



UNIVERSITATEA  
LUCIAN BLAGA  
— DIN SIBIU —

Școala doctorală de Științe Inginerești și Matematică  
Domeniul de doctorat: Inginerie Mecanică

## TEZĂ DE DOCTORAT - REZUMAT

**STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND BIOMECANICA  
PICIORULUI UMAN ȘI ALE DEVIATIILOR AXIALE  
EXISTENTE LA NIVELUL ACESTUIA**

Doctorand:

Ing. ANDREI HORIA BRĂNESCU

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. NICOLAE FLORIN COFARU



Prezenta teză de doctorat "Studii și cercetări privind biomecanica piciorului uman și ale deviațiilor axiale existente la nivelul acestuia" conține:

- 9 capitole;
- 281 de figuri;
- 25 de tabele;
- 111 referințe bibliografice.

Studiile și cercetările aferente acestei lucrări s-au materializat pe parcursul a trei ani, lucrarea abordând din punct de vedere biomecanic problematica deviațiilor axiale ale piciorului, mai exact afecțiunea Hallux Valgus.

**CUVINTE CHEIE:** chirurgia piciorului, biomecanica mersului, metoda sistemelor Skeleton, entitate constructiv-anatomică, structura osoasă reală, ansamblu parametrizat, CAD, CAE, analiză cu element finit, osteotomia de deschidere a MT1, CORA (Center of Rotation of Angulation), optimizarea planificării geometrice, program CNC, Haas ST-15Y.

# CUPRINS TEZĂ

Capitolul 1 .....	1
Introducere. Importanța studiului.....	1
Capitolul 2 .....	3
Stadiul actual al cercetărilor privind chirurgia piciorului .....	3
2.1. Noțiuni de anatomie a piciorului.....	3
2.1.1. Structura osoasă – Generalități .....	3
2.1.2. Oasele piciorului .....	5
2.1.3. Articulațiile - Generalități.....	9
2.1.4. Caracteristici mecanice ale oaselor .....	13
2.2. Noțiuni de biomecanică a piciorului .....	17
2.2.1. Referințe geometrice: origini, axe și plane .....	17
2.2.2. Biomecanica piciorului .....	19
2.2.3. Lanțurile cinematice de la nivelul piciorului .....	25
2.2.4. Biomecanica mersului .....	27
2.2.5. Modele biomecanice ale piciorului.....	30
2.3. Deviațiile axiale statice ale piciorului.....	37
2.3.1. Elemente geometrice. Biomecanica deviațiilor axiale de la nivelul piciorului. ...	37
2.3.2. Stadiul actual privind modelarea CAD-CAE a structurilor anatomice .....	45
2.3.3. Modelarea structurilor anatomice prin mijloace CAD-CAE. Generalități. ....	47
2.4. Strategii de corecție și tratament ale deviațiilor axiale ale piciorului .....	49
2.5. Dispozitive utilizate în studiul afecțiunilor piciorului .....	58
Capitolul 3 .....	63
Obiectivele tezei de doctorat.....	63
Capitolul 4 .....	65
Modelarea CAD a ansamblului osteoarticular al piciorului uman.....	65
4.1. Generalități.....	65
4.2. Modele CAD ale sistemului osos de la nivelul piciorului .....	66
4.2.1. Modelarea 3D luând în considerare structura osoasă reală .....	66
4.2.2. Modelarea CAD utilizând entitățile constructiv-anatomice .....	67
4.3. Asamblarea parametrizată cu ajutorul sistemelor Skeleton.....	73
4.3.1. Modelarea CAD generalizată a ansamblului membrului inferior în poziție ortostatică .....	74

4.3.2. Generarea modelelor CAD ale mișcărilor fundamentale ale piciorului .....	76
4.3.3. Modelarea piciorului în timpul mersului .....	78
4.4. Modelarea deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus .....	84
4.4.1. Modelarea parametrizată a deviației Hallux Valgus în formă ușoară .....	88
4.4.2. Modelarea parametrizată a deviației Hallux Valgus în formă moderată .....	88
4.4.2. Modelarea parametrizată a deviației Hallux Valgus în formă severă .....	92
4.5. Modelarea CAD a intervențiilor chirurgicale specifice afecțiunii Hallux Valgus .....	95
4.5.1. Osteotomia Akin .....	95
4.5.2. Osteotomia Chevron .....	100
4.5.3. Osteotomia Scarf .....	103
4.5.4. Strategia Lapidus .....	108
4.5.5. Osteotomia de deschidere a metatarsianului I .....	113
Capitolul 5 .....	119
Simulări numerice privind osteotomiile de corecție ale deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus .....	119
5.1. Generalități legate de metoda analizei cu element finit .....	119
5.2. Analiza prin metoda elementelor finite a osteotomiei de deschidere a primului metatarsian .....	120
Capitolul 6 .....	133
Proiectarea și executarea unui dispozitiv specializat pentru realizarea cercetărilor experimentale .....	133
Capitolul 7 .....	143
Utilizarea tehnologiilor aditive pentru studiul deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus .....	143
7.1. Aspecte generale .....	143
7.1.1. FDM – Procesul bazat pe extrudarea de material .....	144
7.1.2. SLA – Stereolitografia .....	145
7.2. Realizarea replicilor osoase prin FA .....	147
7.2.1. Printarea replicilor osoase umane utilizând metoda FDM .....	147
7.2.2. Printarea replicilor osoase umane utilizând metoda SLA .....	150
7.3. Elaborarea replicilor osoase porcine pentru validarea experimentului preliminar .	153
Capitolul 8 .....	155
Cercetări experimentale privind osteotomia de deschidere a primului metatarsian .....	155
8.1. Generalități, scop și obiective .....	155
8.2. Planificarea geometrică a osteotomiei. Elaborarea de program CNC. Prelucrarea osteotomiei și a angulării de corecție .....	156

8.2.1. Planificarea geometrică a osteotomiei.....	156
8.2.2. Realizarea efectivă a prelucrărilor necesare osteotomiei de deschidere .....	157
8.3. Elaborarea cercetărilor experimentale pe oase reale porcine .....	164
Capitolul 9 .....	185
Concluzii generale. Contribuții proprii. Direcții viitoare. ....	185
9.1. Concluzii generale .....	185
9.2. Contribuții personale. ....	191
9.3. Direcții viitoare de cercetare. ....	193
Bibliografie.....	194



# Introducere. Importanța studiului.

Această teză de doctorat este materializarea cercetărilor teoretice și experimentale efectuate pe parcursul a trei ani, tema principală este una interdisciplinară, iar domeniul în care se încadrează este cel biomedical sau cel al ingineriei medicale.

Motivele datorită cărora am hotărât să abordăm o astfel de tematică se vor prezenta în continuare.

**Primul motiv** constă în faptul că acest domeniu al ingineriei medicale sau al bioingineriei impune abordări ingineresti de profunzime. Ansamblul corpului uman este de o complexitate foarte ridicată având rolul să îndeplinească funcții variate și elaborate și, din păcate, poate fi și afectat de diverse patologii. Pentru studiul și tratarea acestor patologii, este necesară reproducerea exactă a acestor funcții naturale, aspect foarte complicat de realizat.

Zona anatomică abordată este cea a piciorului uman, focalizându-ne în special pe deviațiile axiale ce pot apărea la nivelul acestuia. Studiarea acestor patologii ale piciorului necesită abordări ingineresti aprofundate, efectuate în baza metodelor din aria tehnică. Un exemplu concludent în acest sens este faptul că în cadrul strategiilor de tratament de la momentul actual, pentru a obține precizia impusă intervențiilor, este necesară utilizarea diverselor referințe geometrice și dimensionale, cu atât mai mult, când este vorba de optimizarea unui proces.

**Al doilea motiv** pentru care am ales să abordăm tematica biomedicală este datorat faptului că rezultatele cercetărilor elaborate ar putea avea un impact social favorabil.

