

Rezumatul tezei de doctorat:

CERCETĂRI PRIVIND SISTEME MECANICE APLICABILE ÎN MEDICINĂ

Autor: **ing. COPILUȘI Petre Cristian**,
Conducător științific: **Prof.univ.dr.ing DUMITRU Nicolae**

Ritmul progresului tehnologic a fost foarte lent pentru marea parte a istoriei omenirii – în trecut, o persoană ar fi putut trăi o viață întreagă fără să fie martoră nici unei schimbări semnificative. Dacă exista o direcție spre care să se îndrepte omenirea în acele timpuri, aceasta se află de fapt în afara timpului, pe tărâmul mitului sau al intervențiilor supranaturale.

În schimb, un observator al timpurilor noastre se așteaptă să fie martorul unor schimbări de natură tehnologică radicale, în doar zece ani, sau chiar mai puțin în anumite sectoare.

Unul dintre aceste sectoare îl constituie Ingineria Medicală sau Bioingineria, fiind un subdomeniu multidisciplinar, ce integrează activități profesionale ingineresti, cu o înțelegere a modului în care subiectul uman funcționează atunci când este sănătos, bolnav sau accidentat.

Înlocuirea articulațiilor, pacemakerul, imagistica medicală, sistemele de supraviețuire, și laserii medicali sunt doar câteva exemple de rezultate ale activității inginerilor medicali.

Subiectul acestei teze de doctorat, este foarte vast, fapt pentru care direcția de orientare a cercetării a fost îndreptată din punct de vedere medical mai mult spre un domeniu important al ortopediei particularizând aspectul de amputare al membrului inferior din componența sistemului locomotor uman, iar din punct de vedere mecanic, atenția a fost concentrată spre elaborarea și studiul unui sistem mecanic care să satisfacă echivalarea condițiilor ce trebuie îndeplinite de articulațiile membrului inferior neprotezat (articulația genunchiului, gleznei și piciorului), cu cele ale sistemului mecanic protetic elaborat.

Așadar, acest domeniu a constituit o imensă provocare în ceea ce privește realizarea practică.

Prin teza de doctorat cu titlul "*Cercetări privind sisteme mecanice aplicabile în medicină*" mi-am propus pentru studiu, analiză și îndeplinire următoarele obiective:

- studiul unor sisteme mecanice endo-protetice utilizate prin implantare la nivelul articulațiilor membrului inferior uman, cât și al unor sisteme mecanice exo-protetice utilizate în protezarea segmentelor acestui membru;
- realizarea unei analize experimentale a aparatului locomotor uman în vederea obținerii unor parametri cinematici caracteristici articulațiilor din structura acestuia;
- obținerea unui model cinematic echivalent al membrului inferior, pe baza studiului anatomico-funcțional al aparatului locomotor uman;
- realizarea unei analize dinamice inverse a modelului matematic echivalent al membrului inferior uman, în vederea obținerii forțelor de legătură pentru fiecare articulație din structura acestui model;
- realizarea și simularea virtuală în regim dinamic a unui model endo-protetic destinat protezării membrului inferior uman;
- obținerea unei baze de date caracterizată prin parametrii cinematici determinați în urma unei analize experimentale a unui subiect uman cu membrul inferior amputat;
- elaborarea și testarea, atât virtuală, cât și experimentală a unui nou sistem exo-protetic ce are în structura sa un mecanism cu camă;
- studiul unor sisteme mecanice din structura unor roboți medicali utilizați în cadrul intervențiilor chirurgicale cu caracter minim invaziv;

Modul de realizare a obiectivelor propuse este prezentat în cele 9 capitole prezentate în continuare.

În **Capitolul I** – „**Stadiul actual al cercetărilor privind unele sisteme mecanice aplicabile în medicină**” sunt prezentate câteva noțiuni introductive legate de interdependența factorilor esențiali ce concură la îmbunătățirea tehnicilor de diagnosticare, recuperare/reabilitare, etc. De la bun început este elaborată o scurtă descriere a prezentei teze de doctorat în care sunt stabilite principalele obiective ce trebuie atinse în vederea obținerii unor rezultate semnificative în domeniul interdisciplinar numit biomecanică.

În cadrul acestui capitol este realizată o prezentare generală a sistemelor mecanice utilizate în protezarea aparatului locomotor uman și anume sisteme mecanice endo-protetice, utilizate în cadrul protezării anumitor articulații din structura membrului inferior uman prin procedura chirurgicală denumită artroplastie, cât și sistemele mecanice exo-protetice utilizate în protezarea membrului inferior uman prin înlocuirea anumitor segmente din structura sa, respectiv amputarea membrului inferior uman. Capitolul este încheiat prin prezentarea unor unități robotice cu elemente flexibile utilizate în realizarea unor proceduri chirurgicale cu

caracter minim invaziv. Din acest studiu se pot desprinde noi premise în vederea îmbunătățirii atât a sistemelor mecanice endo-protetice cât și cele exo-protetice, punând accent mai mult pe tehnici de calcul și modelare moderne, dar și elaborarea unor noi direcții de cercetare în ceea ce privește unitățile robotice cu elemente flexibile, utilizabile în vederea realizării unor intervenții chirurgicale.

