

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

***INSTRUMENTAȚIA SPINALĂ PER PRIMAM ÎN STABILIZAREA
AFECȚIUNILOR DEGENERATIVE ALE COLOANEI VERTEBRALE
LOMBARE***

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:

PROF. UNIV. DR. CIUREA ALEXANDRU-VLADIMIR

Student-doctorand: ENACHE ADRIAN-VALENTIN

1. Cuprins

Introducere	1
I. Partea generală.....	5
1. Fundamente anatomice, biomecanice și conceptuale ale coloanei lombare și reconstrucției intercorporale	5
1.1. Noțiuni de anatomie și fiziologie a coloanei lombare	10
1.2. Considerații generale privind patologia spinală lombară	16
1.3. Spondilolistezis.....	26
2. Patologia coloanei lombare și implicațiile clinice pentru reconstrucția intercorporală	34
2.1. Evaluarea clinică preoperatorie	34
2.2. Instrumentația spinală utilizată în reconstrucția lombară	38
2.3. Chirurgia spinală minim invazivă în patologia lombară degenerativă.....	39
2.4. Cuștile PEEK.....	40
II. Contribuții personale.....	43
3. Ipoteza de lucru și obiectivele generale	43
3.1. Ipoteza de lucru	43
3.2. Obiective generale.....	45
3.3. Relevanța integrativă a celor două studii pentru teză.....	47
4. Metodologia generală a cercetării.....	49
5. Studiu 1: Rezultate clinice și chirurgicale la pacienții cu patologii ale coloanei lombare: un studiu retrospectiv	54
5.1. Introducere	54
5.1.1. Designul și proprietățile materialelor cuștilor lombare	55
5.1.1.1. Cuști statice versus extensibile	55
5.1.1.2. Biomateriale: PEEK, Titan, Titan Poros și Designuri Hibride	56
5.1.2. Performanța biomecanică și modurile de defectare, distribuția sarcinii și interacțiunea plăcii terminale	58
5.1.2.1. Suport pentru osteointegrare și fuziune.....	60
5.1.2.2. Subsidență, migrație și pierderea corecției.....	61
5.1.3. Dovezi clinice și provocări actuale.....	63

5.1.3.1. Rezultate radiologice și clinice din proiectarea contemporană a cuștilor	63
5.1.3.2. Implicații clinice ale utilizării cuștilor statice și extensibile	64
5.1.3.3. Inovații emergente și direcții viitoare	64
5.1.4. Proiectarea optimizată a cuștilor specifice pacientului.....	65
5.1.5. Cuști bioactive și proiectate la suprafață	66
5.1.6. Perspective pentru implanturile lombare de generație următoare, asemănătoare protezelor	67
5.2. Material și metodă	68
5.2.1. Designul și contextul studiului.....	68
5.2.2. Criterii de eligibilitate.....	68
5.2.3. Date extrase	68
5.2.4 Analiză statistică	69
5.2.4.1. Pregătirea datelor, date lipsă și verificarea ipotezelor	69
5.2.4.2. Comparații univariabile și raportarea dimensiunii efectului	69
5.2.4.3. Strategia de modelare multivariabilă.....	70
5.2.4.4. Valori aberante și analize de sensibilitate.....	72
5.2.4.5. Raportare și reproducibilitate.....	72
5.2.5. Aprobare etică	72
5.2.6. Tehnică chirurgicală	73
5.3. Rezultate	73
5.3.1. Demografia pacienților	73
5.3.2. Distribuția diagnosticelor	78
5.3.3. Tipuri de intervenții chirurgicale și utilizarea instrumentației	79
5.3.4. Rezultate postoperatorii	80
5.3.5. Analize de subgrupuri	82
5.3.6. Constatări suplimentare	82
5.3.7. Analiza multivariabilă a factorilor asociați spitalizării prelungite (LOS > 4 zile)	82
5.4. Discuții	83
5.4.1. Limitări	87