Societatea din zilele noastre impune deseori anumite standarde în ceea ce privește garderoba și, deseori, de dragul incluziunii într-un anumit grup sau pur și simplu datorită faptului că dorim să fim în pas cu moda, suntem dispuși să facem anumite compromisuri, precum purtarea unui tip de încălțăminte incomodă sau strâmtă. Utilizarea acestui tip de încălțăminte sau a tocurilor înalte favorizează apariția deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus sau le pot agrava pe cele deja existente, motiv pentru care circa 25% dintre bărbați și 58% dintre femei (30% dintre acestea au sub 25 de ani) sunt afectați de această condiție patologică.

**Cel de-al treilea motiv** de abordare al acestei tematici îl constituie dezideratul de a crește precizia actului chirurgical. Astfel, studiul biomecanicii piciorului și al patologiilor aferente prin metode CAD-CAE, simularea virtuală a intervențiilor chirurgicale, stabilirea unor sisteme de referință, repere dimensionale și geometrice foarte bine definite fac ca planificarea geometrică a operației să fie mai clară și mai sigură.

Rezultatele tezei pot constitui un ghid în realizarea unor strategii bune de tratament, de planificare a operațiilor, în folosirea celor mai bune metode de conservare a pozițiilor corectate și, respectiv, stabilirea posibilităților de recuperare post-operatorie optime.

Modelările CAD ale ansamblului osteoarticular al piciorului s-au realizat ținând cont de structura osoasă reală și s-a urmărit o parametrizare completă a acestuia, pentru un bun control al mișcărilor fundamentale și asociate, simularea fazelor mersului și a celor intermediare, dar și pentru generarea facilă a condițiilor patologice aferente.

Metoda de corecție pe care am hotărât să o aprofundăm a fost osteotomia de deschidere a primului metatarsian, o metodă viabilă, relativ recent apărută și care prezintă rezultate mulțumitoare. Principalul aspect studiat a fost optimizarea acestui tip de intervenție din punct de vedere al poziționării osteotomiei, relativ la suprafețele osului, prin efectuarea atât a unor studii CAD-CAE, cât și a unor cercetări experimentale relevante.

Din punctul nostru de vedere, acest demers științific este unul important și de interes în domeniul optimizării intervențiilor chirurgicale efectuate la nivelul osteoarticular al piciorului. De asemenea, pornind de la acest studiu, se pot desprinde și alte direcții de cercetare, precum studiul biomecanicii piciorului în formă post-operatorie, proiectarea de dispozitive de ghidare specializate care să asigure poziția optimă a osteotomiilor sau alte variante de dispozitive de conservare a pozițiilor rezultate în urma angulării de corecție.

# Obiectivele tezei de doctorat



În baza caracterului interdisciplinar al lucrării, procesul de stabilire al nișei a fost foarte elaboros, deoarece există numeroase tematici, asupra cărora se pot elabora studii de interes, precum aprofundarea aspectelor legate de tehnologiile sau dispozitivele neinvazive de corecție a deviațiilor axiale ale piciorului – ortezele specializate, elaborarea protezelor personalizate executate prin fabricație aditivă, optimizarea dispunerilor osteotomiilor în funcție de comportările configurațiilor post-operatorii etc.

**Scopul principal** al acestei teze de doctorat îl constituie realizarea unor studii biomecanice aprofundate a structurilor osoase existente la nivelul piciorului în poziție ortostatică sau în mers și a deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus, cu posibilitățile chirurgicale de corecție a acestei patologii, dezvoltând în special osteotomia de deschidere a primului metatarsian.

În concluzie, **principalul obiectiv** al tezei constă în realizarea unor cercetări experimentale și CAD-CAE generalizate, care să vizeze studiul biomecanicii la nivelul piciorului în general și a deviației Hallux Valgus cu variantele chirurgicale de corecție în special.

Se are în vedere optimizarea intervenției de osteotomie de deschidere a primului metatarsian pentru realizarea unor planificări geometrice precise și corecte, în ideea unei stabilități a zonei operate și o recuperare post-operatorie eficientă, care să evite apariția fisurilor în timpul procesului de deschidere.

Totodată, în ton cu studiile și cercetările abordate la nivelul tematicii, prin această teză de doctorat ne propunem să atingem anumite aspecte de interes, în consecință, obiectivul principal este realizat prin materializarea următoarelor obiective:

1. Sintetizarea stadiului actual al cercetărilor legate de strategiile chirurgicale de corecție a deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus, al abordărilor asistate de calculator asupra problematicii și al studiilor experimentale din domeniu;
2. Modelarea 3D a anumitor oase din componența piciorului, respectiv a celor afectate de deviația Hallux Valgus (primul metatarsian și falanga proximală), ținând seama de structura reală a acestora, utilizând conceptul de entitate constructiv-anatomică;
3. Elaborarea ansamblului generalizat și parametrizat al structurii umane gleznă-picior, care să permită reproducerea celor șase mișcări fundamentale ale piciorului, utilizând metoda sistemelor Skeleton;
4. Elaborarea ansamblului parametrizat al piciorului pentru modelarea celor trei faze ale mersului, utilizând metoda sistemelor Skeleton;

