

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
„CAROL DAVILA”, BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ
DOMENIUL MEDICINĂ DENTARĂ

*Pacientul virtual cu aplicabilitate în stomatologia
clinică, comunicare interdisciplinară și educație
medicală*

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:
PROF. UNIV. DR. CORINA MARILENA CRISTACHE

Student-doctorand:
BURLACU-VĂȚĂMANU OANA-ELENA

ANUL

2026

Cuprins

Listă lucrări științifice	Error! Bookmark not defined.
Listă abrevieri	Error! Bookmark not defined.
Introducere	Error! Bookmark not defined.
<i>I. Partea generală</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
<i>Capitolul 1. Pacientul virtual: concept, fundamente tehnologice și arhitectură multimodală</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
1.1. Conceptul de pacient virtual	Error! Bookmark not defined.
1.1.1. Definiția pacientului virtual	Error! Bookmark not defined.
1.1.2. Evoluția conceptului în medicină și stomatologie	Error! Bookmark not defined.
1.1.3. Arhitectura structurală în construirea pacientului virtual	Error! Bookmark not defined.
1.2. Tehnologii imagistice de bază pentru construirea pacientului virtual	Error! Bookmark not defined.
1.2.1. Tomografia computerizată cu fascicul conic (CBCT) și tomografia computerizată multislice (MSCT)	Error! Bookmark not defined.
1.2.2. Scanarea intraorală și digitizarea arcadelor dentare	Error! Bookmark not defined.
1.2.3. Scanarea facială 3D și fotogrammetria	Error! Bookmark not defined.
1.3. Mecanisme computaționale și algoritmi de inteligență artificială în procesarea, segmentarea și coregistrarea datelor 3D	Error! Bookmark not defined.
1.3.1. Mecanismul matematic al segmentării automate în volumele CBCT	Error! Bookmark not defined.
1.3.2. Algoritmi de filtrare adaptivă în scanarea intraorală	Error! Bookmark not defined.
1.3.3. Matematica coregistrării inteligente a straturilor	Error! Bookmark not defined.
<i>Capitolul 2. Aplicații clinice, limitări metrice și paradigma minim invazivă</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
2.1. Rolul pacientului virtual în diagnosticul tridimensional și planificarea inversă	Error! Bookmark not defined.
2.2. Pacientul virtual ca platformă de simulare biomecanică și optimizare decizională	Error! Bookmark not defined.
2.3. Limitări metrice, surse de eroare cumulativă și necesitatea validării tehnice	Error! Bookmark not defined.
2.4. Pacientul virtual ca platformă de comunicare interdisciplinară	Error! Bookmark not defined.
2.5. Paradigma minim invazivă și cererea clinică pentru pacientul virtual precis	Error! Bookmark not defined.
<i>II. Contribuții personale</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
<i>Capitolul 3 — Ipoteza de lucru și obiectivele cercetării</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
3.1. Fundamentarea temei și întrebarea centrală de cercetare	Error! Bookmark not defined.
3.2. Ipoteza de lucru	Error! Bookmark not defined.
3.3. Obiectivul general	Error! Bookmark not defined.
3.4. Obiective specifice	Error! Bookmark not defined.
3.5. Contribuții preconizate	Error! Bookmark not defined.
<i>Capitolul 4 — Metodologia generală a cercetării</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
4.1. Cadrul etic și conformitatea cu reglementările în vigoare	Error! Bookmark not defined.
4.2. Modalități imagistice și standarde de achiziție	Error! Bookmark not defined.
4.3. Standarde de referință	Error! Bookmark not defined.
4.4. Indicatori pentru evaluarea preciziei, concordanței și eficienței	Error! Bookmark not defined.

4.5. Evaluarea reproductibilității inter- și intra-observator	Error! Bookmark not defined.
4.6. Convenții statistice	Error! Bookmark not defined.
4.7. Mediul software și procesarea datelor	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 5.	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Studiul 1: Aplicarea clinică a pacientului virtual: o analiză de sinteză a terapiei cu alignere în stomatologia minim invazivă	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
5.1. Introducere	Error! Bookmark not defined.
5.2. Materiale și metode	Error! Bookmark not defined.
5.3. Rezultate	Error! Bookmark not defined.
5.4. Discuții	Error! Bookmark not defined.
5.5. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 6.	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Studiul 2: Acuratețea platformelor de segmentare mandibulară bazate pe IA, platforme cu cod sursa deschis și comerciale, în scanări CBCT afectate de artefacte	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
6.1. Introducere	Error! Bookmark not defined.
6.2. Material și metodă	Error! Bookmark not defined.
6.3 Rezultate	Error! Bookmark not defined.
6.4 Discuții	Error! Bookmark not defined.
6.5 Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 7.	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Studiul 3: Evaluarea a patru tehnologii de scanare facială 3D: De la fotogrammetrie la sistemele cu lumină structurată în stomatologia clinică	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
7.1. Introducere	Error! Bookmark not defined.
7.2. Material și metodă	Error! Bookmark not defined.
7.3. Rezultate	Error! Bookmark not defined.
7.4. Discuții	Error! Bookmark not defined.
7.5. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 8.	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Studiul 4: Crearea automată a pacientului virtual orofacial folosind două cohorte de scanări MSCT vs. CBCT	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
8.1. Introducere	Error! Bookmark not defined.
8.2. Material și metodă	Error! Bookmark not defined.
8.3. Rezultate	Error! Bookmark not defined.
8.4. Discuții	Error! Bookmark not defined.
8.5. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 9. Concluzii și contribuții personale	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
9.1. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
9.2. Contribuții personale	Error! Bookmark not defined.
Bibliografie	Error! Bookmark not defined.
Anexe	Error! Bookmark not defined.

Introducere

Pacientul virtual reprezintă adaptarea digitală integrată a pacientului real, obținută prin corelarea datelor clinice, imagistice și funcționale, cu rol în diagnostic, planificare și evaluarea deciziilor terapeutice. Acest concept depășește simpla modelare tridimensională, devenind un instrument complex pentru practica clinică, comunicarea interdisciplinară, educația medicală și cercetarea aplicativă. Ipoteza de cercetare pornește de la premisa că integrarea datelor faciale tridimensionale, a scanărilor intraorale și a informațiilor radiologice prin instrumente bazate pe inteligență artificială poate contribui la dezvoltarea unui pacient virtual orofacial mai precis, realizat automat, reproductibil și eficient, indiferent de modalitatea imagistică utilizată.

Obiectivul general constă în evaluarea și integrarea tehnologiilor digitale avansate pentru construirea pacientului virtual orofacial, prin patru obiective specifice: cartografierea sistematică a terapiei cu gutiere transparente, analiza preciziei platformelor de segmentare mandibulară bazate pe inteligență artificială în scanări CBCT cu artefacte, evaluarea comparativă a patru tehnologii de scanare facială și crearea automată a pacientului virtual pe cohorte CBCT și CT multislice. Fluxul digital validat se aplică cu succes în implantologia ghidată, reconstrucția maxilo-facială și restaurarea estetică, poziționând pacientul virtual ca instrument viabil pentru practica de rutină, educația medicală și cercetarea interdisciplinară.