În **Capitolul II**, intitulat „*Determinarea experimentală a unor parametrii cinematici din structura aparatului locomotor uman*”, se propune realizarea unei analize experimentale a acestui aparat pentru trei tipuri de activități (figura 1): pășire, urcare/coborâre trepte scări, schimbarea poziției corpului uman (ridicare/așezare de pe scaun), în vederea determinării unor parametrii cinematici (deplasări, viteze, accelerații) caracteristici articulațiilor din structura membrului inferior uman. În vederea obținerii acestor legi de mișcare s-a utilizat un sistem de achiziție și analiză imagine - SIMI Motion, al cărui proces de obținere a acestor parametri prin captură video și analiză imagine este descris în figura 1.

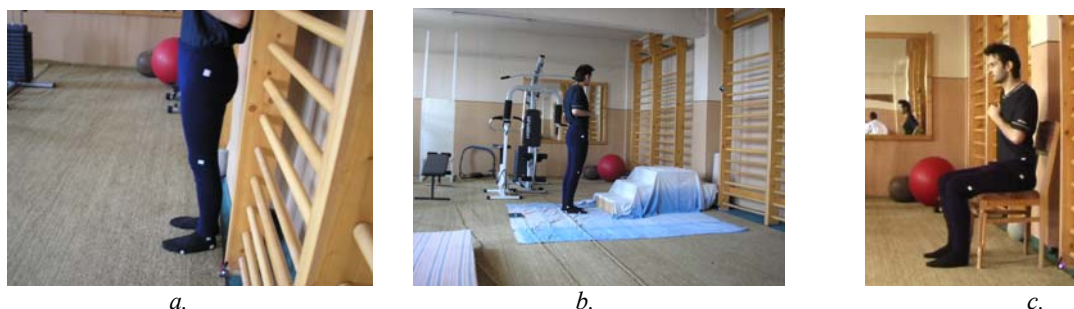


Figura 1. Aspecte privind desfășurarea analizei experimentale (a – activitatea de pășire; b – activitatea de urcare/coborâre trepte scări; c – schimbarea poziției corpului uman)

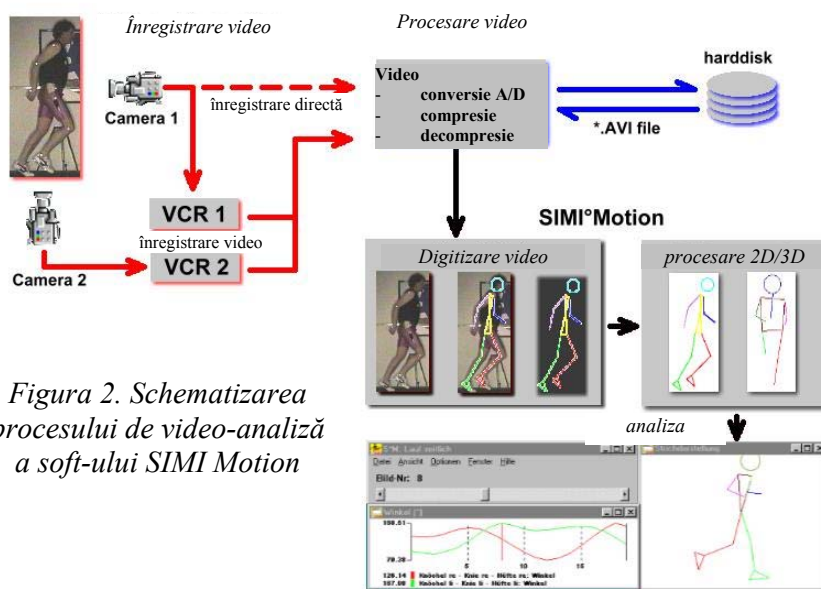


Figura 2. Schematizarea procesului de video-analiză a soft-ului SIMI Motion

De asemenea analiza experimentală constituie o bază de date suficient de solidă ce servește ca etalon în vederea comparării acesteia cu cele din contextul capitolelor următoare, cât și pentru realizarea unei analize dinamice inverse a membrului inferior uman. În figurile 3, 4 și 5 sunt prezentate, în mod exemplificat, diagramele legilor de variație a articulației gleznei pentru activitățile propuse pentru acest studiu din care se pot observa amplitudinile unghiulare dezvoltate la nivelul acestei articulații.

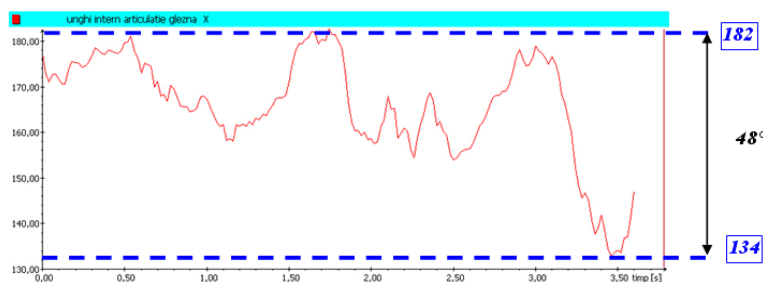


Figura 3. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației gleznei pentru activitatea de pășire [grade]

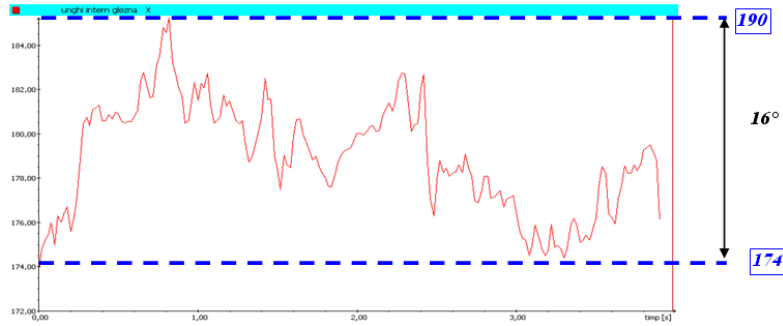


Figura 4. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației gleznei pentru urcare/coborâre trepte scară [grade]