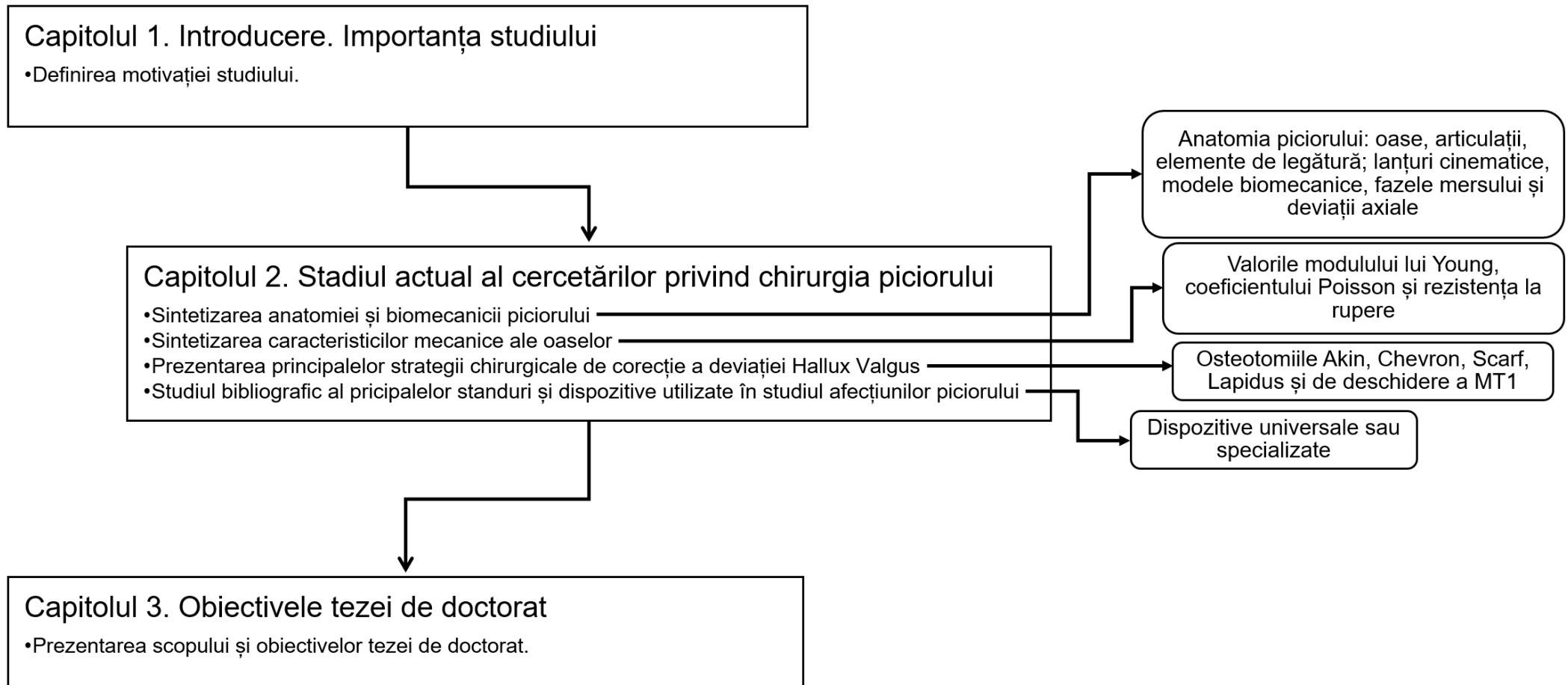


5. Elaborarea unui ansamblu parametrizat al falangei proximale a halucelui, falangei distale a halucelui, primele două metatarsiene și a cuneiformului medial, care să permită generarea CAD a celor trei forme ale afecțiunii Hallux Valgus: formă ușoară, moderată și severă;
6. Modelarea generalizată a celor cinci tipuri principale de proceduri chirurgicale aferente corecției afecțiunii Hallux Valgus: osteotomia de tip Akin, Chevron, Scarf, Lapidus și osteotomia de deschidere a primului metatarsian;
7. Simularea numerică a procesului de angulare de corecție, specifică osteotomiei de deschidere a primului metatarsian, utilizând diverse poziționări ale CORA pentru realizarea acestei intervenții;
8. Proiectarea și manufacturarea unui dispozitiv de prindere specializat pentru efectuarea cercetărilor experimentale, scrierea unui program CNC pentru simularea osteotomiilor și validarea metodologiei de lucru cu ajutorul replicilor osoase elaborate prin metode de fabricație aditivă;
9. Efectuarea de cercetări experimentale a deplasărilor și respectiv a deschiderilor maxime ale mai multor variante de dispunere a osteotomiei de deschidere a primului metatarsian și validarea experimentală a cercetărilor numerice.

Din punct de vedere al metodelor și tool-urilor utilizate se pot enumera următoarele:

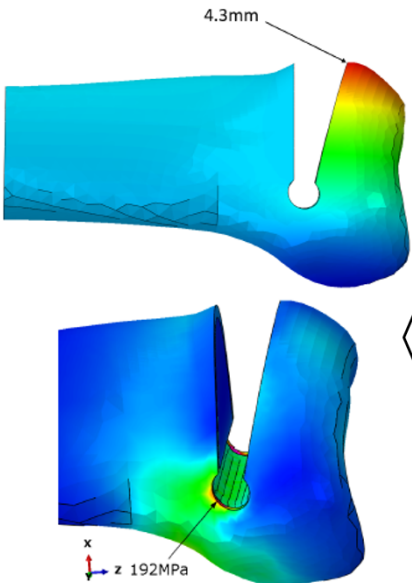
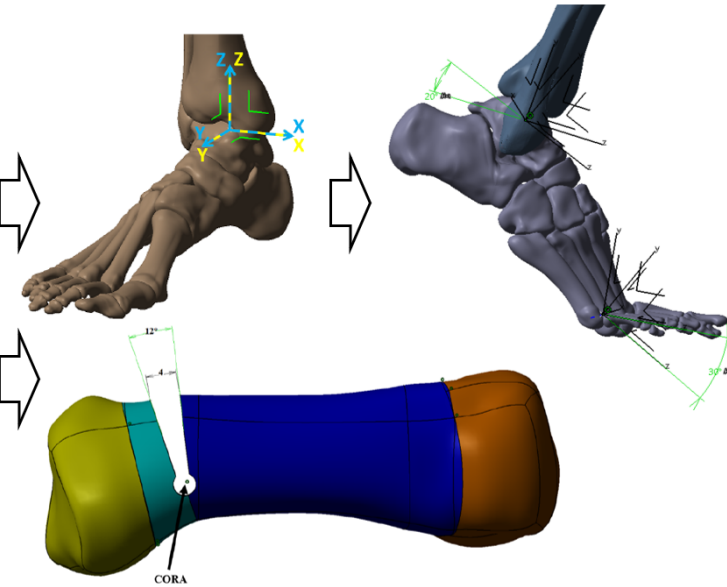
- Utilizarea software-ului CATIA V5 pentru elaborarea modelărilor structurilor reale și respectiv a ansamblurilor corespunzătoare metodei sistemelor Skeleton;
- Parametrizarea ansamblurilor prin efectuarea de legături a structurilor 3D cu foile de calcul corespunzătoare suitei Microsoft, mai exact a programului Excel;
- Utilizarea de asemenea a suitei Dassault Systemes pentru elaborarea simulărilor numerice, cu ajutorul programului ABAQUS 2020;
- Proiectarea algoritmilor de proiectare și modelare experimentală;
- Interpretarea datelor experimentale cu ajutorul software-ului STATISTICA 12.5 și Minitab 18.

# Algoritmul grafic al lucrării de doctorat



## Capitolul 4. Modelarea CAD a ansamblului osteoarticular al piciorului uman

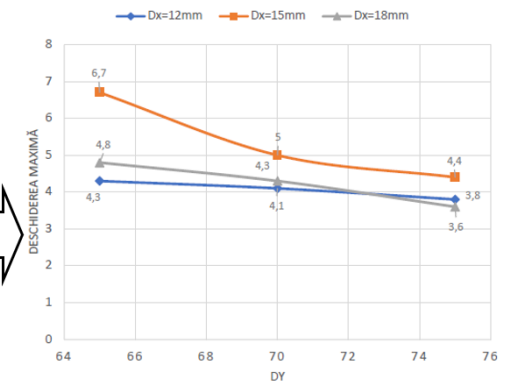
- Modelarea 3D a MT1 și falanga proximală în baza entităților geometrice;
- Modelarea 3D a MT1 și falanga proximală ținând seama de structura reală a acestora;
- Dezvoltarea unui ansamblu CAD generalizat al piciorului, complet parametrizat, care permite generarea fazelor principale și intermediare ale mersului, mișcărilor fundamentale și asociate ale piciorului și a situațiilor patologice;
- Realizarea simulărilor celor cinci tipuri principale de intervenții chirurgicale de corecție a deviației Hallux Valgus: Akin, Scarf, Chevron, Lapidus și osteotomia de deschidere a primului metatarsian.



## Capitolul 5. Simulări numerice privind osteotomiile de corecție ale deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus

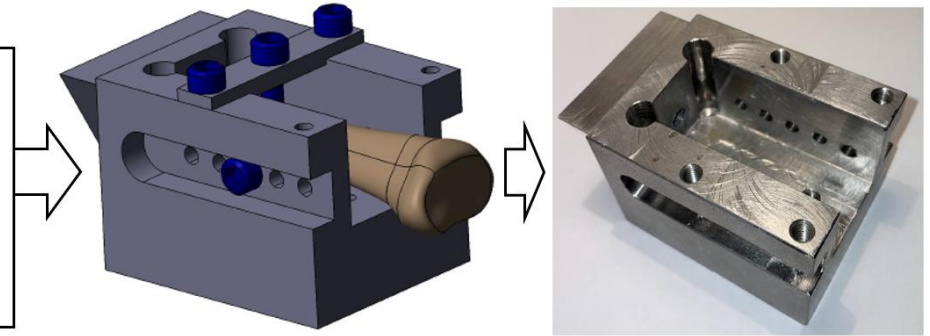
- Studiul comportamentului primului metatarsian în timpul angulării de corecție, etapă specifică osteotomiei de deschidere a primului metatarsian. În cadrul acestui studiu, s-a urmărit optimizarea poziției CORA, în vederea evitării apariției microfisurilor în timpul angulării, pentru 9 variante de poziționare;
- S-au parcurs etapele specifice unei analize statice prin FEM, funcțiile de răspuns urmărite fiind: deschiderea maximă, valorile tensiunilor echivalente Von Mises la 2, 4, 5 și 6mm deschidere și ale tensiunilor de forfecare la deschiderea maximă;
- S-au realizat reprezentări grafice 2D și 3D pentru deschiderea maximă, care este funcția de răspuns cea mai importantă din studiul FEM, fiind un indicator concret și palpabil pentru chirurghi pentru evitarea apariției microfisurilor în CORA. Se poate concluziona în acest sens că cele mai bune deschideri se obțin pentru Dx=15mm indiferent de valoarea lui Dy. Pentru Dx=12mm și Dx=18mm valorile sunt destul de apropiate între ele fiind grupate în jurul valorii de 4mm.