I. Partea generală

Capitolul 1.

Pacientul virtual: concept, fundamente tehnologice și arhitectură multimodală

Pacientul virtual este o replică digitală tridimensională și dinamică a complexului orofacial, unificând într-un sistem de coordonate spațiale datele geometrice ale țesuturilor dure osoase, arcadei dentare și configurației externe a țesuturilor moi faciale. Acest instrument marchează trecerea de la diagnosticul bidimensional convențional (radiografii, analize cefalometrice statice) la simulări predictive avansate, capabile să reproducă anatomia statică și dinamica cinematică mandibulară.

Construirea pacientului digital se bazează pe trei piloni imagistici fundamentali. Tomografia computerizată — CBCT și MSCT — furnizează rețeaua volumetrică pentru structurile osoase interne, CBCT fiind preferată în stomatologie datorită rezoluției spațiale izotrope ridicate și dozei reduse de radiații. Scanarea intraorală (IOS) reprezintă o tehnologie optică ce capturează relieful ocluzal cu precizie micrometrică superioară, eliminând erorile dimensionale ale amprentelor clasice. Scanarea facială 3D și fotogrammetria, prin sisteme cu lumină structurată, capturează anvelopa moale a feței și textura cromatică a tegumentelor în repaus și în dinamică mimică.

Unificarea acestor straturi eterogene de date necesită algoritmi avansați de inteligență artificială. Segmentarea automată utilizează rețele neuronale convoluționale adânci (U-Net 3D) optimizate prin minimizarea funcțiilor de pierdere (Dice Loss) pentru izolarea automată a oaselor sau dinților din volumele DICOM. Filtrarea adaptivă curăță zgomotul (salivă, mișcare) din scanările intraorale. Coregistrarea inteligentă finală se realizează prin algoritmul Iterative Closest Point (ICP), care calculează matricele de rotație și translație pentru minimizarea erorii pătratice medii (RMSE) dintre straturi, faza de ghidaj brut fiind automatizată prin IA pe baza identificării reperelor anatomice comune.

Capitolul 2

Aplicații clinice, limitări metrice și paradigma minim invazivă

Pacientul virtual a introdus planificarea inversă (backward planning), în care medicul proiectează mai întâi rezultatul final ideal — estetic și funcțional — iar apoi ghidează etapele intermediare cu șabloane de precizie. Avatarul digital permite și simulare biomecanică prin

Metoda Elementului Finit (FEA), testând comportamentul osului și materialelor sub acțiunea forțelor înainte de aplicarea clinică.

Implementarea tehnologiei trebuie să recunoască limitările metrice și sursele de eroare cumulativă. Volumele CBCT sunt perturbate de artefacte *beam hardening* (cauzate de metale, coroane, implanturi) care distorsionează contururile osoase, iar scanările optice pe arcade extinse acumulează erori de îmbinare (stitching errors). Validarea tehnică riguroasă a platformelor software și tehnologiilor de achiziție este necesară pentru siguranța tratamentului.

Modelul digital al pacientului funcționează ca platformă de comunicare interdisciplinară, oferind un limbaj vizual și metric comun pentru chirurg, protetician, ortodont și tehnician dentar, facilitând planificarea de la distanță și prezentarea predictibilă către pacient. În stomatologia minim invazivă modernă, conservarea structurilor biologice prin intervenții fără lambou (flapless) sau preparări controlate microscopic depinde strict de precizia pacientului virtual. Orice deviație geometrică peste pragul clinic acceptat de 0,5 mm anulează beneficiile biologice și introduce riscul de lezare a structurilor anatomice vitale.

I. Contribuții personale

Capitolul 3

Ipoteza de lucru

Ipoteza generală

Fluxurile de lucru bazate pe inteligență artificială pot permite construirea automată a pacientului virtual orofacial cu o acuratețe acceptabilă clinic, cu reproductibilitate ridicată și reducere semnificativă a timpului de procesare, indiferent de tipul datelor tomografice (MSCT sau CBCT) și de dispozitivul de achiziție facială utilizat.

Subipotezele cercetării

H1 — Necesitatea clinică. Tratamentele minim invazive, cum este terapia cu alignere transparente, necesită modele digitale 3D precise ale pacientului, justificând dezvoltarea de soluții tehnice avansate pentru generarea pacientului virtual.

H2 — Componenta țesuturilor dure. Segmentarea automată cu ajutorul IA a mandibulei din CBCT poate atinge acuratețe comparabilă cu segmentarea semi-automată

ghidată de experți, reducând substanțial timpul de procesare și menținându-și performanța chiar în prezența artefactelor imagistice.

H3 — Componenta țesuturilor moi. Cel puțin una dintre tehnologiile actuale de scanare facială 3D (lumină structurată, fuziune de profunzime, fotogrammetrie smartphone, NeRF) poate furniza o geometrie facială suficient de precisă metric pentru integrarea în pacientul virtual, cu performanțe variabile în funcție de tehnologie și orientarea măsurătorilor (verticală mediană sau orizontală trans-facială).

H4 — Componenta de integrare. Datele țesuturilor dure, țesuturilor moi și suprafețelor intraorale pot fi fuzionate automat prin înregistrare multimodală asistată de IA într-un model unic de pacient virtual, cu acuratețe echivalentă înregistrării semi-automate realizate de operatori instruiți, indiferent de sursa tomografică.

Obiectivele specifice

Obiectiv 1 (Studiul 1, Cap. 5): Evaluarea dovezilor clinice privind terapia cu alinare ortodontice prin scoping review PRISMA-ScR, pentru definirea cadrului clinic care justifică studiile de validare tehnică.

Obiectiv 2 (Studiul 2, Cap. 6): Evaluarea acurateței, robusteții și eficienței platformelor IA (open-source și comerciale) pentru segmentarea automată mandibulară din CBCT, pe scanări stratificate după tipul artefactelor, raportate la segmentarea semi-automată de referință.

Obiectiv 3 (Studiul 3, Cap. 7): Compararea acurateței, performanței direcționale și timpului de achiziție pentru patru tehnologii de scanare facială 3D, raportate la antropometria manuală calibrată.

Obiectiv 4 (Studiul 4, Cap. 8): Dezvoltarea și validarea unui flux de lucru IA pentru generarea automată a pacientului virtual orofacial prin înregistrare multimodală (facial-intraoral-tomografic), comparând acuratețea, reproductibilitatea și eficiența sa cu înregistrarea rafinate IA și semi-automată, evaluând și influența tipului de examinare 3D.