5.5. Concluzii	88
6. Studiul 2: Construcție protetică modulară de tip cage pentru reconstrucția intervertebrală lombară: studiu de proiectare geometrică bazat pe CAD și analiză prin elemente finite.....	90
6.1. Introducere	90
6.2. Material și metodă	95
6.3. Rezultate	98
6.3.1. Proiectarea dispozitivului și caracteristicile structurale	98
6.3.2 Analiza elementelor finite.....	105
6.3.2.1. Modelul cu elemente finite al construcției cuștii de 8 mm	105
6.3.2.2. Analiza elementelor finite a configurației cuștii de 18 mm	109
6.3.2.3 Analiză comparativă	115
6.3.2.4 Analiza elementelor finite a ansamblului coloanei lombare–cușcă	119
6.4. Discuții	124
6.4.1. Limitări	136
6.5. Concluzii	138
7. Concluzii și contribuții personale	141
7.1. Concluzii	141
7.2. Contribuții personale	144
7.2.1. Dezvoltarea unui cadru de cercetare doctorală integrat și secvențial .	144
7.2.2. Implementarea unei metodologii mixte în Studiul I	144
7.2.3. Colectarea și prelucrarea statistică a unei cohorte inițiale de pacienți operați pentru patologii lombare într-un singur centru.....	145
7.2.4. Identificarea unor constatări clinic relevante privind evoluția postoperatorie timpurie în cohorta autorului	145
7.2.5. Modelarea multivariată a spitalizării prelungite după intervenția chirurgicală	145
7.2.6. Proiectarea unei proteze intercorporale lombare modulare originale, asemănătoare unei cuști	145
7.2.7. Utilizarea sistematică a două platforme ingineresti complementare într-un singur flux de lucru	146
7.2.8. Prima evaluare biomecanică comparativă a două configurații distincte de implanturi modulare.....	146

7.2.9. Demonstrarea modului în care înălțimea implantului influențează solicitarea mecanică locală în cadrul conceptului modular	146
7.2.10. Definirea limitelor translaționale și a necesităților de validare ulterioară	147
Bibliografie.....	148
Anexe.....	171

2. Problema fundamentală a cercetării

Patologia degenerativă a coloanei vertebrale lombare reprezintă o problemă majoră de sănătate publică, caracterizată prin prevalență crescută și impact semnificativ asupra calității vieții [1]. Afecțiuni precum hernia de disc, stenoza spinală lombară și spondilolistezisul determină frecvent durere cronică, deficit neurologic și limitare funcțională, constituind indicații majore pentru intervenții chirurgicale de stabilizare [2].

În acest context, fuziunea intercorporală lombară a devenit o metodă standard de tratament, având ca obiective restaurarea înălțimii discului, corecția alinierii sagitale și stabilizarea segmentară [3]. Cu toate acestea, în ciuda progreselor tehnologice și chirurgicale, implanturile intersomatice utilizate în aceste proceduri continuă să prezinte limitări importante. Complicații precum subsidența, migrarea implantului și pseudoartroza persistă la rate semnificative, afectând rezultatele clinice și necesitând uneori reintervenții [4].

Problema fundamentală abordată în această teză constă în identificarea limitărilor biomecanice ale implanturilor intersomatice actuale și în evaluarea modului în care designul acestora influențează distribuția sarcinilor și stabilitatea constructului spinal [5].

3. Ipoteza și obiectivele cercetării

Ipoteza centrală a tezei este că optimizarea designului implanturilor intersomatice, în special prin utilizarea unor configurații modulare și prin integrarea analizei biomecanice avansate, poate conduce la o distribuție mai favorabilă a tensiunilor și la reducerea riscului de complicații, în special a subsidenței.

Pornind de la această ipoteză, au fost formulate următoarele obiective principale:

- analiza detaliată a anatomiei și biomecanicii coloanei lombare relevante pentru reconstrucția intercorporală;
- evaluarea critică a patologiilor degenerative lombare și a indicațiilor pentru tratamentul chirurgical;
- identificarea limitărilor implanturilor intersomatice utilizate în practica curentă;
- investigarea influenței parametrilor de design asupra comportamentului biomecanic;
- dezvoltarea unor modele conceptuale de implanturi, cu accent pe configurații modulare;
- utilizarea analizei prin elemente finite (FEA) pentru simularea comportamentului biomecanic;
- corelarea rezultatelor teoretice cu implicațiile clinice.