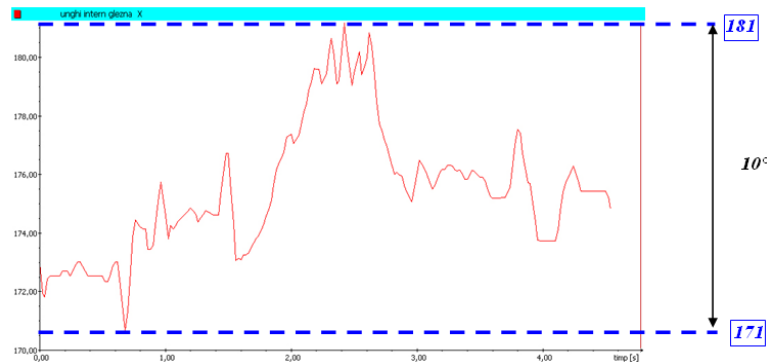


Figura 5. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației gleznei pentru schimbarea poziției corpului uman [grade].

Prin diagramele prezentate în figurile 3,4,5, ar trebui ca o exo – proteză să se încadreze în intervalele amplitudinilor unghiulare.

Pe baza datelor obținute pe cale experimentală, se urmărește elaborarea unor modele structurale ale biomecanismului membrului inferior uman corespunzător celor 3 tipuri de activități anterior menționate. Acesta reprezintă și principalul obiectiv al **Capitolului III** denumit „Aparatul locomotor uman. Analiză anatomico – funcțională”. În cadrul acestui capitol se urmărește să se identifice mișcările dezvoltate la nivelul fiecărei articulații a membrului inferior uman, a originii și a punctelor de inserție musculară. Astfel se dezvoltă două modele, cel de tip osteo-articular și osteo-arto-muscular ale membrului inferior uman, care sunt foarte greu de studiat din punct de vedere cinematic (figura 6).

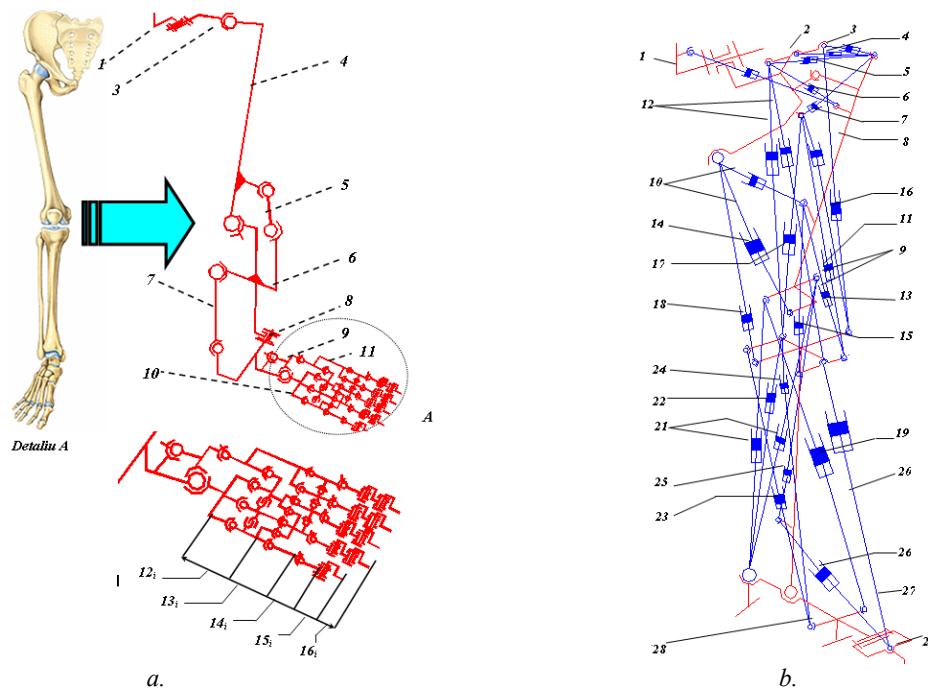


Figura 6. Prezentarea celor două modele structurale ale biomecanismului membrului inferior uman (a – modelul osteo-articular; b – modelul osteo-arto-muscular)

Aceste modele sunt simplificate ținând cont de criteriile impuse de cele 3 tipuri de activități studiate pe cale experimentală (Criteriul 1 – adaptarea modelului structural la tipul de locomoție urmărit; Criteriul 2 – reconsiderarea mișcării de rulare tars – sol, prin neglijarea caracterului elastic al contactului dintre elementele piciorului și sol). În urma simplificării acestor modele s-a redus numărul de elemente și numărul cuplelor cinematice. Considerându-se numai modelul de tip osteo-articular simplificat al membrului inferior uman, se urmărește realizarea unor analize cinematice și dinamice inverse al acestuia pentru activitatea de pășire. Modelele simplificate sunt prezentate în figura 7.