Capitolul 4

Metodologie Generală

Cadrul etic: Toate studiile au respectat Declarația de la Helsinki cu aprobarea comisiilor de etică. Studiile retrospective au folosit imagini anonimizate fără expunere suplimentară la radiații. Studiul prospectiv a inclus voluntari cu consimțământ informat. Pentru datele faciale biometrice s-au aplicat măsuri speciale de protecție conform GDPR.

Modalități imagistice: Au fost utilizate patru tipuri de date 3D: CBCT cu parametri conform ALARA și export DICOM; MSCT pe scanner Siemens cu protocol doză redusă, 150 kVp și export DICOM; scanări intraorale cu Planmeca Emerald S și export STL; scanări faciale cu patru tehnologii (Revopoint POP 2 ca referință, Bellus3D, Polycam, LumaAI) cu export OBJ.

Standarde de referință: Fiecare studiu are standard propriu: Studiul 1 — PRISMA-ScR pentru revizie; Studiul 2 — segmentare semi-automată în 3D Slicer pentru mandibulă; Studiul 3 — măsurători manuale cu șubler digital pe markeri fiduciali pentru antropometrie; Studiul 4 — înregistrare semi-automată în Mimics pentru pacientul virtual.

Indicatori de evaluare: Suprapunere volumetrică prin coeficient Dice; distanțe prin HD_{95} și RMS; diferență absolută de volum (AVD); hărți de distanță pentru vizualizare. **Antropometria** folosește diferența semnată și Cohen's d_z .

Înregistrarea se evaluează pe categorii: sub 1 mm fără corecție, 1–3 mm corecție minoră, peste 3 mm corecție majoră, separat pe trei treimi faciale. Timpul de procesare exclude așteptarea cloud.

Reproductibilitate: Doi operatori instruiți au efectuat măsurători independente, repetate după minimum două săptămâni. Date continue analizate prin ICC: sub 0,50 slabă, 0,50–0,75 moderată, 0,75–0,90 bună, peste 0,90 excelentă. Date ordinale prin Spearman. Extragerea datelor fără acces la valori de referință pentru reducerea erorii sistematice.

Statistică: Normalitate testată prin Shapiro-Wilk. Teste parametrice pentru distribuție normală, neparametrice altfel, cu corecție Bonferroni post-hoc. Semnificație la $p < 0,05$, sau $p < 0,001$ pentru comparații multiple. Raportare mărimi efect împreună cu valori p. Software: JASP 0.95.4 și IBM SPSS 28.0.

Software: Segmentare și înregistrare în 3D Slicer, Mimics și 3-matic. IA testat pe Virtual Patient Creator de la Relu și DentalSegmentator pe arhitectură nnU-Net. Procesare modele 3D în Blender 4.4 cu scripturi Python 3.10. Scalare uniformă izotropă pentru evitarea deformărilor artificiale.

Capitolul 5

Studiul 1 : Aplicarea clinică a pacientului virtual: o analiză de sinteză a terapiei cu alignere în stomatologia minim invazivă

Stomatologia minim invazivă a devenit o direcție centrală a practicii clinice contemporane, iar terapia cu alignere transparente (CAT) s-a impus ca o metodă eficientă pentru realizarea unor mișcări dentare precise, cu impact minim asupra țesuturilor dentare. În cadrul tezei, CAT este analizată ca expresie clinică a paradigmei minim invazive și ca element care justifică dezvoltarea conceptului de pacient virtual. Primul studiu din secțiunea contribuțiilor personale a avut ca obiectiv realizarea unei imagini de ansamblu asupra utilizării CAT în tratamentele estetice și restauratoare, prin analiza literaturii de specialitate și a programelor software de planificare digitală disponibile.

Recenzia a inclus 21 de studii, dintre care 6 articole originale și 15 rapoarte de caz, clasificate în două categorii principale: tratamente estetice și tratamente restauratoare. Studiile au evidențiat rolul CAT în corectarea înghesuirilor și spațierilor dentare, pregătirea pentru fațete și coroane protetice, precum și optimizarea spațiului necesar inserării implanturilor dentare. Tratamentele restauratoare au reprezentat categoria predominantă, sugerând integrarea tot mai accentuată a CAT în fluxurile digitale minim invazive ale stomatologiei restauratoare(Figura 5.1).