4. Metodologia cercetării

Metodologia utilizată în cadrul acestei teze este una interdisciplinară, combinând analiza teoretică, revizuirea literaturii și modelarea computațională [6].

Modelele tridimensionale dezvoltate prin CAD au fost analizate prin metoda elementelor finite (FEA), tehnică utilizată pe scară largă în evaluarea biomecanică a implanturilor spinale [7–8].

În prima etapă, a fost realizată o analiză amplă a literaturii de specialitate privind anatomia, biomecanica și patologia coloanei lombare, precum și a tehnicilor chirurgicale și implanturilor utilizate în fuziunea intercorporală.

În etapa următoare, au fost dezvoltate modele tridimensionale de implanturi utilizând tehnici de proiectare asistată de calculator (CAD). Aceste modele au fost ulterior analizate prin metoda elementelor finite (FEA), care permite simularea comportamentului biomecanic al structurilor sub diferite condiții de încărcare.

Analiza FEA a permis evaluarea unor parametri esențiali, precum:

- distribuția tensiunilor (stress distribution);
- deplasările structurale;
- factorii de siguranță;
- zonele de concentrare a stresului.

Această metodă oferă avantajul evaluării virtuale a implanturilor înainte de validarea experimentală sau clinică, reducând costurile și timpul necesar dezvoltării Figura 1.