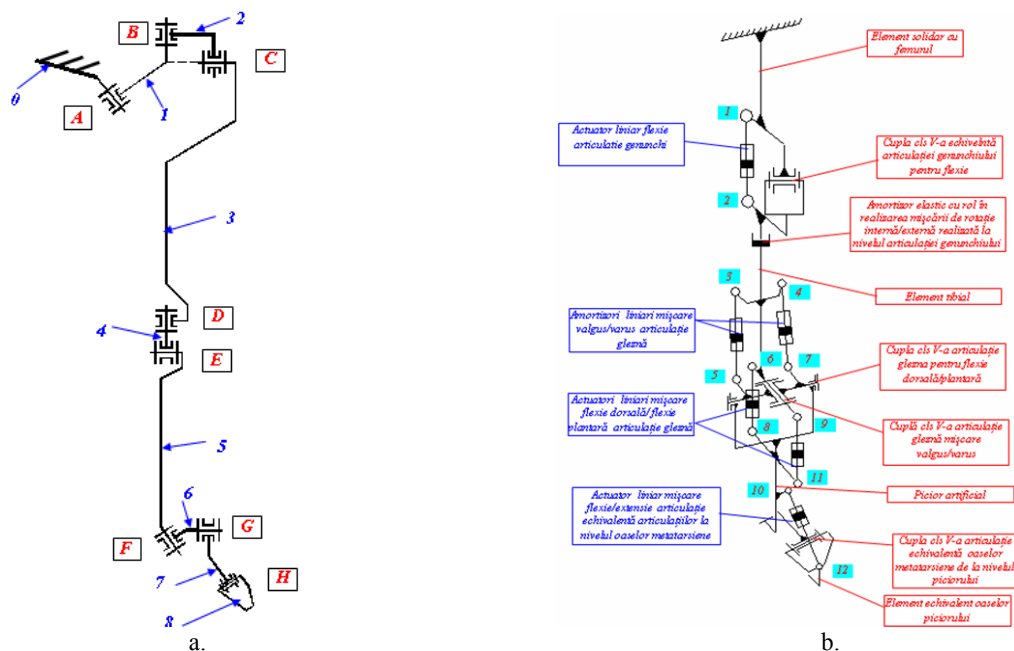


Figura 7. Modelele membrului inferior uman simplificate (a – modelul osteo-articular; b – modelul osteo-artro-muscular)

Modelul osteo-articular simplificat constituie suportul necesar realizării unei analize dinamice inverse ce va fi elaborată în capitolul următor pentru activitatea de pășire studiată în Capitolul 2.

Analiza cinematică și dinamică a membrului inferior uman constituie obiectivele **Capitolului IV**, intitulat „Analiza cinematică și dinamică a membrului inferior uman”, prin care se urmărește obținerea legilor de variație ale coordonatelor generalizate corespunzătoare cuplelor cinematice echivalente articulațiilor din structura acestui membru (figura 8).

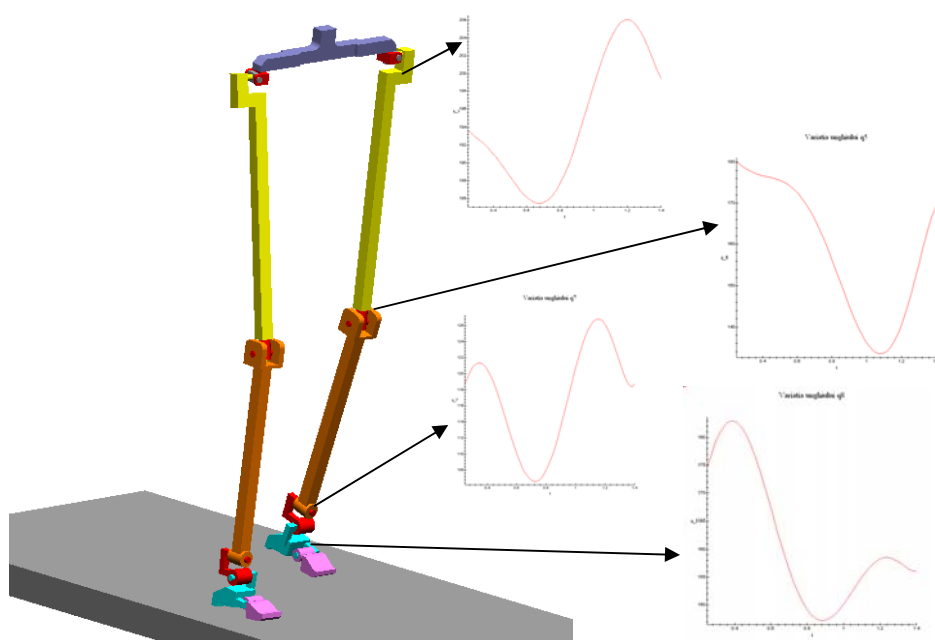


Figura 8. Modelul 3D, realizat prin procesare numerică a legilor de variație ale coordonatelor generalizate corespunzătoare cuplelor cinematice echivalente articulațiilor membrului inferior uman

Aceste legi sunt utile în vederea realizării analizei dinamice inverse a modelului matematic echivalent al membrului inferior uman. Analiza este întocmită pe baza formalismului Newton-Euler completat cu metoda multiplicatorilor lui Lagrange, aplicată pe modelul dezvoltat în acest scop, ținându-se cont și de contactul cu solul (figura 9).