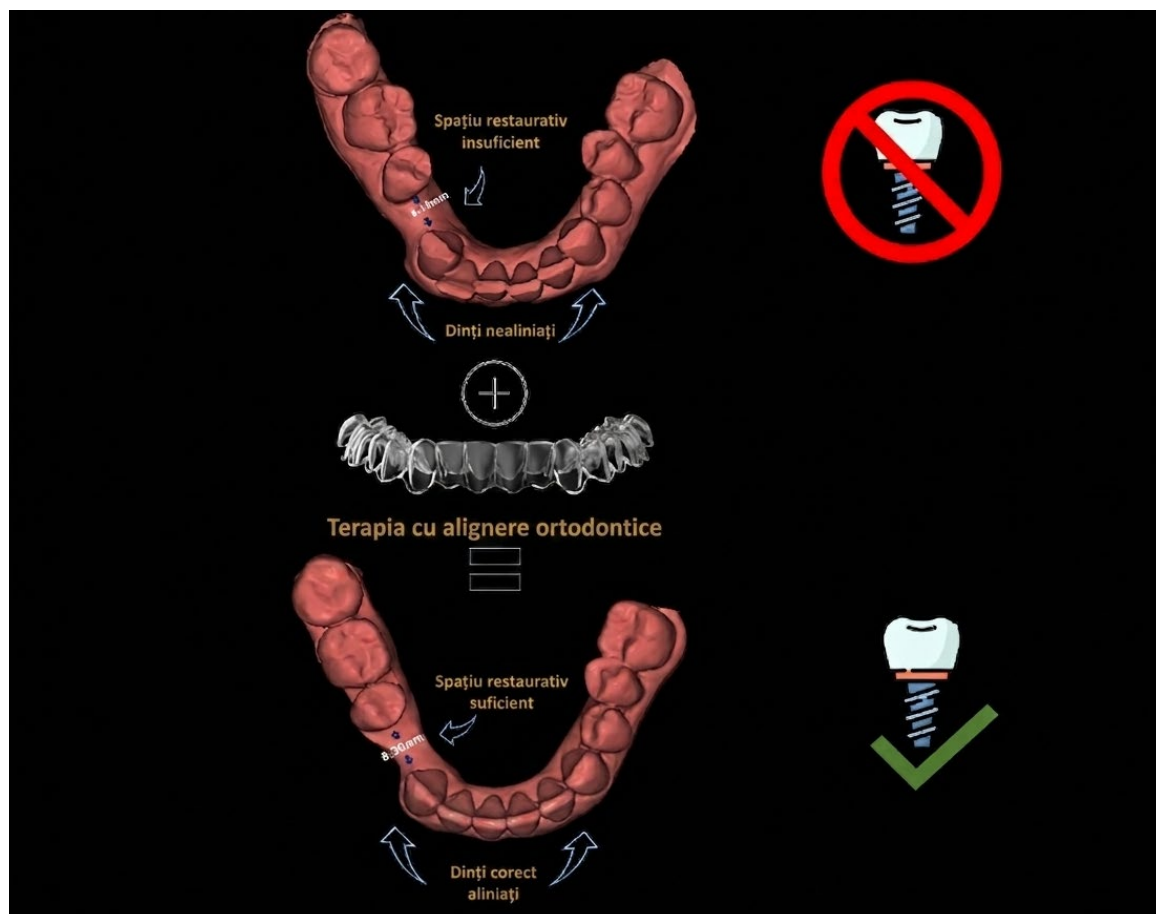


Figura 5.1. Fluxul de lucru al terapiei cu gutiere ortodontice (CAT) în faza preoperatorie a stomatologiei restaurative și estetice: caz clinic cu absența primului premolar mandibular, spațiu protetic redus și înghesuire dentară. În urma terapiei CAT s-a obținut spațiul suficient pentru restaurarea protetică pe implanturi.

Rezultatele analizate au demonstrat că integrarea planificării digitale și a instrumentelor CAD-CAM crește predictibilitatea și acuratețea mișcărilor dentare pre-restauratoare. Totodată, evaluarea sistemelor software dedicate alignerelor a evidențiat existența unor soluții variate pentru cazuri ușoare și moderate, precum Invisalign Express, Simpli5 sau Invisalign GO, însă și o lipsă de standardizare a protocoalelor terapeutice și a criteriilor de evaluare clinică. De asemenea, utilizarea limitată a instrumentelor digitale avansate și absența integrării complete a imagisticii radiologice și faciale indică faptul că domeniul se află încă într-o etapă de dezvoltare.

Deși CAT oferă beneficii importante în stomatologia minim invazivă, anumite mișcări dentare complexe rămân dificil de realizat predictibil doar cu alignere, iar rezultatele depind de complianța pacientului, particularitățile anatomice și caracteristicile sistemului

utilizat. În consecință, CAT trebuie privită ca un instrument terapeutic selectiv, indicat în special pentru malocluzii ușoare sau moderate și pentru planificarea pre-restauratoare. Limitările identificate în literatura actuală — inclusiv lipsa standardizării și integrarea insuficientă a datelor digitale complexe — susțin necesitatea dezvoltării și validării unui pacient virtual precis, interoperabil și automatizat, obiectiv urmărit în studiile experimentale ulterioare ale tezei.

Capitolul 6

Studiul 2 Acuratețea platformelor IA open-source și comerciale pentru segmentarea mandibulară pe CBCT cu artefacte

Acest studiu retrospectiv de validare tehnică a evaluat performanța a două platforme bazate pe inteligență artificială pentru segmentarea automată a mandibulei pe imagini CBCT afectate de artefacte dentare, utilizând drept standard de referință segmentarea semi-automată realizată de experți. Studiul a fost motivat de rolul esențial al segmentării precise în construcția pacientului virtual și în dezvoltarea fluxurilor digitale utilizate în implantologie, chirurgie ghidată și planificare ortodontico-restauratoare. Au fost analizate 30 de scanări CBCT stratificate în funcție de severitatea artefactelor generate de restaurări dentare, coroane sau implanturi.

Segmentarea de referință a fost realizată în 3D Slicer printr-un protocol semi-automat bazat pe valoare prag, region growing și rafinare manuală, demonstrând o consistență intra- și inter-operatorie ridicată. Performanța acestora a fost comparată cu două metode automate: o platformă open-source bazată pe nnU-Net (DentalSegmentator) și o platformă comercială cloud-based (Relu Creator)(Figura 6.1). Analiza a inclus evaluarea timpului de procesare, a suprapunerii volumetrice și a deviațiilor de suprafață utilizând metrici standardizate precum DSC, HD95, RMS și AVD.

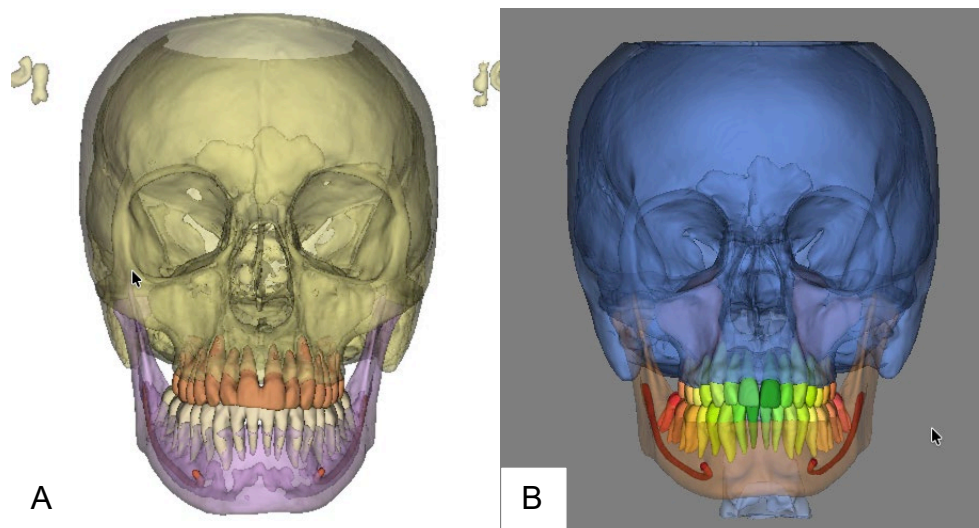


Figura 6.1. Segmentarea structurilor dentare pe CBCT în DentalSegmentator(A) și Relu(B).

Rezultatele au arătat că ambele platforme IA au redus semnificativ timpul de segmentare comparativ cu metoda semi-automată, OS-AI fiind cea mai rapidă metodă. Totuși, cele două soluții IA au prezentat profile diferite de performanță: platforma comercială a obținut o suprapunere volumetrică mai mare și o stabilitate mai bună în prezența artefactelor, în timp ce platforma open-source a demonstrat o fidelitate superioară a suprafeței și deviații mai mici ale conturilor anatomice. Artefactele dentare au influențat diferit cele două metode, OS-AI fiind mai sensibilă la încărcarea cu artefacte, iar C-AI având tendința de suprasedimentare în regiunile cu materiale hiperdense.

Studiul evidențiază faptul că segmentarea mandibulară bazată pe inteligență artificială poate crește semnificativ eficiența fluxurilor digitale, însă performanța depinde de tipul platformei, de severitatea artefactelor și de indicatorii utilizați pentru evaluare. Deși rezultatele confirmă potențialul clinic al segmentării automate, revizuirea și validarea de către experți rămân necesare, în special în cazurile complexe afectate de artefacte severe. Limitările identificate susțin necesitatea dezvoltării unor sisteme IA mai robuste și a unor protocoale standardizate pentru integrarea sigură a pacientului virtual în practica clinică.