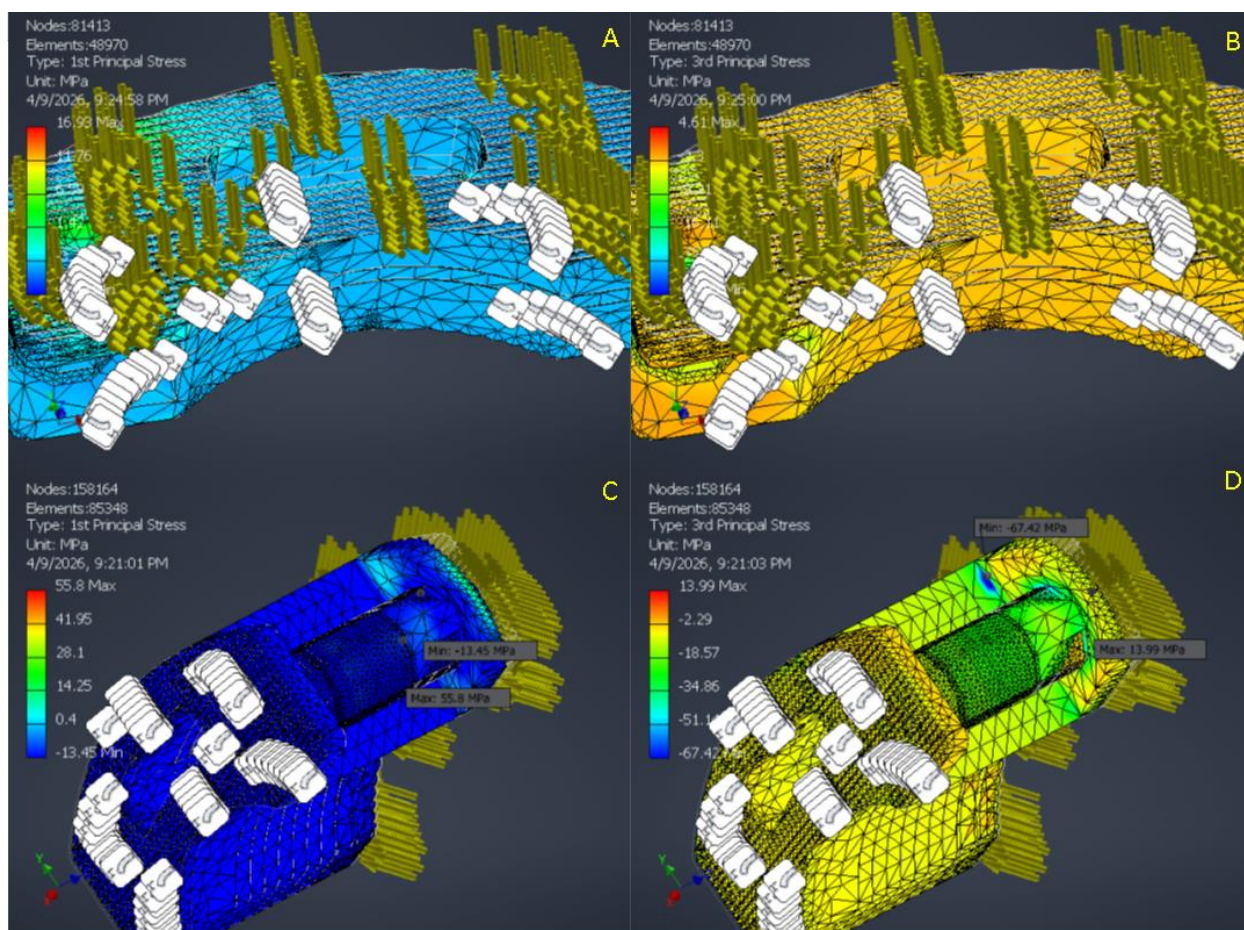


Figura 1. Distribuția comparativă a tensiunilor principale în configurațiile modulare de 8 mm și 18 mm sub încărcare compresivă. Contuurile FEA evidențiază valori mai reduse și predominant compresive în configurația de 8 mm (σ_1 max: 16,93 MPa; σ_3 min: -29,93 MPa), comparativ cu configurația de 18 mm, care prezintă tensiuni semnificativ mai mari și localizate în zona superioară de transfer al sarcinii (σ_1 max: 55,8 MPa; σ_3 min: -67,42 MPa). În ansamblu, configurația extinsă este supusă unor solicitări mecanice mai ridicate decât cea compactă.

5. Partea generală

Prima parte a tezei este dedicată fundamentelor anatomice, fiziologice și biomecanice ale coloanei lombare.

Se evidențiază faptul că coloana lombară reprezintă un sistem biomecanic complex, în care discurile intervertebrale joacă un rol esențial în distribuția sarcinilor, iar articulațiile fațetate și ligamentele contribuie la stabilitate. Alinierea sagitală, în special lordoza lombară, este esențială pentru menținerea echilibrului biomecanic.

Sunt analizate principalele patologii degenerative, inclusiv:

- hernia de disc lombară, caracterizată prin protruzia nucleului pulpos și compresia structurilor nervoase;
- stenoza spinală lombară, determinată de îngustarea canalului vertebral și a foramelor;
- spondilolistezisul, definit prin alunecarea unui corp vertebral.

Se subliniază importanța corelării clinico-imagistice și a selecției adecvate a pacienților pentru tratamentul chirurgical.

De asemenea, sunt analizate mecanismele biomecanice implicate în degenerarea discală și în apariția simptomelor neurologice, precum și rolul factorilor genetici și degenerativi.

6. Contributii Personale

6.1. Contributiile personale se concentrează asupra implanturilor intersomatice și asupra comportamentului lor biomecanic.

Primul studiu al tezei a evaluat rezultatele clinice și factorii asociați duratei de spitalizare la pacienții supuși intervențiilor chirurgicale pentru patologie lombară degenerativă, majoritatea cazurilor fiind tratate prin fuziune instrumentată. Analiza a demonstrat că durata spitalizării postoperatorii a fost în general redusă, cu o mediană de aproximativ trei zile, sugerând eficiența managementului perioperator. În modelul multivariabil, modificările neurologice postoperatorii precoce au fost identificate ca principal factor asociat cu prelungirea spitalizării, în timp ce variabile precum vârsta au avut doar o influență marginală, iar sexul, obezitatea, diabetul sau tipul de cușcă utilizată nu au fost predictorii semnificativi. Deși modificările neurologice au fost în majoritatea cazurilor tranzitorii, prezența acestora subliniază importanța monitorizării atente în perioada postoperatorie. Aceste rezultate contribuie la înțelegerea factorilor clinici care influențează recuperarea timpurie și oferă un cadru pentru optimizarea strategiilor de management perioperator în chirurgia spinală lombară Figura 2.