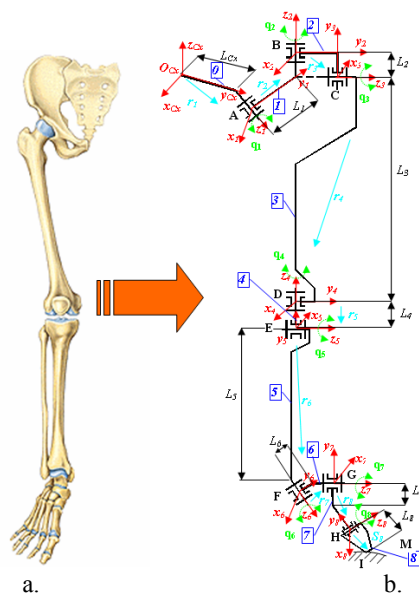


Figura 9. Modelul matematic pentru analiza dinamică inversă a membrului inferior uman: a – modelul anatomic; b – modelul membrului inferior echivalent

Scopul analizei dinamice inverse a membrului inferior uman este acela de a obține forțele de legătură dezvoltate pe cele 3 direcții la nivelul fiecărei articulații din structura acestuia.

Pentru analiza dinamică inversă s-au parcurs următoarele etape:

1. Se construiește modelul cinematic al mecanismului;
2. Se identifică ecuațiile de constrângere cinematică: $\Phi(q, t) = 0$;
3. Se determină Jacobianul corespunzător sistemului de ecuații care guvernează cinematica mecanismului;
4. Se construiește matricea maselor;
5. Se identifică vectorul forțelor generalizate: $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{36}]^T$;
6. Se definește vectorul coordonatelor generalizate și se construiește sistemul de ecuații care guvernează cinematica mecanismului;
7. Se identifică vectorul multiplicatorilor lui Lagrange: $\lambda = [J_q]^{-1} [Q_a - M \cdot \ddot{q}]$;
8. Se determină forțele de legătură din fiecare cuplă cinematică în regim dinamic.

Cu legile de variație a coordonatelor generalizate corespunzătoare articulațiilor din structura membrului inferior uman și cu forțele de legătură obținute la nivelul fiecărei articulații, se formează o bază de date necesară studiului cu elemente finite atât a sistemelor endo-protetice cât și a celor exo-protetice în vederea monitorizării comportamentului acestora în regim dinamic prin intermediul unor simulări virtuale. În figura 10, este prezentată legea de variație a forței de legătură pe direcția axei Z, pentru articulația gleznei, utilă pe parcursul desfășurării studiului în capitolele următoare

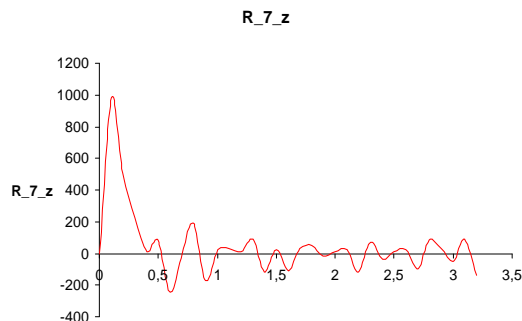


Figura 10. Variația componentei forței de legătură pe direcția z, pentru cupla G a modelului echivalent al membrului inferior uman (pentru un singur pas)

În **Capitolul V** denumit „*Modelarea parametrică a unor elemente osoase din structura aparatului locomotor*” se obține modelul virtual al membrului inferior uman, util în vederea implementării sistemelor endo-protetice și exo-protetice pentru realizarea unor simulări virtuale în regim dinamic a acestora. În figura 11 este prezentat modelul virtual al membrului inferior.



Figura 11. Aspect reconstructiv al membrului inferior virtual

Modelarea parametrică a elementelor osoase din structura membrului inferior uman se urmărește a fi realizată pe baza consultării a două metode de obținere a acestora, bazate pe secțiuni seriate (imagini CT), care sunt laborioase necesitând un timp de prelucrare relativ mare.

Pe baza modelului virtual al membrului inferior uman și ținând cont de rezultatele obținute în contextul capitolelor anterioare, se urmărește realizarea unui studiu virtual al comportamentului în regim dinamic a unui model endo-protetic destinat procedurii chirurgicale numită artroplastie aplicată în cazul articulației gleznei. Acest studiu constituie obiectivul **Capitolului VI** intitulat „*Analiza cu elemente finite în regim dinamic a unui model endo-protetic*”, prin care se obțin valorile tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor echivalente, după metoda von Mises, în urma simulării virtuale. În figura 12, este prezentat modelul endo-protetic virtual, dar și ansamblul virtual al gambei protezate.