Capitolul 7

Studiul 3- : Evaluarea a patru tehnologii de scanare facială 3D: De la fotogrammetrie la sistemele cu lumină structurată în stomatologia clinică

Acest studiu clinic prospectiv a evaluat și comparat patru tehnologii diferite de scanare facială tridimensională (3D) din perspectiva acurateții metrice, a performanței în funcție de orientarea anatomică și a timpului de achiziție a datelor. Cercetarea a inclus un eșantion omogen format din treizeci de tineri adulți sănătoși, fără asimetrii sau anomalii craniofaciale. Pentru a stabili un standard de referință precis, s-au efectuat mai întâi măsurători antropometrice manuale pe fețele participanților cu ajutorul unui șubler digital calibrat, vizând patru distanțe liniare determinate de markeri anatomici specifici plasați în punctele Glabella, Subnasale, Pogonion moale și Tragus (stâng și drept). Cele patru sisteme digitale testate au fost reprezentate de dispozitivul manual cu lumină structurată în infraroșu Revopoint POP 2, camera cu senzori de profunzime Bellus 3D Face Camera Pro, aplicațiile mobile: de fotogrammetrie Polycam și bazată pe Inteligență Artificială LumaAI, care utilizează Câmpuri de Radiație Neurală (NeRF) pentru reconstrucție din secvențe video. Modelele virtuale obținute au fost ulterior analizate computerizat într-un software specializat pentru calcularea automată a distanțelor corespunzătoare (Figura 7.1).

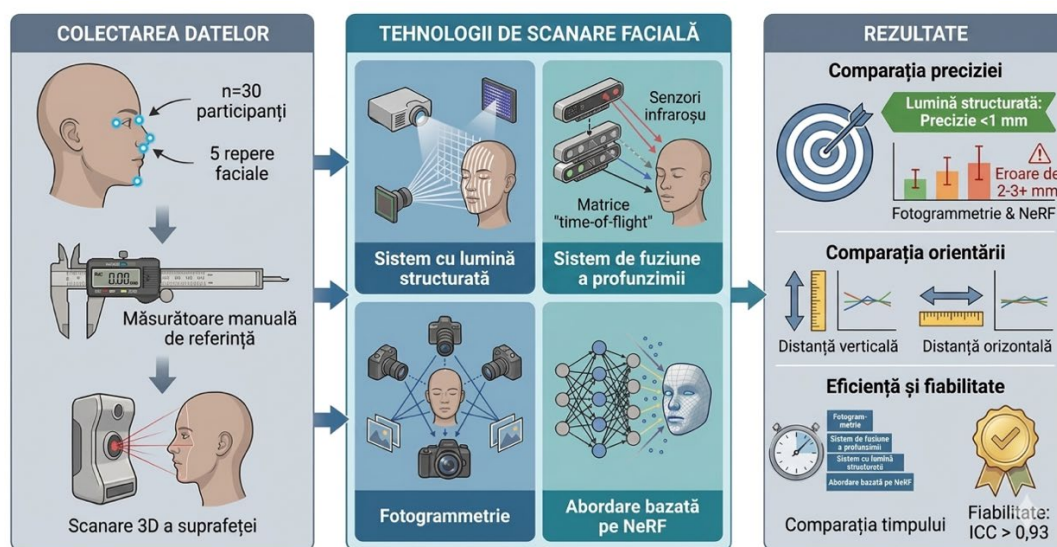


Figura 7.1 Fluxul de lucru al studiului.

Rezultatele au evidențiat o tendință generală și semnificativă a tuturor sistemelor digitale de a supraestima distanțele fizice reale, însă amplitudinea acestor erori a variat considerabil în funcție de tehnologia utilizată. Dispozitivul Revopoint POP 2 a demonstrat cea mai mare acuratețe generală, înregistrând cele mai mici deviații față de măsurătorile manuale, de obicei sub pragul de un milimetru. Sistemul Bellus 3D a oferit o precizie

moderată, remarcându-se printr-o fidelitate ridicată pe linia mediană verticală, dar înregistrând erori sistematice de supraestimare pe distanțele laterale orizontale. La polul opus, metodele de reconstrucție pasivă, respectiv aplicația Polycam și LumaAI, au prezentat cele mai mari discrepanțe metrice, erorile depășind frecvent pragul clinic acceptabil de doi până la trei milimetri. De asemenea, analiza statistică a relevat că orientarea anatomică influențează direct calitatea reconstrucției, toate scanerile înregistrând erori semnificativ mai mari pe axa orizontală comparativ cu măsurătorile verticale de pe linia mediană a feței.

În ceea ce privește eficiența fluxului de lucru, aplicația Polycam s-a dovedit a fi cea mai rapidă metodă de captură digitală, urmată îndeaproape de sistemul Bellus 3D. În schimb, LumaAI a necesitat cel mai lung timp de achiziție din cauza procedurii complexe de înregistrare video pe mai multe niveluri rotaționale, fiind substanțial mai lentă decât restul tehnologiilor evaluate. În concluzie, este recomandată utilizarea sistemelor active cu lumină structurată pentru procedurile din stomatologia clinică unde precizia milimetrică este critică, cum ar fi ortodonția sau protetica. Tehnologiile pasive și cele bazate pe inteligență artificială, deși sunt extrem de accesibile și rapide, rămân în prezent limitate la simulări estetice grosiere, scopuri educaționale sau comunicarea inițială cu pacientul, având nevoie de dezvoltări viitoare pentru a atinge standardele de acuratețe clinică necesare.

Capitolul 8

Studiul 4 - Crearea automată a pacientului virtual orofacial: cohorte MSCT vs CBCT

Studiul compară pentru prima dată impactul a două tehnici tomografice diferite, și anume tomografia computerizată multistrat (MSCT) și tomografia computerizată cone beam (CBCT), în crearea automată a pacientului virtual în stomatologie. Pacientul virtual reprezintă un model tridimensional care suprapune scanarea intraorală, scanarea facială și tomografia, oferind o reprezentare completă a structurilor dentare și faciale ale pacientului.

Obiectivele principale ale studiului au inclus crearea automată a pacientului virtual din scanări faciale, scanări intraorale și tomografii, compararea a trei metode de înregistrare (bazată pe IA, IA-rafinat și SAR semi-automată care reprezintă referința standard), precum și evaluarea impactului țesuturilor moi asupra înregistrării pentru cele două tehnici tomografice.