VARIAȚIA DESCHIDERII MAXIME - FEM



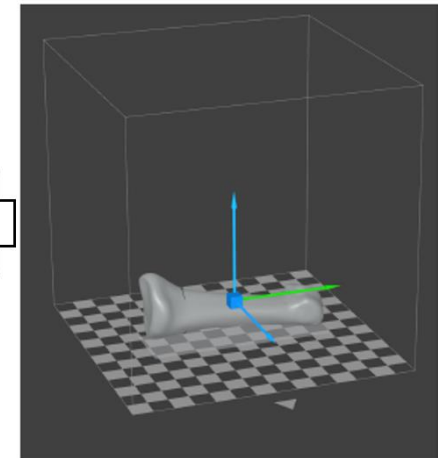
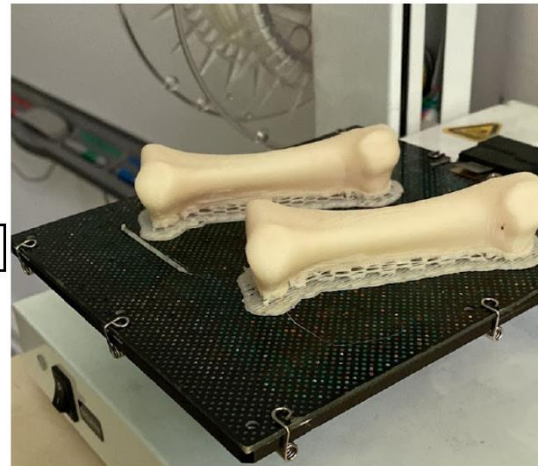
## Capitolul 6. Proiectarea și executarea unui dispozitiv specializat pentru realizarea cercetărilor experimentale

- S-au evidențiat cerințele pe care trebuie să le îndeplinească dispozitivul și obiectivele experimentale ce pot fi atinse cu ajutorul unui astfel de stand, de unde au rezultat principalele funcții pe care acesta trebuie să le asigure;
- S-au gândit și proiectat soluții constructive pentru fiecare funcție, rezultând un dispozitiv modular cu o bună flexibilitate și largi posibilități de utilizare.



## Capitolul 7. Utilizarea tehnologiilor aditive pentru studiul deviațiilor axiale de tip Hallux Valgus

- S-au elaborat prin Fabricație Aditivă replici osoase ale metatarsienelor umane și porcine, în două variante: din ABS prin metoda FDM și din rășină, prin metoda SLA.

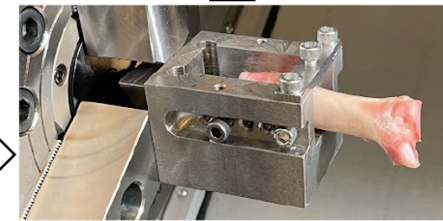
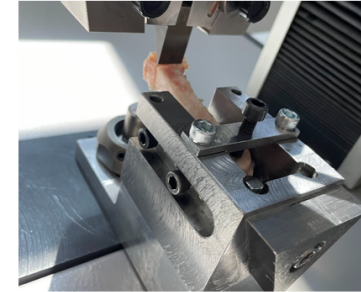




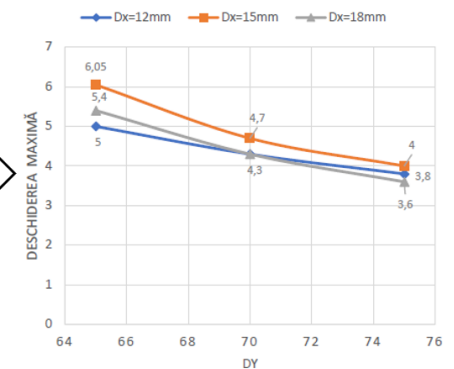
## Capitolul 8. Cercetări experimentale privind osteotomia de deschidere a primului metatarsian

- Cercetările experimentale s-au realizat în vederea validării rezultatelor obținute în baza analizei cu element finit;
- Echipamente tehnologice utilizate: strungul CNC Haas ST-15Y, pentru realizarea planului de osteotomie și a găurii din CORA și mașina de tracțiune-compresiune Galdabini Quasar 25 pentru realizarea angulării de corecție;
- S-a efectuat un experiment preliminar, pe oase printate, în care s-a realizat prelucrarea planului de osteotomie și a găurii în CORA pe utilajul menționat, conform poziției recomandate de literatura de specialitate;
- După validarea experimentului preliminar, s-au stabilit variabilele de intrare (independente)  $D_x$  și  $D_y$ , care caracterizează obiectul experimental cercetat, în concordanță cu planificarea geometrică a osteotomiei de deschidere a primului metatarsian;
- Pentru fiecare variabilă s-au stabilit câte trei niveluri de variație ( $D_x$  – 12, 15 și 18mm;  $D_y$  – 65, 70 și 75%). S-a proiectat un program experimental factorial complet, rezultând nouă încercări experimentale, care să realizeze combinația tuturor nivelurilor de variație ale variabilelor;
- S-au pregătit epruvete porcine reale corespunzătoare pentru câte două replici ale fiecărui punct experimental, fiind necesare 18 epruvete pentru tot atâtea experiențe;
- Cele 18 experiențe s-au realizat secvențial, obținându-se pentru fiecare dintre acestea diagramele forță-deplasare, forța maximă și deschiderea maximă a penei de osteotomie;
- Colectarea datelor, atât pentru forța maximă, cât și pentru deschiderea maximă s-a realizat tabelar pentru cele 18 experiențe planificate. Au rezultat pentru cele nouă încercări experimentale: valorile mediei, a abaterii standard, a coeficientului de variație și a dispersiei empirice pentru fiecare dintre cele două funcții de răspuns;
- Variația forței maxime în raport cu variabilele de intrare  $D_x$  și  $D_y$  a fost realizată și prin două reprezentări grafice (2D și 3D) sugestive realizate cu ajutorul programului STATISTICA12. Cu același program s-a determinat și o ecuație de regresie de gradul II a forței maxime în funcție de variabilele de intrare;
- S-au realizat reprezentări grafice (2D și 3D) ce surprind variația funcției de răspuns în raport cu variabilele de intrare  $D_x$  și  $D_y$  rezultând din acestea că cele mai bune deschideri se obțin în cazul poziționării planului de osteotomie la  $D_x=15\text{mm}$ , iar dintre acestea, cea mai mare, de 6,05 mm se realizează în combinația  $D_x=15\text{mm}$ ,  $D_y=65\%$ ;
- S-a realizat și o analiză în paralel a variațiilor deschiderilor maxime obținute prin FEM cu cele experimentale în aceleași condiții de încercare, din care a rezultat faptul că experimentul propus validează foarte bine analiza numerică realizată și astfel, unul dintre obiectivele experimentale a fost atins;
- Dată fiind importanța funcției de răspuns, s-a realizat și o modelare experimentală a fenomenului cercetat. S-au evaluat în cadrul modelului verificarea omogenității dispersiilor funcției obiectiv  $d_{max}$ , evaluare care confirmă omogenitatea funcției de răspuns pentru cele 9 încercări, s-a calculat dispersia de reproductibilitate și modelul regresional liniar;
- S-a verificat semnificația coeficienților ecuației de regresie, rezultând faptul că toți coeficienții ecuației de regresie sunt semnificativi cu specificarea faptului că  $D_y$  are o pondere mult mai importantă în cadrul ecuației de regresie decât coeficientul lui  $D_x$ . În ce privește adecvanța modelului, în urma calculelor specifice, a rezultat că modelul experimental este adecvat și reprezintă acoperitor fenomenul experimental studiat;
- Analiza ANOVA realizată pentru întreg modelul experimental și analiza reziduurilor a fost realizată cu ajutorul programului Minitab18 și a confirmat faptul că funcția obiectiv poate fi controlată cu ajutorul modelului experimental realizat, ceea ce conferă un foarte bun grad de generalitate și aplicabilitate pentru domeniul experimental investigat.