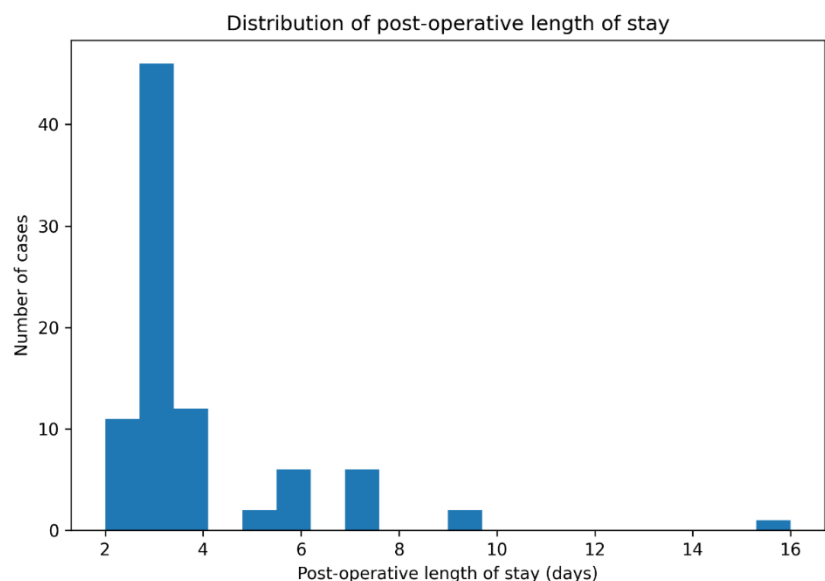


Figura 2. Distribuția duratei de spitalizare postoperatorie.

Al doilea studiu a avut ca obiectiv dezvoltarea și evaluarea biomecanică preliminară, prin modelare CAD și analiză cu elemente finite, a unei construcții protetice modulare asemănătoare unei cuști, analizând modul în care variațiile de înălțime influențează distribuția tensiunilor, deformarea și stabilitatea structurală a implantului [9–11].

Se evidențiază faptul că designul implantului influențează direct:

- distribuția sarcinilor la nivelul plăcilor terminale;
- stabilitatea segmentară;
- riscul de subsidență și migrare.

Sunt analizate principalele caracteristici ale implanturilor:

- dimensiunea și amprenta;
- unghiul lordotic;
- materialul (titan, PEEK);
- poziționarea în spațiul discal.

Se discută avantajele și limitările cuștilor extensibile și ale celor statice, precum și rolul materialelor moderne și al suprafețelor poroase în osteointegrare.

Un element central al cercetării îl reprezintă analiza conceptului de cușcă modulară. Aceasta oferă avantaje teoretice importante, precum:

- reducerea forțelor de inserție;
- distribuția mai uniformă a sarcinilor;
- posibilitatea adaptării intraoperatorii.

Prin analiza FEA, sunt evaluate diferite configurații de implanturi, evidențiindu-se modul în care modificările geometrice influențează comportamentul biomecanic Figura 3.