Eșantionul a inclus 20 de adolescenți (11 băieți și 9 fete, cu vârsta medie de aproximativ 15 ani) aflați în tratament ortodontic interceptiv pentru malocluzii scheletale de clasa a II-a sau a III-a. Zece pacienți au avut date MSCT împreună cu scanări intraorale și faciale, iar ceilalți zece au avut date CBCT împreună cu aceleași tipuri de scanări. Evaluarea a vizat acuratețea prin măsurarea erorilor de înregistrare pe cele trei treimi ale feței (superioară, medie și inferioară), consistența prin calcularea fiabilității intra- și inter-observator folosind coeficientul de corelație Spearman, eficiența temporală prin măsurarea duratei totale pentru fiecare metodă, și distanța de suprafață dintre scanarea facială înregistrată și redarea țesuturilor moi din tomografia.

În ceea ce privește acuratețea înregistrării, toate cele trei metode au atins o acuratețe de sută la sută pentru treimea superioară și medie a feței, atât pentru MSCT cât și pentru CBCT, fără diferențe statistice semnificative între ele. Totuși, treimea inferioară a feței a prezentat mai multe inexactități. Pentru pacienții cu MSCT, 30% dintre cazuri nu au necesitat corecții, 60% au necesitat corecții minore, iar 10% au necesitat corecții majore. Pentru pacienții cu CBCT, doar 20% nu au necesitat corecții, în timp ce 40% au necesitat corecții minore și tot 40% au necesitat corecții majore. Cu toate acestea, nu au fost identificate diferențe statistice semnificative între cele trei metode sau între MSCT și CBCT.

Referitor la consistența metodelor, înregistrarea bazată pe inteligență artificială, atât bazat pe IA cât și IA-rafinat, a demonstrat o consistență perfectă cu un coeficient de corelație Spearman de 1 pentru ambele tehnici tomografice. Metoda semi-automată SAR a prezentat o consistență ușor mai scăzută, cu coeficienți intra-observator între 0.997 și 1 și inter-observator de 0.997 pentru MSCT, și coeficienți intra-observator între 0.757 și 1 și inter-observator de 0.895 pentru CBCT, indicând o variabilitate mai mare în cazul CBCT.

Eficiența timpului a reprezentat unul dintre cele mai importante avantaje ale metodelor bazate pe inteligență artificială. Pentru MSCT, metodele bazate pe IA și IA-rafinat au necesitat doar 24.9 secunde atât pentru înregistrare cât și pentru timpul total, în timp ce metoda SAR a necesitat 242.3 secunde pentru înregistrare și 313.7 secunde în total. Pentru CBCT, metodele bazate pe IA și IA-rafinat au necesitat 28.5 secunde, similar cu MSCT, însă metoda SAR a necesitat 275.7 secunde pentru înregistrare și 850.3 secunde în total, semnificativ mai mult decât pentru MSCT. Această diferență se datorează complexității mai mari a segmentării la CBCT, care utilizează valori de gri nestandardizate, spre deosebire de unitățile Hounsfield standardizate utilizate de MSCT.

În privința impactului țesuturilor moi asupra înregistrării, nu au fost identificate diferențe semnificative în distanța medie de suprafață între MSCT și CBCT. Metodele bazate pe inteligență artificială au generat distanțe de suprafață mai mici comparativ cu metoda semi-automată, indicând o acuratețe superioară. Important, gravitatea și poziționarea diferită a pacientului (poziție supină la MSCT versus verticală la CBCT) nu au afectat semnificativ înregistrarea țesuturilor moi, sugerând că ambele tehnici sunt fiabile independent de poziția pacientului(Figura 8.1).

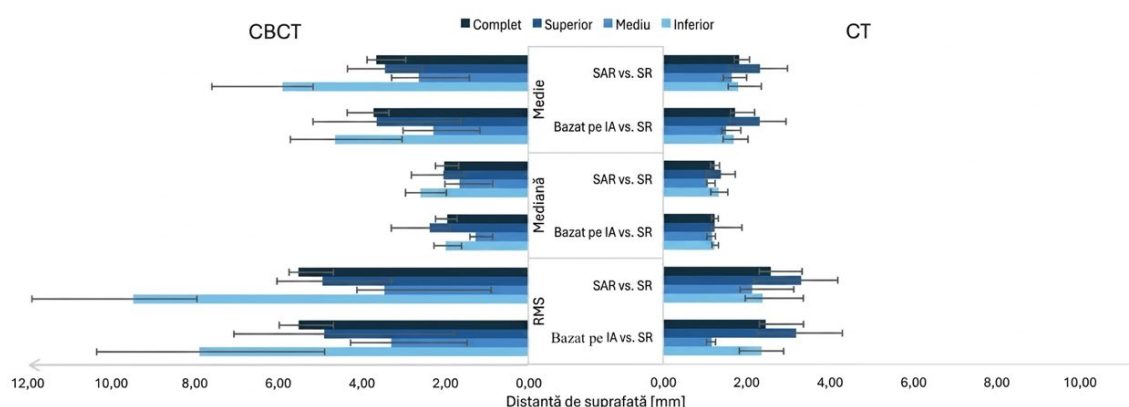


Figura 8.1 Distanța de suprafață între randarea de suprafață prin tomografie computerizată (cu fascicul conic) și scanarea facială înregistrată. CT: tomografie computerizată; CBCT: tomografie computerizată cu fascicul conic; IA: inteligență artificială; SAR: înregistrare semi-automată SR: randare de suprafață RMS: valoare medie pătratică (Root Mean Square)[39]

Studiul demonstrează că inteligența artificială permite crearea rapidă, precisă și consistentă a pacientului virtual folosind orice tehnică tomografică, fie MSCT fie CBCT. Toate cele trei metode evaluate (bazat pe IA, IA-rafinat și SAR) ating o acuratețe ridicată în crearea pacientului virtual, însă metodele bazate pe inteligență artificială oferă avantaje semnificative. Acestea includ o consistență perfectă care elimină variabilitatea umană în procesul de înregistrare, precum și o eficiență temporală superioară, fiind de aproximativ zece ori mai rapide decât metoda semi-automată tradițională.

Comparația dintre CBCT și MSCT relevă faptul că ambele tehnici sunt fiabile pentru crearea pacientului virtual, deși CBCT tinde să prezinte mai multe discrepanțe, în special în treimea inferioară a feței. Timpul total necesar este semnificativ mai lung pentru CBCT din cauza dificultăților inerente în segmentarea imaginilor care nu beneficiază de unitățile

Hounsfield standardizate. Înregistrarea țesuturilor moi s-a dovedit echivalentă pentru ambele tehnici, ceea ce confirmă că poziționarea diferită a pacientului nu afectează semnificativ rezultatul final.

Din perspectivă clinică, studiul demonstrează că metodele bazate pe inteligență artificială pot facilita integrarea pacientului virtual în practica clinică de rutină, oferind multiple beneficii. Acestea includ posibilitatea realizării unui diagnostic personalizat mai precis, planificarea eficientă și exactă a tratamentului, aplicații valoroase în educația dentară pentru formarea studenților și specialiștilor, precum și îmbunătățirea semnificativă a comunicării cu pacientul prin vizualizarea clară a planului de tratament. Integrarea acestor tehnologii în fluxul de lucru digital stomatologic reprezintă un pas important către medicina dentară personalizată și de precizie.