## Capitolul 9. Concluzii generale. Contribuții proprii. Direcții viitoare.



VARIAȚIA DESCHIDERII MAXIME - EXPERIMENTAL





# Concluzii generale. Contribuții proprii. Direcții viitoare.

Demersul științific realizat este motivat de necesitatea unor studii de factură inginerască de profunzime, care să aibă un efect direct asupra optimizării intervențiilor chirurgicale de corecție a afecțiunii menționate, de impactul social pe care rezultatele le-ar putea avea ținând cont de frecvența destul de mare de apariție a afecțiunii, dar și de ideea de interdisciplinaritate care a dovedit că rezultate obținute interdisciplinar sunt mult mai bune decât cele obținute prin abordarea separată a celor două domenii, medical și ingineresc.

Elaborarea unui ghid de planificare geometrică a operațiilor, adresat medicilor ortopezi, cu ajutorul căruia, spre exemplu, se poate face o alegere adecvată a dispunerii CORA are importante efecte în stabilitatea zonei operate și în recuperarea post-operatorie.

De asemenea, elaborarea modelelor CAD-CAE generalizate poate fi de mare folos viitoarelor cercetări în domeniu.

Având ca bază de plecare o documentare bibliografică amplă, putem afirma că teza se înscrie cu succes în cadrul studiilor și cercetărilor din domeniu, la nivel mondial.

## Contribuții personale.

Prin prezenta teză de doctorat, s-au adus numeroase contribuții originale în ceea ce privește modelarea biomecanicii piciorului și a optimizării intervențiilor chirurgicale de corecție a afecțiunilor de tip Hallux Valgus, cele mai notabile dintre acestea fiind evidențiate în cele ce urmează:

- Studiul anatomiei piciorului și transpunerea problematicii în zona inginerască;
- Sintetizarea caracteristicilor mecanice ale structurilor osoase umane (cortical-trabecular) și animale (bovine și porcine);
- Identificarea zonelor de cercetare biomecanică din zona piciorului și a deviațiilor axiale;
- Realizarea și utilizarea sistemelor de referință Gcs și Tcs pentru modelările CAD parametrizate, utilizând sisteme Skeleton;
- Transpunerea principalelor articulații de la nivelul piciorului în cuple mecanice de frecare clasice (plane, elipsoidale, cilindrice etc);
- Identificarea variantei optime de poziționare a originii sistemului de referință a gleznei (articulația talocrurală) și principalelor elemente geometrice (axe, unghiuri), față de care se vor modela mișcările piciorului și fazele mersului;
- Identificarea elementelor geometrice și dimensionale utile în modelarea 3D a mersului și inclusiv a elementelor unghiulare necesare pentru modelarea CAD a deviațiilor axiale;

- Identificarea elementelor geometrice, dimensionale și a sistemelor de referință ce vor permite modelarea 3D a celor cinci tipuri de operație pentru corecția afecțiunii Hallux Valgus;
- Identificarea elementelor constructive și funcționale ale dispozitivelor de studiu a afecțiunii Hallux Valgus;
- Realizarea modelelor 3D distincte pentru corp, cap și bază aferente falangei proximale și a primului metatarsian și asamblarea acestora, dar și a modelelor CAD distincte pentru osul cortical și spongios ale acestor oase, în concordanță cu metoda entităților constructiv-anatomice;
- Realizarea ansamblului parametrizat al piciorului pentru generarea patologiilor care pot apărea în poziție ortostatică și a mișcărilor fundamentale și asociate. Definierea sistemelor de referință, a originilor și a axelor necesare și încadrarea acestora în sisteme Skeleton;
- Ținând cont de cele trei niveluri de gravitate ale afecțiunii Hallux Valgus, s-au elaborat trei variante ale modelului pentru deviațiile axiale de tip Hallux Valgus, luând în considerare starea de congruență a primei articulații metatarsofalangiene (articulație congruentă, deviată sau subluxată);
- Modelarea 3D și simularea virtuală a celor cinci tipuri principale de intervenții chirurgicale pentru corecția deviației HV: Akin, Scarf, Chevron, Lapidus și osteotomia de deschidere a primului metatarsian, cu utilizarea modelelor CAD de deviații axiale realizate parametrizat anterior;
- Elaborarea studiilor CAE privind osteotomia de deschidere a primului metatarsian și optimizarea poziționării balamalei (CORA);
- Crearea unui script de generare automată a rezultatelor celor 9 simulări numerice care combină cele 3 niveluri de variație ale celor 2 variabile utilizate în analiză;
- De asemenea, s-au realizat graficele variațiilor 2D și 3D rezultate pentru parametrul deschiderii maxime ( $d$ );
- Proiectarea și manufacturarea unui dispozitiv specializat pentru cercetarea experimentală a osteotomiei de deschidere a primului metatarsian;
- Manufacturarea replicilor osoase prin metodele fabricației aditive, pentru elaborarea experimentului preliminar de validare a metodologiei experimentale de lucru;
- Proiectarea și executarea unui program de cercetări experimentale în vederea studierii comportamentului în timpul angulării de corecție a primului metatarsian, în diferite variante de dispunere a osteotomiei de deschidere a acestuia;
- Elaborarea unui program CNC pentru prelucrarea pe mașini-unelte cu CN a osteotomiilor intervenției chirurgicale de deschidere a MT1;
- S-a proiectat un program experimental factorial complet în care funcțiile de răspuns au fost forța maximă  $F_{max}$  și deschiderea maximă  $d_{max}$  a penei de osteotomie, iar factorii de influență  $D_x$  și  $D_y$ ;

- S-a determinat variația forței în raport cu deplasarea și implicit a deschiderii maxime a penei de osteotomie în raport cu factorii de influență  $D_x$  și  $D_y$ ;
- S-au determinat pentru cele 9 încercări ale programului experimental valorile funcțiilor de răspuns precizate;
- Rezultatele colectate au fost prezentate în cele trei forme uzuale: tabelar, grafic (2D și 3D) și sub formă de relații matematice;
- S-a realizat o prelucrare a datelor obținute cu stabilirea modelului regresional, verificarea omogenității dispersiei funcției de răspuns, calculul semnificației coeficienților ecuației de regresie și confirmarea adecvantei modelului;
- S-a realizat o analiză ANOVA pentru întreg modelul experimental, o analiză a reziduurilor și a coeficienților de corelație care evidențiază faptul că funcția obiectiv poate fi controlată cu modelul experimental realizat.

### **Direcții viitoare de cercetare.**

Pornind de la rezultatele obținute în cadrul acestei teze de doctorat, se pot extinde studii în următoarele direcții de cercetare:

- În concordanță cu modelul generalizat al piciorului, se pot elabora studii privind solicitările la compresiune ale oaselor metatarsiene sau ale falangelor în timpul mersului sau chiar un studiu al comportării structurilor post-operatorii în diverse faze ale mersului;
- Se pot realiza abordări similare cu cele din prezenta teză, utilizând modelele CAD ale deviațiilor Hallux Valgus și ale celorlalte patru tipuri de operații prezentate;
- Utilizarea modelelor CAD pentru realizarea unor orteze sau proteze personalizate care să rezolve în mod conservativ afecțiunea Hallux Valgus;
- Studiul sub microscop al angulării de corecție a primului metatarsian, pentru stabilirea cu exactitate a momentului critic de apariție a microfisurilor;
- Completarea studiului de față în ce privește optimizarea planificărilor geometrice ale osteotomiilor de deschidere a primului metatarsian prin alegerea unui alt set de parametri:  $D_x$  valori din 0.5 în 0.5mm și  $D_y$  din procent în procent, aplicate în jurul valorilor critice obținute în această teză, precum și identificarea unor alți factori de influență semnificativi;
- Studiul în vederea proiectării dispozitivelor neinvazive de corecție a HV personalizate, executate prin metode de fabricație aditivă;
- Proiectarea și dezvoltarea de noi dispozitive de conservare a poziției obținute în urma angulării de corecție aferente intervenției de deschidere a MT1;
- Abordarea problematicii și pentru caracteristici mecanice diferite ale oaselor afectate de îmbătrânire naturală sau alte cauze.