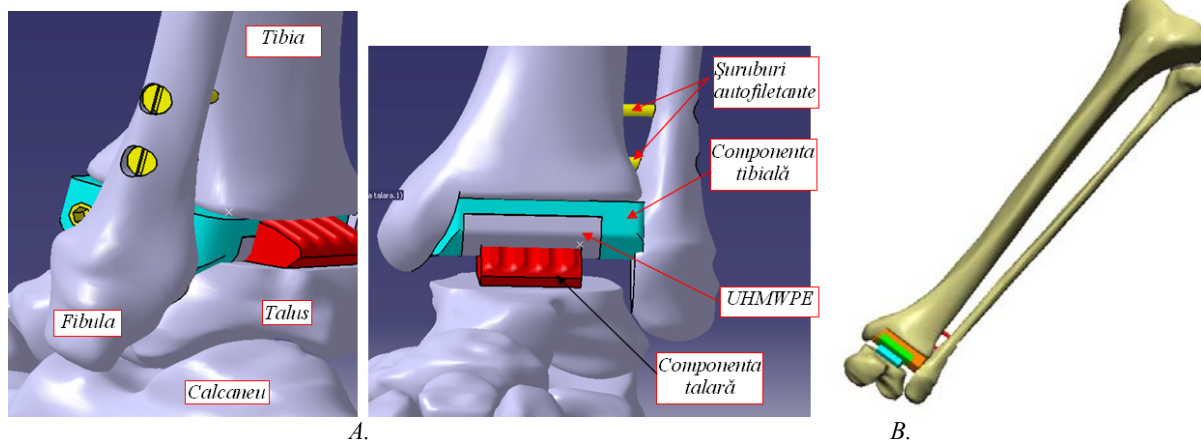


Figura 12. A - modelul endo-protetic virtual; B - ansamblul virtual al gambei protezate

Prin rezultatele obținute în urma analizei cu elemente finite în regim dinamic (figurile 13, 14 și 15), se poate observa ca tensiunile și deformațiile maxime după metoda von Mises, sunt pentru secvența în care timpul $t = 0,1$ secunde, corespunzătoare forței de legătură maxime $F_{\text{glezna}} = 985$ N și pt $t = 2,8$ secunde a unei valori a deplasării unghiulare de aproximativ 160° ;

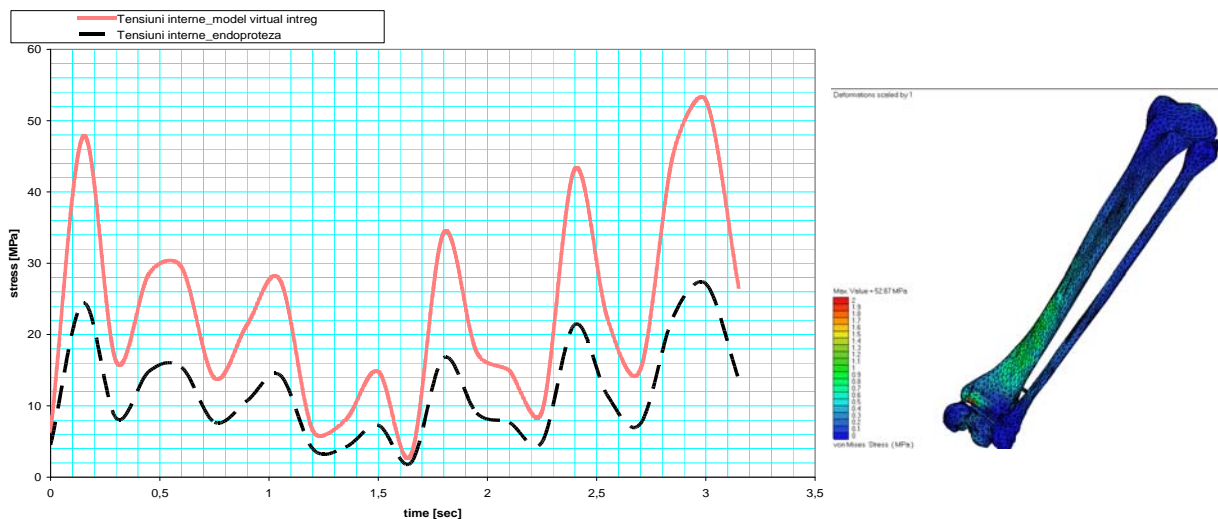


Figura 13. Variația tensiunilor interne echivalente în funcție de timp după algoritmului von Mises