Principalele limitări ale studiului constau în eșantionul relativ redus de douăzeci de pacienți și neomogenitatea acestuia, deoarece pacienții evaluați prin MSCT și cei evaluați prin CBCT nu au fost identici din motive evidente de radioprotecție. Cu toate acestea, pacienții incluși au fost de vârstă similară și au prezentat condiții ocluzale comparabile, ceea ce asigură o minimă comparabilitate între grupuri. Studii viitoare cu eșantioane mai mari și mai diverse, incluzând pacienți cu diferite clasificări scheletale, ar putea oferi rezultate și mai relevante pentru practica clinică.

Concluzii generale

Cercetarea desfășurată în cadrul acestei teze de doctorat a confirmat ipoteza centrală, conform căreia integrarea datelor faciale tridimensionale, a scanărilor intraorale, a informațiilor imagistice radiologice și a instrumentelor bazate pe inteligență artificială permite dezvoltarea unui pacient virtual orofacial mai precis, mai complet și mai util în stomatologia clinică, în comunicarea interdisciplinară și în educația medicală. Pacientul virtual nu mai poate fi privit, în lumina rezultatelor obținute, ca un model experimental, ci ca un instrument operațional, validat tehnic și clinic, pregătit pentru integrarea în fluxurile de lucru ale practicii stomatologice curente.

Obiectivul general al cercetării — evaluarea și integrarea unor tehnologii digitale avansate utilizate în construirea pacientului virtual orofacial, cu aplicabilitate în stomatologia clinică, în comunicarea interdisciplinară și în educația medicală — a fost atins

prin parcurgerea sistematică a celor patru studii care alcătuiesc partea de contribuții personale. Fiecare studiu a adus dovezi măsurabile pentru un nivel distinct al pacientului virtual, iar împreună acestea conturează un flux complet, automatizat, reproductibil și eficient din punct de vedere temporal, validat pe cohorte clinice reale.

Contribuțiile personale sunt grupate astfel: **contribuții metodologice** (cadru conceptual unitar al tezei, metodologia generală unificată, primul *scoping review* PRISMA-ScR în literatura de specialitate pe această temă); **contribuții tehnologice** (compararea originală a platformelor IA open-source vs comerciale pentru segmentare mandibulară, compararea pentru prima dată într-un singur protocol *in vivo* a patru tehnologii distincte de scanare facială, validarea cantitativă a fluxului automat de creare a pacientului virtual pe două cohorte tomografice independente); **contribuții clinico-translaționale** (trei publicații proprii care demonstrează aplicabilitatea fluxului digital în implantologie ghidată, reconstrucție maxilo-facială prin epiteze auriculare și provizorie estetică imediată; recomandări practice diferențiate pentru selectarea tehnologiei de scanare facială; susținerea științifică a paradigmei minim invazive); **contribuții educaționale și de comunicare** (validarea cantitativă a pacientului virtual ca instrument de comunicare medic–pacient și inter-specialități; direcții pentru utilizarea pacientului virtual ca resursă pedagogică).

Direcțiile de cercetare deschise includ: validarea pacientului virtual pe cohorte mai mari și mai diverse (anomalii cranio-faciale, dentiție mixtă, pacienți pediatrici); trecerea de la pacientul virtual static la pacientul virtual cinematic prin înregistrarea cinematicii mandibulare individualizate; dezvoltarea unor protocoale de validare automată a calității pacientului virtual; transformarea pacienților virtuali validați în resurse pedagogice standardizate; și integrarea pacientului virtual cu tehnologii de realitate augmentată și virtuală imersivă.

Bibliografie

- 1] Joda T, Gallucci GO. The virtual patient in dental medicine. Clin Oral Implants Res 2015;26:725–6. [https://doi.org/https://doi.org/10.1111/clr.12379](https://doi.org/10.1111/clr.12379).
- [2] Joda T, Gallucci GO, Wismeijer D, Zitzmann NU. Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. Comput Biol Med 2019;108:93–100. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.03.012>.

- [3] Mangano Fabrizia; Migliario Mario; Mortellaro Carmen; Mangano Francesco CL. Combining Intraoral Scans, Cone Beam Computed Tomography and Face Scans: The Virtual Patient. *J Craniofac Surg* 2018;29:2241–6. <https://doi.org/10.1097/scs.0000000000004485>.
- [4] Shujaat S, Bornstein MM, Price JB, Jacobs R. Integration of imaging modalities in digital dental workflows - possibilities, limitations, and potential future developments. *Dentomaxillofacial Radiology* 2021;50:20210268. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210268>.
- [5] Revilla-León Miguel; Vyas Shantanu; Barmak Basir A.; Özcan Mutlu; Att Wael; Krishnamurthy Vinayak R. MG-P. Artificial intelligence applications in restorative dentistry: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2021;128:867–75. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.02.010>.
- [6] Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health* 2017;17. <https://doi.org/10.1186/S12903-017-0442-X>.
- [7] Swennen GRJ, Mollemans W, Schutyser F. Three-dimensional treatment planning of orthognathic surgery in the era of virtual imaging. *J Oral Maxillofac Surg* 2009;67:2080–92. <https://doi.org/10.1016/J.JOMS.2009.06.007>.
- [8] Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF. New Methods to Evaluate Craniofacial Deformity and to Plan Surgical Correction. *Semin Orthod* 2011;17:225–34. <https://doi.org/10.1053/J.SODO.2011.02.006>.
- [9] Burlacu Vatamanu OE, Cristache CM, Drafta S, Nimigean VR. Evaluation of Four 3D Facial Scanning Technologies: From Photogrammetry to Structured-Light Systems in Clinical Dentistry. *Dentistry Journal* 2026, Vol 14, 2026;14. <https://doi.org/10.3390/DJ14020113>.
- [10] Swennen GRJ, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, et al. A cone-beam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J Craniofac Surg* 2009;20:297–307. <https://doi.org/10.1097/SCS.0B013E3181996803>.
- [11] Maal TJJ, Plooi JM, Rangel FA, Mollemans W, Schutyser FAC, Bergé SJ. The accuracy of matching three-dimensional photographs with skin surfaces derived from cone-beam computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2008;37:641–6. <https://doi.org/10.1016/J.IJOM.2008.04.012>.
- [12] Nkenke E, Zachow S, Benz M, Maier T, Veit K, Kramer M, et al. Fusion of computed tomography data and optical 3D images of the dentition for streak artefact correction in the simulation of orthognathic surgery. *Dentomaxillofac Radiol* 2004;33:226–32. <https://doi.org/10.1259/DMFR/27071199>.
- [13] Grauer D, Cevidanesh LSH, Proffit WR. Working with DICOM craniofacial images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;136:460–70. <https://doi.org/10.1016/J.AJODO.2009.04.016>.