# Bibliografie

- [1] M. Nedeș și N. Nedeș, Anatomia și fiziologia omului, MERIDIANE PUBLISHING, 2016.
- [2] C. T. Niculescu, R. Carmaciu, B. Voiculescu, C. Salavastru, C. Nita și C. Ciornei, Anatomia și fiziologia omului - Compendiu, Editura Corint, 2014.
- [3] I. I. Cofaru, „Cercetări privind biomecanica deviațiilor axiale ale membrului inferior uman și dezvoltarea unor echipamente chirurgicale aferente,” Sibiu, 2013.
- [4] J. Herring, Tachdjian's pediatric orthopaedics, 4th edn, Elsevier, 2007.
- [5] A. G. Lupu, Studiu anatomoclinic al piciorului, din perspectiva antropologică, București, 2018.
- [6] V. Papilian, Anatomia Omului. Aparatul locomotor. Vol I (editia a XII-a), Editura ALL, 2008.
- [7] A. Naderi, „Medial cuneiform bone,” *Cuneiform. Orthopaedics One Review. In: Orthopaedics One - The Orthopaedic Knowledge Network*, 2010.
- [8] G. A. Piersol, Human Anatomy, Philadelphia: J. B. Lippincott Company, 1908.
- [9] A. Ahn și A. J. Grodzinsky, „Relevance of collagen piezoelectricity to “Wolff's Law”: A critical review,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 31, nr. 7, pp. 733-741, 2009.
- [10] J.-Y. Rho, L. Kuhn-Spearing și P. Zioupos, „Mechanical properties and the hierarchical structure of bone,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 20, nr. 2, pp. 92-102, 1998.
- [11] K. Tao, D. Wang, C. Wang, X. Wang, A. Liu, C. J. Nester și D. Howard, „An In Vivo Experimental Validation of a Computational Model of Human Foot,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 6, nr. 4, pp. 387-397, 2009.
- [12] D. Wu, P. Isaksson, S. J. Ferguson și C. Persson, „Young's modulus of trabecular bone at the tissue level: A review,” *Acta Biomaterialia*, vol. 78, pp. 1-12, 2018.
- [13] H. Andra, S. Battiato, G. Bilotta, G. M. Farinella, G. Impoco, J. Orlik, G. Russo și A. Zemitis, „Structural Simulation of a Bone-Prosthesis System of the Knee Joint,” *PMID: 27873848; PMCID: PMC3705538*, 2008.
- [14] M. F. A. Akhbar și A. R. Yusoff, „Comparison of bone temperature elevation in drilling of human, bovine and porcine bone,” *17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, vol. 82, pp. 411-414, 2019.
- [15] L. Feng, M. Chittenden, J. Schirer, M. Dickinson și I. Jasiuk, „Mechanical properties of porcine femoral cortical bone measured by nanoindentation,” *Journal of Biomechanics*, vol. 45, pp. 1775-1782, 2012.
- [16] C. A. Luo, S. Y. Hua, S. C. Lin, C. M. Chen și C. S. Tseng, „Stress and stability comparison between different systems for high tibial,” *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 14, 2013.
- [17] C. A. Luo, S. C. Lin, S. Y. Hwa, C. M. Chen și C. S. Tseng, „Biomechanical effects of plate area and locking screw on medial open,” *Comput. Methods Biomech. Biomed*, vol. 18, pp. 1263-1271, 2015.
- [18] C. E. Hoffer, K. E. Moore, K. Kozloff, P. K. Zysett și S. A. Goldstein, „Age, gender, and bone lamellae elastic moduli,” *J. Orthop. Res.*, vol. 18, pp. 432-437, 2000.

- [19] I. I. Cofaru, M. Oleksik, N. F. Cofaru, A. H. Branescu, A. Hasegan, M. D. Roman, S. R. Fkeaca și R. D. Dobrotra, „A Computer-Assisted Approach Regarding the Optimization of the Geometrical Planning of Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy,” *Applied Sciences - MDPI*, vol. 12, pp. 1-22, 2022.
- [20] A. Williams și C. Nester, *Pocket Podiatry: Footwear and Foot Orthoses*, CHAPTER 1 - Principles of foot biomechanics and gait, Salford: Churchill Livingstone, 2010.
- [21] A. Perrier, V. Luboz, M. Bucki, F. Cannard, N. Vuillerme, Y. Payan și J. Ohayon, „Chapter 25 - Biomechanical Modeling of the Foot,” în *Biomechanics of Living Organs*, Grenoble, France, Academic Press, 2017, pp. 545-563.
- [22] A.-A. Najefi, K. Malhotra și A. Goldberg, „Mechanical and anatomical axis of the lower limb in total ankle arthroplasty,” *The foot*, vol. 44, 2020.
- [23] R. A. Siston, A. C. Daub, N. Giori, S. Goodman și S. Delp, „Evaluation of Methods That Locate the Center of the Ankle for Computer-assisted Total Knee Arthroplasty,” *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 439, pp. 129-135, 2005.
- [24] E. T. Avramescu, *Bazele anatomice ale mișcării*, Târgu-Mureș, 2010.
- [25] L. Seres-Sturm, K. Brinzaniuc, C. Nicolescu și R. Sipos, *Anatomia membrelor*, Târgu-Mureș: Editura UNIVERSITY PRESS (UMF) , 2007.
- [26] S. Delacroix, *Évaluation des effets cinématiques et dynamiques induits par le port d'orthèses plantaires lors de la marche*, Lyon, 2015.
- [27] S. Angin și I. Demirbuken, „Ankle and foot complex,” *Comparative Kinesiology of the Human Body*, pp. 411-439, 2020.
- [28] C. W. Chan și A. Rudins, „Foot biomechanics during walking and running,” vol. 69, nr. 5, pp. 448-461, 1994.
- [29] M. W. Chapman, R. M. Szabo, R. Marder, K. G. Vince, R. A. Mann, J. M. Lane, R. F. McLain și G. Rab, *Chapman's Orthopaedic Surgery* 3rd edition, Lippincott Williams & Wilkins Publishers, 2001.
- [30] S. P. Pop, I. Gergely, O. M. Russu și C. O. Roman, *Elemente de ortopedie ed. II*, Târgu-Mureș: UNIVERSITY PRESS , 2013.
- [31] R. A. Donatelli, „Normal biomechanics of the foot and ankle,” *J Orthop Sports Phys Ther*, vol. 7, nr. 3, pp. 91-95, 1985.
- [32] A. Steindler, *Kinesiology: Of the Human Body Under Normal and Pathological Conditions*, Charles C Thomas Pub Ltd, 1977.
- [33] M. N. Mojica și J. S. Early, *Foot Biomechanics - Atlas of Orthoses and Assistive Devices*, Elsevier, 2019.
- [34] Y. Wang, D. W.-C. Wong și M. Zhang, „Computational Models of the Foot and Ankle for Pathomechanics and Clinical Applications: A Review,” *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 44, nr. 1, pp. 213-221, 2016.
- [35] D. W.-C. Wong, Y. Wang, M. Zhang și A. K.-L. Leung, „Functional restoration and risk of non-union of the first metatarsocuneiform arthrodesis for hallux valgus: A finite element approach,” *Journal of Biomechanics*, vol. 48, nr. 12, pp. 3142-3148, 2015.
- [36] S. Scott și D. A. Winter, „Biomechanical model of the human foot: Kinematics and kinetics during the stance phase of walking,” *Journal of Biomechanics*, vol. 26, nr. 9, pp. 1091-1104, 1993.