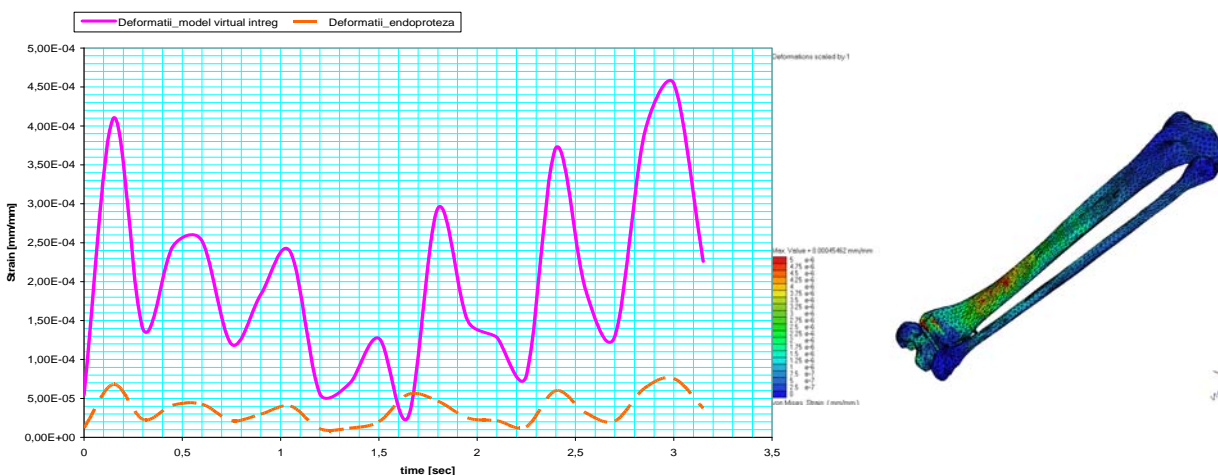


Figura 14. Deformațiile echivalente calculate pe baza algoritmului von Mises

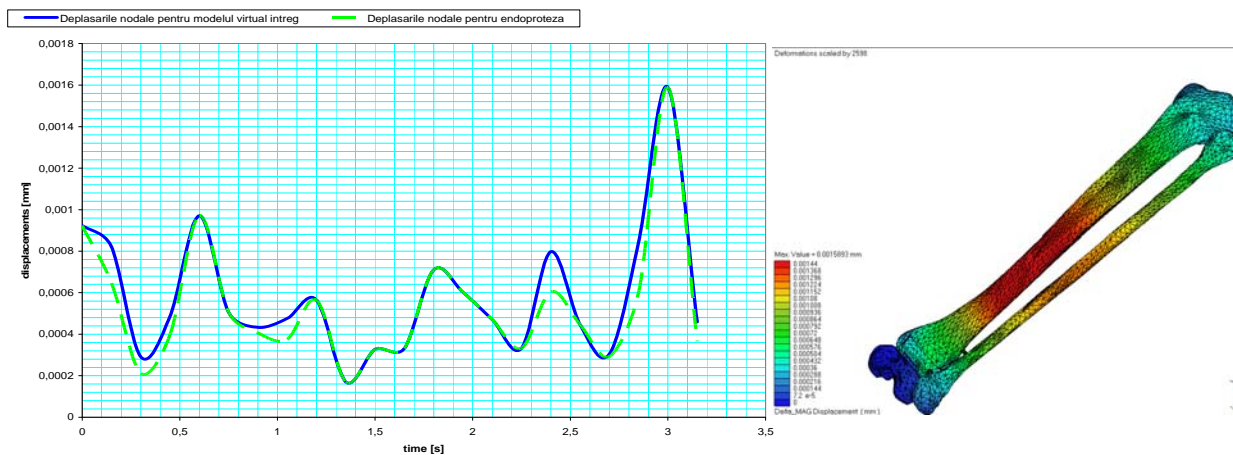


Figura 15. Variația deplasărilor în funcție de timp

Ținând cont de obiectivele prezentei lucrări și de stadiul la zi legat de sistemele mecanice ce se regăsesc în structura exo-protezelor, studiul va fi continuat prin realizarea unei analize experimentale evidențiate în **Capitolul VII** denumit „Determinarea experimentală a unor parametrii cinematici din structura aparatului locomotor uman pe un subiect cu dizabilități locomotorii”. Astfel se urmărește determinarea pe cale experimentală a unor parametrii cinematici (deplasări, viteze, accelerații), caracteristici cuplurilor cinematice ce se regăsesc în structura unui mecanism exo-protetic. Analiza experimentală va fi realizată pe un subiect uman cu

membrul inferior amputat de deasupra articulației genunchiului pentru trei tipuri de activități (pășire, urcare/coborâre trepte scări, schimbarea poziției corpului uman – figura 16).

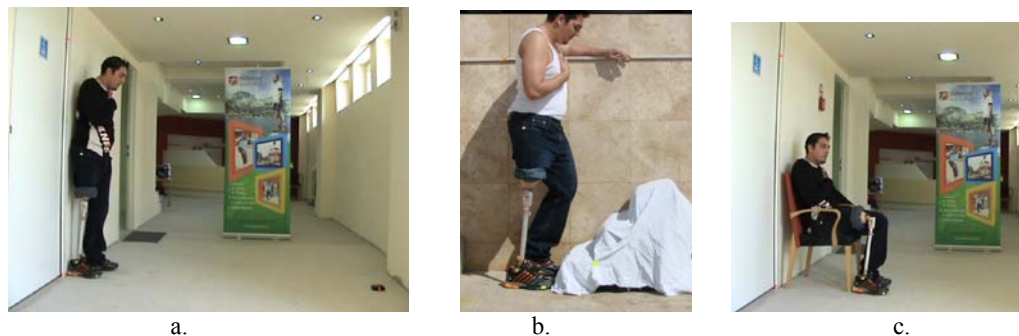


Figura 16 Aspecte privind desfășurarea analizei experimentale pe un subiect uman cu membrul inferior amputat (a-desfășurarea activității de pășire; b- desfășurarea activității de urcare/coborâre trepte scări; c- desfășurarea activității de schimbare a poziției corpului)

Așadar, această analiză experimentală este corelată cu cea desfășurată în Capitolul II al prezentei lucrări, prin care se urmărește să se identifice amplitudinile unghiulare dezvoltate la nivelul acestui sistem exo-protetic și să se compare cu cele rezultate în cazul unui subiect uman fără dizabilități locomotorii (figurile 17, 18 și 19).

