timp, rezultatele actuale **nu justifică utilizarea 3DP cu argumentul unui control oncologic superior**.

Concluzii

- » **Există un rezultat funcțional consistent în favoarea 3DP.** Scorul MSTS este cu aproximativ **2,17 puncte mai mare**, dar relevanța clinică exactă rămâne incertă în absența unui MCID stabilit.
- » **Reducerea globală a pierderii sanguine (~70 mL) este statistic semnificativă, dar probabil modestă clinic.** În schimb, efectul pare mult mai important pentru implanturile 3D (~214 mL) și în chirurgia pelvină (~568 mL).
- » **3DP nu reduce semnificativ timpul operator în analiza globală.** Avantajul apare în principal în subgrupul implanturilor personalizate (~23 minute).
- » **Nu există dovadă de reducere a riscului de recidivă tumorală.** Important, nu există nici semnal că 3DP ar crește acest risc.
- » **Ghidurile 3D utilizate izolat nu au demonstrat beneficii semnificative** pentru timpul operator, pierderea de sânge sau recidivă.
- » **Implanturile personalizate reprezintă componenta cea mai promițătoare a tehnologiei**, în special pentru reconstrucții anatomice complexe.
- » **Datele nu permit încă demonstrarea superiorității oncologice**, deoarece raportarea marginilor de rezecție este insuficientă, iar urmărirea și rezultatele nu sunt standardizate.
- » **Costul și timpul de producție sunt relevante:** aproximativ 3.000–7.000 USD pentru unele proteze pelvine și 2–4 săptămâni între design și intervenție.
- » **Dovezile actuale sunt de nivel III și nu justifică adoptarea universală.** Sunt necesare studii prospective, ideal comparative/randomizate, cu raportarea standardizată a marginilor, complicațiilor, recidivei, supraviețuirii implantului și PROM-urilor specifice regiunii anatomice.

Take-home message

Printarea 3D în oncologia ortopedică pare să treacă de la „feasibility technology” la o tehnologie cu beneficii clinice măsurabile, dar dovezile cele mai convingătoare nu sunt pentru ghidurile 3D, ci pentru implanturile personalizate și cazurile reconstructive complexe.

Pentru moment, datele susțin mai degrabă o strategie de **selecție a pacientului și a indicației** decât utilizarea de rutină: avantaj maxim probabil în anatomii complexe și reconstrucții personalizate, cu obiectiv predominant **funcțional și perioperator**, nu cu promisiunea unui control oncologic superior.