- [37] K. G. Gruben și W. L. Boehm, „Force direction pattern stabilizes sagittal plane mechanics of human walking,” *Human Movement Science*, vol. 31, nr. 3, pp. 649-659, 2012.
- [38] C. Radu, „DETERMINAREA FORȚELE DE REACTIUNE DIN ARTICULATIA GLEZNEI ÎN CONDIȚII DINAMICE,” *ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY*, pp. 386-391.
- [39] H. A. Jacob, „Forces acting in the forefoot during normal gait--an estimate,” *Clinical Biomechanics*, vol. 16, nr. 9, pp. 783-792, 2001.
- [40] A. Bryant, P. Tinley și K. Singer, „A Comparison of Radiographic Measurements in Normal, Hallux Valgus, and Hallux Limitus Feet,” *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, vol. 39, nr. 1, pp. 39-43, 2000.
- [41] S. Srivastava, N. Chockalingam și T. Fakhri, „Radiographic Angles in Hallux Valgus: Comparison between Manual and Computer-Assisted Measurements,” *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, vol. 49, pp. 523-528, 2010.
- [42] H. Xu, K. Jin, Z. Fu, M. Ma, Z. Liu, S. An și B. Jiang, „Radiological Characteristics and Anatomical Risk Factors in the Evaluation of Hallux Valgus in Chinese Adults,” *Chinese Medical Journal*, vol. 128, nr. 1, 2015.
- [43] R. Meary, „On the measurement of the angle between the talus and the first metatarsal,” *Rev Chir Orthop* 53:389, 1967.
- [44] J. M. Linklater, J. W. Read și C. L. Hayter, „Imaging of the Foot and Ankle,” *Techniques in Foot & Ankle Surgery*, vol. 7, nr. 3, 2008.
- [45] N. F. Cofaru și A. H. Brănescu, „A review on biomechanics of the hallux valgus pathology and its surgical treatments,” *COSME*, vol. 1009, 2020.
- [46] E. M. Escobedo, S. J. Pinnley, J. C. Hunter și B. J. Sangeorzan, *Evaluation of Adult Foot Alignment*, Sacramento, California, 2016.
- [47] J. Gui, X. Gu și M. Hou, „X- ray evaluation of the normal and hallux valgus feet and its clinical values,” *Chinese Journal of Orthopaedics*, vol. 12, 2001.
- [48] G. LaPorta, T. Melillo și D. Olinsky, „X-ray evaluation of hallux abducto valgus deformity,” *Journal of the American Podiatry Association*, vol. 64, nr. 8, pp. 544-566, 1974.
- [49] F. Condon, M. Kaliszer, D. Conhyea, T. O'Donell, A. Shaju și E. Materson, „The first intermetatarsal angle in hallux valgus: an analysis of measurement reliability and the error involved.,” *Foot Ankle Int*, vol. 23, pp. 717-721, 2002.
- [50] A. H. Brănescu, I. C. Lebădă, V. Mihuț, N. Marjanovic și M. Rackov, „CAD modelling of the human femur taking into account the structure of the bone,” *10th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2021 - MATEC Web Conf.*, 2021.
- [51] L. Voo, „Stress fracture risk analysis of the human femur based on computational biomechanics,” *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, vol. 25, nr. 3, 2004.
- [52] M. Peacock, D. L. Koller, D. Lai, S. Hui, T. Foroud și M. J. Econs, „Sex-specific quantitative trait loci contribute to normal variation in bone structure at the proximal femur in men,” *Bone*, vol. 37, pp. 467-473, 2005.

- [53] P. D. Brîndașu, I. I. Cofaru, N. F. Cofaru și L. Roman, „Computer Simulation Paradigm Regarding the Structure and Mechanical Characteristics of Human Long Bones,” *Advanced Materials Research*, vol. 814, pp. 99-103, 2013.
- [54] I. I. Cofaru și E. I. Huzu, „Generalized Modelling of the human lower limb assembly,” *The 1st International Conference for Doctoral Students*, 2013.
- [55] I. I. Cofaru, „Biomechanic of the opening tibial osteotomy,” *Fascicle of Management and Technological Engineering*, nr. 1, 2014.
- [56] A. C. Merchant, R. Fraiser, J. Dragoo și M. Fredericson, „A reliable Q angle measurement using a standardized protocol,” *The Knee*, vol. 27, nr. 3, pp. 934-939, 2020.
- [57] P. Berce, N. Bâlc, R. Păcurar, S. Brătean, C. Caizar, A. S. Radu și I. Fodorean, *Tehnologii de fabricatie prin adaugare de material si aplicatiile lor*, Cluj-Napoca: Editura Academiei Romane, 2014.
- [58] A. H. Brănescu, *Proiectarea, dezvoltarea și fabricarea reperului Skid Plate*, Sibiu, 2017.
- [59] R. E. Petrus, B. Johnson și I. Bondrea, „A low budget, reverse engineering solution for obtaining functional parts,” *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 13, nr. 2, pp. 78-83, 2015.
- [60] G. O. Karabicak, N. Bek și U. Tiftikci, „SHORT-TERM EFFECTS OF KINESIOTAPING ON PAIN AND JOINT ALIGNMENT IN CONSERVATIVE TREATMENT OF HALLUX VALGUS,” *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 38, nr. 8, pp. 564-571, 2015.
- [61] J. Ferrari, J. P. Higgins și T. D. Prior, „Interventions for treating hallux valgus (abductovalgus) and bunions,” *Cochrane Database Syst Rev*, 2004.
- [62] R. A. Mann și M. J. Coughlin, „Adult hallux valgus,” *Surgery of the foot and ankle (7th ed.)*, pp. 159-269, 1999.
- [63] S. T. Canale, F. M. Azar, J. H. Beaty și W. C. Campbell, *Campbell's operative orthopaedics*, Thirteenth edition, Philadelphia, PA : Elsevier, Inc., 2017.
- [64] L. Fraisser, C. Konrads, M. Hoberg, M. Rudert și M. Walcher, „Treatment of hallux valgus deformity,” *EFORT Open Rev*, pp. 295-302, 2016.
- [65] J. L. Beskin, „Akin's phalangeal osteotomy for bunion repair,” în *Current therapy in foot and ankle surgery*, St. Louis, Mosby, 1993.
- [66] K. H. Kristen, C. Berger și S. Stelzig, „The scarf osteotomy for the correction of hallux valgus deformities,” *Foot & Ankle International*, vol. 23, nr. 3, pp. 221-229, 2002.
- [67] S. Jones, H. A. Al Hussainy, F. Ali, R. P. Betts și M. J. Flowers, „Scarf osteotomy for hallux valgus: a prospective clinical and pedobarographic study,” *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, Vol. %1 din %286-b, nr. 6, 2004.
- [68] J. C. Coetzee și R. Pascal, „Surgical Strategies: Scarf Osteotomy for Hallux Valgus,” *FOOT & ANKLE INTERNATIONAL*, vol. 28, nr. 4, pp. 529-535, 2004.
- [69] S. S. Suresh, „Scarf osteotomy - Is it the procedure of choice in hallux valgus surgery? A preliminary report,” *Oman Med J.*, vol. 22, nr. 3, pp. 47-50, 2007.
- [70] A. H. Waly și M. G. Morsy, „Scarf osteotomy in severe hallux valgus deformity,” *The Egyptian Orthopaedic Journal*, vol. 54, pp. 15-20, 2019.