- [14] Marchetti C, Bianchi A, Bassi M, Gori R, Lamberti C, Sarti A. Mathematical modeling and numerical simulation in maxillofacial virtual surgery. *J Craniofac Surg* 2007;18:826–32. <https://doi.org/10.1097/SCS.0B013E318068434B>.
- [15] Mollemans W, Schutyser F, Nadjmi N, Maes F, Suetens P. Predicting soft tissue deformations for a maxillofacial surgery planning system: From computational strategies to a complete clinical validation. *Med Image Anal* 2007;11:282–301. <https://doi.org/10.1016/J.MEDIA.2007.02.003>.
- [16] Xia JJ, Gateno J, Teichgraeber JF. New clinical protocol to evaluate craniomaxillofacial deformity and plan surgical correction. *J Oral Maxillofac Surg* 2009;67:2093–106. <https://doi.org/10.1016/J.JOMS.2009.04.057>.
- [17] Ruggiero F, Borghi A, Bevini M, Badiali G, Lunari O, Dunaway D, et al. Soft tissue prediction in orthognathic surgery: Improving accuracy by means of anatomical details. *PLoS One* 2023;18:e0294640. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0294640>.
- [18] Bruynseels K, de Sio FS, van den Hoven J. Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Front Genet* 2018;9:320848. <https://doi.org/10.3389/FGENE.2018.00031/TEXT>.
- [19] Slavicek R. Relationship between occlusion and temporomandibular disorders: Implications for the gnathologist. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 2011;139:10–6. <https://doi.org/10.1016/J.AJODO.2010.11.011>.
- [20] Joda T, Braegger U, Gallucci G. Systematic literature review of digital three-dimensional superimposition techniques to create virtual dental patients. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 2015;30.

Listă lucrări publicate

1. **Burlacu Vatamanu OE**, Alzyoud Z, Elgarba BM, Fontenele RC, Cristache CM, Jacobs R. Clear aligner therapy for minimally invasive dentistry: A scoping review. *J Dent*. 2025 Oct;161:105968. doi: 10.1016/j.jdent.2025.105968. Epub 2025 Jul 11. PMID: 40653000. (indexat WOS IF 5,5 si PubMed) (Capitolul 2- subcapitolul 2.5, Capitolul 5)
2. **Burlacu Vatamanu OE**, Cristache CM, Drafta S, Nimigean VR. Evaluation of Four 3D Facial Scanning Technologies: From Photogrammetry to Structured-Light Systems in Clinical Dentistry. *Dent J (Basel)*. 2026 Feb 14;14(2):113. doi: 10.3390/dj14020113. PMID: 41744951; PMCID: PMC12939990. (indexat WOS IF 3,1 si PubMed)(Capitolul 1-subcapitolul 1.1,Capitolul 2-subcapitolul 2.4, Capitolul 7)
3. Jindanil T, **Burlacu-Vatamanu OE** (contributie egala cu primul autor), Baldini B, Meyns J, Meewis J, Fontenele RC, de Llano Perula MC, Jacobs R. Automated orofacial

virtual patient creation using two cohorts of MSCT vs. CBCT scans. Head Face Med. 2025 Mar 28;21(1):21. doi: 10.1186/s13005-025-00500-1. PMID: 40156051; PMCID: PMC11951535. (indexat WOS IF 2,6 si PubMed) (Capitolul 1-subcapitolul 1.3, Capitolul 2-subcapitolul 2.4, Capitolul 6- subcapitolele 6.4, 6.1, Capitolul 7-subcapitolul 7.1, Capitolul 8)

4. Cristache CM, **Burlacu Vatamanu OE** (autor corespondent), Butnarusu CC, Mihut T, Sgiea ED. Predictable Full Digital Workflow Using Stackable Surgical Templates for Complete Dental Arch Rehabilitation with Implant-Supported Fixed Restorations-Case Series and Proof of Concept. Dent J (Basel). 2024 Oct 30;12(11):347. doi: 10.3390/dj12110347. PMID: 39590397; PMCID: PMC11593087. (indexat WOS IF 3,1 si PubMed) (Capitolul 2- subcapitolele 2.3, 2.5, Capitolul 6- subcapitolul 6.1, Capitolul 7- subcapitolul 7.1)

5. Tarba CI, Dragomir I, Baciui IM, **Burlacu Vatamanu OE** (autor corespondent), Ghionea IG, Cristache CM. A Hybrid Workflow for Auricular Epithesis: Proof of Concept Integrating Mold Design and the Virtual Patient. Prosthesis. 2025; 7(5):114. <https://doi.org/10.3390/prosthesis7050114> (indexat WOS IF 4,5) (Capitolul 7- subcapitolele 7.1, 7.2)

6. Jindanil T, **Burlacu-Vatamanu OE**, Meyns J, Meewis J, Fontenele RC, Perula MCL, Jacobs R. Automated orofacial virtual patient creation: A proof of concept. J Dent. 2024 Nov;150:105387. doi: 10.1016/j.jdent.2024.105387. Epub 2024 Oct 2. PMID: 39362299. (indexat WOS IF 5,5 si PubMed) (Capitolul 1-subcapitolul 1.1, Capitolul 2- subcapitolul 2.4)

7. Andrade-Bortoletto MFS, Du X, Dawood EA, **Burlacu Vatamanu OE**, Tarce M, Fontenele RC, Freitas DQ, Jacobs R. What is the role of AI-driven automation in static surgical guide design? A scoping review. J Dent. 2025 Dec;163:106193. doi: 10.1016/j.jdent.2025.106193. Epub 2025 Oct 24. PMID: 41284519. (indexat WOS IF 5,5 si PubMed) (Capitolul 2- subcapitolul 2.1)

8. Tarba CI, Cristache MA, Baciui IM, Cristache CM, **Burlacu Vatamanu OE**, Oancea L. Advancements in Digital Workflows for 3D-Printed Maxillofacial Soft Prostheses: Exploring Design and Materials in Direct Additive Manufacturing: A Scoping Review. Applied Sciences. 2025; 15(4):1701. <https://doi.org/10.3390/app15041701>(indexat WOS IF 2,5) (Capitolul 8- subcapitolul 8.4)

9. Ghionea IG, Burlacu **Vatamanu OE** (autor corespondent), Cristescu AM, David M, Stancu IC, Butnarusu C, Cristache CM. A Finite Element Analysis of a Tooth-Supported 3DPrinted Surgical Guide without Metallic Sleeves for Dental Implant Insertion. Applied Sciences. 2023; 13(17):9975. <https://doi.org/10.3390/app13179975> (indexat WOS IF 2,5) (Capitolul 1-subcapitolul 1.1)