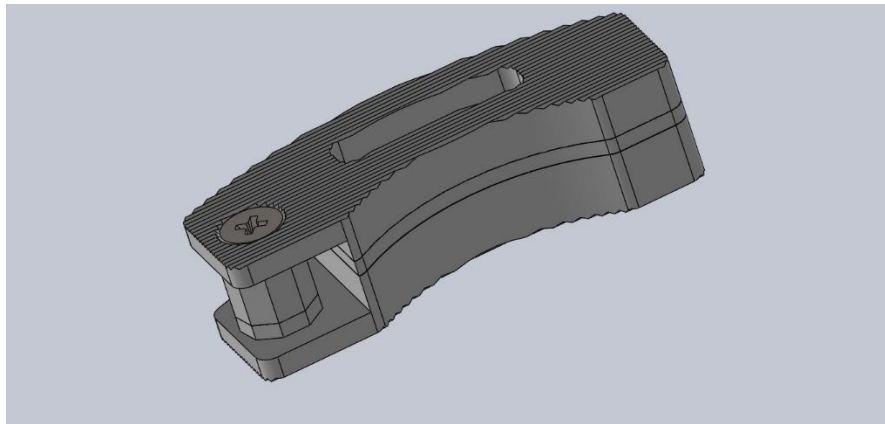


Figura 3. Configurația de 8 mm a construcției protetice modulare, asemănătoare unei cuști, așa cum este văzută când este complet asamblată: reprezentare tridimensională CAD a întregii construcții de 8 mm după asamblarea completă. Această imagine reprezintă configurația strânsă a dispozitivului; Acestea includ părțile terminale (superioare și inferioare) ale construcției, calea centrală de fixare, forma curbată formată de contactul dintre placa de capăt și lamelă și dentariile de pe suprafața exterioară a construcției, care au fost proiectate să ofere stabilitate mecanică inițială suplimentară interfeței implant-os.

Rezultatele arată că:

- implanturile cu amprentă mai mare reduc riscul de subsidență;
- poziționarea anterioară favorizează restaurarea lordozei, dar poate crește stresul pe plăcile terminale;
- configurațiile modulare pot reduce concentrațiile de stres, dar introduc complexitate biomecanică suplimentară.

7. Concluzii și contribuții personale

Rezultatele confirmă faptul că designul implanturilor intersomatice influențează semnificativ distribuția tensiunilor, stabilitatea și riscul de subsidență, în concordanță cu literatura biomecanică existentă [12–13].

Principalele concluzii sunt:

- distribuția tensiunilor la nivelul plăcilor terminale este influențată semnificativ de geometria implantului;
- subsidența este corelată cu concentrațiile locale de stres și cu caracteristicile materialului;
- restaurarea lordozei depinde atât de designul implantului, cât și de poziționarea acestuia;
- configurațiile modulare pot oferi avantaje biomecanice, dar necesită optimizare atentă.

Contribuțiile personale ale tezei constau în:

- integrarea conceptelor anatomice, biomecanice și ingineresti într-un model coerent de analiză;
- dezvoltarea unor modele CAD originale pentru implanturi intersomatice;
- aplicarea analizei FEA pentru evaluarea comparativă a diferitelor configurații;
- propunerea unui concept modular de implant, analizat din punct de vedere biomecanic;
- identificarea unor direcții de optimizare a designului implanturilor.

8. Perspective și direcții viitoare

Cercetarea deschide perspective importante pentru dezvoltarea implanturilor personalizate și optimizate biomecanic. Integrarea inteligenței artificiale în procesul de design și simulare poate permite generarea automată a configurațiilor optime.

De asemenea, sunt necesare:

- studii experimentale pentru validarea rezultatelor;
- studii clinice pentru evaluarea impactului asupra pacienților;
- dezvoltarea unor modele biomecanice mai complexe, care să includă proprietățile biologice ale țesuturilor.

9. Bibliografie

1. Enache AV, Corlatescu AD, Costin HP, Ciurea AV. Clinical and Surgical Outcomes in Patients with Lumbar Spine Pathologies: A Retrospective Study. Reports. 2026;9(1):79. doi:10.3390/reports9010079.
2. Enache AV, Corlatescu AD, Costin HP, Ciurea AV. Lumbar Interbody Cages: Design Characteristics, Biomaterials, Biomechanical Performance, Clinical Challenges, and Emerging Innovations. Cureus. 2026 Mar 15. doi:10.7759/cureus.105284.
3. Waxenbaum JA, Reddy V, Williams C, Futterman B. Anatomy, Back, Lumbar Vertebrae. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing;

2026 [cited 2026 Apr 15]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459278/>