- [71] H. W. Park și S. J. Kim, „Treatment Results of Hallux Valgus Deformity by Parallel-Shaped Modified Scarf Osteotomy,” *J Korean Foot Ankle Soc.*, vol. 16, nr. 2, pp. 123-127, 2012.
- [72] M. Jager, M. Schmidt, A. Wild, B. Bittersohl, S. Courtois, T. G. Schmidt și K. Rudiger, „Z-osteotomy in hallux valgus: clinical and radiological outcome after scarf osteotomy.,” *Orthop Rev (Pavia)*, vol. 30, nr. 1, 2009.
- [73] S. E. Smith, K. B. Landorf, P. A. Butterworth și H. B. Menz, „Scarf versus Chevron Osteotomy for the Correction of 1–2 Intermetatarsal Angle in Hallux Valgus: A Systematic Review and Meta-analysis,” *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, vol. 51, pp. 437-444, 2012.
- [74] E. Swanton, L. Mason și A. Malloy, „How Do I Use the Scarf Osteotomy to Rotate the Metatarsal and Correct the Deformity in Three Dimensions?,” *Foot Ankle Clin N Am*, vol. 23, pp. 239-246, 2018.
- [75] S. P. Adam, S. C. Choung, Y. Gu și M. J. O`Malley, „Outcomes after Scarf Osteotomy for Treatment of Adult Hallux Valgus Deformity,” *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 469, nr. 3, pp. 854-859, 2011.
- [76] K. W. Young, H. S. Lee și S. C. Park, „Modified Proximal Scarf Osteotomy for Hallux Valgus,” *Clinics in orthopedic surgery*, vol. 10, nr. 4, pp. 479-483, 2018.
- [77] H. J. Trnka și P. Bock, „Scarf Osteotomy for Correction of Hallux Valgus,” în *Operative Techniques: Foot and Ankle Surgery (Second Edition)*, 2018, pp. 15-25.
- [78] B. J. Sangeorzan și S. T. Hansen, „Modified Lapidus Procedure for Hallux Valgus,” *Foot & Ankle*, vol. 9, nr. 6, 1989.
- [79] C. F. Hyer, G. Berlet, T. Lee și E. Orhner, *DARCO BOW Plate SURGICAL TECHNIQUE*, Wright Medical Technology Inc., 2017.
- [80] J. U. Wester, E. Hamborg-Petersen, N. Herold, P. B. Hansen și J. Froekjaer, „Open wedge metatarsal osteotomy versus crescentic osteotomy to correct severe hallux valgus deformity – A prospective comparative study,” *Foot and Ankle Surgery*, vol. 22, nr. 1, pp. 26-31, 2016.
- [81] W. D. Wai-Chi, *Biomechanics of Hallux Valgus and Evaluation of Interventions PhD thesis*, Hong-Kong, 2013.
- [82] H. J. Trnka, B. G. Parks, G. Ivanic, I. T. Chu, M. E. Easley, L. C. Schon și M. S. Myerson, „Six first metatarsal shaft osteotomies: mechanical and immobilization comparisons,” *Clinical orthopaedics and related research*, vol. 381, pp. 256-265, 2000.
- [83] J. I. Acevedo, V. J. Sanmarco, H. R. Boucher, B. G. Parks, L. C. Schon și M. S. Myerson, „Mechanical comparison of cyclic loading in five different first metatarsal shaft osteotomies.,” *Foot Ankle Int*, vol. 23, nr. 8, pp. 711-716, 2002.
- [84] E. D. Stamatis, D. O. Navid, B. G. Parks și M. S. Myerson, „Strength of fixation of Ludloff metatarsal osteotomy utilizing three different types of Kirschner wires: a biomechanical study,” *Foot and Ankle International*, vol. 24, nr. 10, pp. 805-811, 2003.
- [85] I. Popoff, J. P. Negrine, M. Zecovic, M. Svehla și W. R. Walsh, „The effect of screw type on the biomechanical properties of SCARF and crescentic osteotomies of the first metatarsal.,” *The Journal of foot and ankle surgery*, vol. 42, nr. 3, pp. 161-164, 2003.

- [86] K. Jacobson, A. Gough, S. S. Mendicino și M. S. Rockett, „Mechanical comparison of fixation techniques for the offset V osteotomy: a saw bone study.,” *The Journal of foot and ankle surgery*, vol. 42, nr. 6, pp. 339-343, 2003.
- [87] M. Bozkurt, C. Tigarar, M. Dalstra, N. C. Jensen și F. Linde, „Stability of a cannulated screw versus a Kirschner wire for the proximal crescentic osteotomy of the first metatarsal: a biomechanical study,” *J Foot Ankle Surg*, vol. 43, nr. 3, pp. 138-143, 2004.
- [88] H. G. Jung, G. P. Guyton, B. G. Parks, K. J. Dom, A. Nguyen și L. C. Schon, „Supplementary axial Kirschner wire fixation for crescentic and Ludloff proximal metatarsal osteotomies: a biomechanical study,” *Foot & ankle international*, vol. 26, nr. 8, pp. 620-626, 2005.
- [89] C. Jones, M. Coughlin, W. Petersen, M. Herbot și J. Paletta, „Mechanical comparison of two types of fixation for proximal first metatarsal crescentic osteotomy,” *Foot Ankle Int*, vol. 26, nr. 5, pp. 371-374, 2005.
- [90] P. Vienne, P. Favre, D. Meyer, R. Scoeniger, S. Wirth și N. Espinosa, „Comparative mechanical testing of different geometric designs of distal first metatarsal osteotomies,” *Foot and Ankle International*, vol. 28, nr. 2, pp. 232-236, 2007.
- [91] S. G. Hofstaetter, R. R. Glisson, C. J. Alitz, H. J. Trnka și M. E. Easley, „Biomechanical comparison of screws and plates for hallux valgus opening-wedge and Ludloff osteotomies,” *Clinical Biomechanics*, vol. 23, nr. 1, pp. 101-108, 2008.
- [92] A. M. Unal, O. Baran, B. Uzun și A. C. Turan, „Comparison of screw-fixation stabilities of first metatarsal shaft osteotomies: a biomechanical study,” *Acta Orthop Traumatol Turc*, vol. 44, nr. 1, pp. 70-75, 2010.
- [93] P. Favre, M. Farine, J. G. Snedeker, G. J. Maquieira și N. Espinosa, „Biomechanical consequences of first metatarsal osteotomy in treating hallux valgus,” *Clinical Biomechanics*, vol. 25, nr. 7, pp. 721-727, 2010.
- [94] S. P. Tsilikas, E. D. Stamatis, S. K. Kourkoulis, A. S. Mitousoudis, P. E. Chatzistergos și P. J. Papagelopoulos, „Mechanical Comparison of Two Types of Fixation for Ludloff Oblique First Metatarsal Osteotomy,” *The Journal of foot and ankle surgery*, vol. 50, nr. 6, pp. 699-702, 2011.
- [95] S. P. Gocke, F. J. Rottier, R. M. Havey, S. M. Renner, A. G. Patwardhan și G. Carandang, „Quantitative Analysis of the Long-and Short-arm Crescentic Shelf Bunionectomy Osteotomies in Fresh Cadaveric Matched Pair Specimens,” *The Journal of foot and ankle surgery*, vol. 50, nr. 2, pp. 158-164, 2011.
- [96] „<https://www.sawbones.com/foot-large-left-first-metatarsal-4th-generation-composite-3422.html>,” [Interactiv].
- [97] B. Yin, J. Guo, J. Wang, S. Li, Y. Liu și Y. Zhang, „Bone Material Properties of Human Phalanges Using Vickers Indentation,” *Orthopaedic Surgery*, vol. 11, nr. 3, pp. 487-492, 2019.
- [98] J. Bucha, „Utilization and advantages of skeleton modelling in Catia Environment,” în *Industrial research into the methods and procedures in generative design and knowledge engineering in car development*, BRATISLAVA, 2014.
- [99] I. I. Cofaru, „The CAD modelling of the human tibia affected by form deviations,” *Fascicle of Management and Technological Engineering*, nr. 1, 2014.

- [100] N. F. Cofaru, A. H. Brănescu, V. Marjanovic și M. Blagojevic, „Contributions regarding 3D modelling of biomechanics of the foot,” *MATEC Web of Conferences 343, 04009 - 10th International Conference on Manufacturing Science and Education*, 2021.
- [101] N. F. Cofaru și A. H. Brănescu, „CONTRIBUTIONS IN 3D GEOMETRIC MODELING OF THE HALLUX VALGUS AXIAL DEVIATION,” *ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING*, vol. 18, nr. 4, 2020.
- [102] C. d. C. Netto și M. Richter, „Use of Advanced Weightbearing Imaging in Evaluation of Hallux Valgus,” *Foot and Ankle Clinics*, vol. 25, nr. 1, pp. 31-45, 2020.
- [103] K.-J. Bathe, „Finite Element Method,” *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 2008.
- [104] „<https://www.haascnc.com/machines/lathes/st/models/y-axis/st-15y.html>,” [Interactiv].
- [105] „<https://www.galdabini.eu/datasheets/quasar-25>,” [Interactiv].
- [106] „[http://steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=8#1](http://steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=8#1),” [Interactiv].
- [107] R. E. Petruse, S. Pușcașu, A. Pascu și I. Bondrea, „Key factors towards a high-quality additive manufacturing process with ABS material,” *Materialstoday: proceedings, Part of special issue: 35th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, vol. 12, nr. 2, pp. 359-366, 2019.
- [108] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen și D. Hui, „Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [109] *ASTM F2792-12a*, ASTM International, 2015.
- [110] „<https://formlabs.com/eu/3d-printers/form-3/>,” [Interactiv].
- [111] E. F. Cicală, *Metode de prelucrare statica a datelor experimentale*, Timișoara: Editura Politehnica, 1999.