4. Kapetanakis S, Gkantsinikoudis N. Anatomy of lumbar facet joint: a comprehensive review. *Folia Morphol (Warsz)*. 2021;80(4):799-805. doi:10.5603/FM.a2020.0122.
5. Chazal J, Tanguy A, Bourges M, Gaurel G, Escande G, Guillot M, et al. Biomechanical properties of spinal ligaments and a histological study of the supraspinal ligament in traction. *J Biomech*. 1985;18(3):167-176. doi:10.1016/0021-9290(85)90202-7.
6. Salzmann SN, Shue J, Hughes AP. Lateral Lumbar Interbody Fusion—Outcomes and Complications. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2017;10(4):539-546. doi:10.1007/s12178-017-9444-1.
7. Calvo-Echenique A, Cegoñino J, Chueca R, Pérez-del Palomar A. Stand-alone lumbar cage subsidence: A biomechanical sensitivity study of cage design and placement. *Comput Methods Programs Biomed*. 2018;162:211-219. doi:10.1016/j.cmpb.2018.05.022.
8. Jansen JU, Sciortino V, Heuer F, Wilke HJ. A modular cage may prevent endplate damage and improve spinal deformity correction. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2025;125:106502. doi:10.1016/j.clinbiomech.2025.106502.
9. Bashkuev M, Checa S, Postigo S, Duda G, Schmidt H. Computational analyses of different intervertebral cages for lumbar spinal fusion. *J Biomech*. 2015;48(12):3274-3282. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.06.024.
10. Wang R, Wu Z. Recent advancement in finite element analysis of spinal interbody cages: A review. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1041973. doi:10.3389/fbioe.2023.1041973.
11. Beaulieu E, Wise J, Merem I, Comella Z, Afsahi R, Roemer J, et al. A Review of Finite Element Analysis in Spine Surgery Decision-Making. *J Clin Med*. 2026;15(7):2584. doi:10.3390/jcm15072584.
12. Shash YH, Elden RH. Computational analysis of L4-L5 interspinous process devices and interbody fusion spacers using ceramic and polymeric materials via finite element modeling and artificial intelligence. *Sci Rep*. 2025;15(1):36142. doi:10.1038/s41598-025-20870-5.
13. Ball JR, Gallo MC, Kebaish K, Hang N, Ton A, Hernandez F, et al. National Trends in Lumbar Degenerative Spondylolisthesis With Stenosis Treated With Fusion Versus Decompression. *Neurospine*. 2024;21(4):1068-1077. doi:10.14245/ns.2448624.312.
14. Lu CX, Huang ZB, Chen XM, Wu XD. Predicting prolonged postoperative length of stay risk in patients undergoing lumbar fusion surgery: Development and assessment of a novel predictive nomogram. *Front Surg*. 2022;9:925354. doi:10.3389/fsurg.2022.925354.

15. Lundgren ME, Detwiler AN, Lamping JW, Gael SL, Chen NW, Kasir R, et al. Effect of Instrumented Spine Surgery on Length of Stay. JAAOS Glob Res Rev. 2023;7(5). doi:10.5435/JAAOSGlobal-D-22-00231.

Lista cu lucrările științifice publicate

Articole publicate în reviste de specialitate

1. **Enache AV**, Corlatescu AD, Costin HP, Ciurea AV. Clinical and Surgical Outcomes in Patients with Lumbar Spine Pathologies: A Retrospective Study. Y Rep. 2026 Mar 9;9(1):79, FI - 0.6/2026, Q3, capitolul V, pag. 54-88, doi:10.3390/reports9010079
2. **Enache AV**, Costin HP, Corlatescu AD, Iacobescu G, Ciurea AV. Modular Cage-Type Prosthetic Construction for Lumbar Intervertebral Reconstruction: A CAD-Based Geometric Design and Finite Element Analysis Study. Life, FI - 3.4/2026, Q1, capitolul VI, pag. 90-138
3. **Enache AV**, Corlatescu AD, Costin HP, Ciurea AV. Lumbar Interbody Cages: Design Characteristics, Biomaterials, Biomechanical Performance, Clinical Challenges, and Emerging Innovations. Cureus. 2026 Mar 15. doi:10.7759/cureus.105284, capitolul I, pag. 5-40