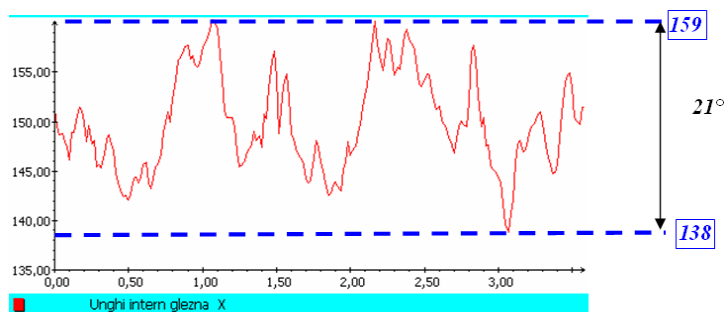


Figura 17. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației echivalente a gleznei pentru activitatea de pășire [grade]

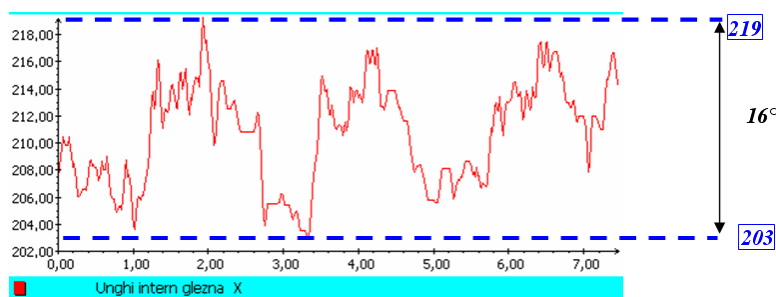


Figura 18. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației echivalente a gleznei pentru urcare/coborâre trepte scări [grade]

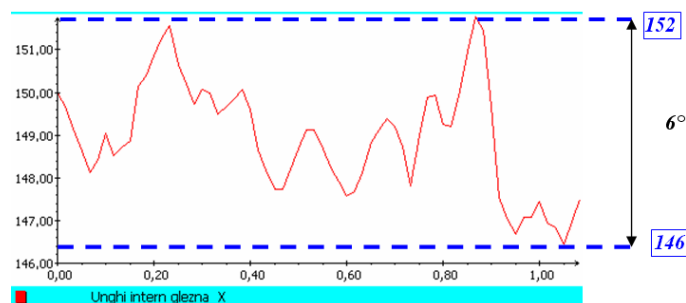


Figura 19. Amplitudinea unghiulară în cazul articulației echivalente a gleznei pentru schimbarea poziției corpului uman [grade]

În baza diagramelor prezentate mai sus, reiese că o exo – proteză de tipul Otto Bock 3R95 este deficitară în cazul urcării treptelor unei scări. Acest aspect se confirmă prin amplitudinile unghiulare relativ mici comparativ cu cele ale unui subiect uman neprotezat (Capitolul II), dezvoltate la nivelul mecanismului

înlocuitor al articulației genunchiului. În cazul articulației gleznei, talpa de tip C-Walk dezvoltă o amplitudine unghiulară relativ mică, chiar și în timpul activității de mers, valoarea acesteia fiind de 21° , ce reprezintă $\frac{1}{2}$ din valoarea reală dezvoltată în cazul unui subiect uman neamputat. De asemenea, pentru activitatea de urcare/coborâre trepte scară, amplitudinea unghiulară dezvoltată la nivelul gleznei este aceeași. Se remarcă o diferență a amplitudinii unghiulare la nivelul gleznei în cazul activității de schimbare a poziției corpului, diferența fiind foarte mică de 4° , datorându-se rigidității tălpii C-Walk (Capitolul II).

De altfel se va încerca îmbunătățirea acestor sisteme exo-protetice pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestei analize pe cei doi subiecți umani. Această îmbunătățire va fi realizată prin implementarea unui mecanism cu camă care să permită dezvoltarea unei amplitudini unghiulare la nivelul articulației gleznei cât mai apropiată de cea naturală realizată de un subiect uman fără dizabilități locomotorii.

Acesta reprezintă obiectivul principal al **Capitolului VIII** denumit „*Elaborarea unui nou sistem exo-protetic destinat dezarticulării gleznei din structura membrului inferior uman*” în care se va încerca pe cale analitică să se determine profilul camei și cursa tachelului în așa fel încât amplitudinea unghiulară dezvoltată la nivelul acestui mecanism cu camă să fie apropiată de cea naturală în cazul articulației gleznei, corelată cu o amortizare corespunzătoare în timpul flexiei plantare/dorsale. Noul sistem exo-protetic ce are în structura sa un mecanism cu camă va fi modelat și simulat în vederea asigurării unei funcționalități corespunzătoare articulației gleznei naturale, dar și condițiilor geometrice impuse de structura acestei articulații (figurile 20 și 21).

În baza simulărilor virtual, sistemul exo-protetic va fi testat experimental prin determinarea unor parametrii cinematici (deplasări, viteze, accelerații) ce servesc ca bază de date pentru compararea lor cu cei obținuți în Capitolul VII și Capitolul II (figurile 22 și 23). Compararea va fi realizată pentru a evidenția îmbunătățirea acestui sistem exo-protetic mai precis implementarea unor noi mecanisme în domeniul protezării membrului inferior uman și anume mecanismele cu camă.

Sistemul exo-protetic dezvoltă o amplitudine unghiulară apropiată de cea a unui subiect uman neprotezat, în timpul activității de mers, valoarea acesteia fiind de 42° . De asemenea, pentru activitatea de urcare/coborâre trepte scară, amplitudinea unghiulară dezvoltată la nivelul gleznei este aceeași. Se remarcă o diferență a amplitudinii unghiulare la nivelul gleznei în cazul activității de schimbare a poziției corpului, diferența fiind foarte mică de 4° , datorându-se rigidității tălpii C-Walk (Capitolul II).

Noul sistem exo-protetic înlocuitor al articulației gleznei, flexia/extensia în timpul activității de mers, se produce în intervalul de $147^\circ \rightarrow 189^\circ$, din care reiese o amplitudine unghiulară de 42° (figura 24). Această amplitudine unghiulară se apropie de valoarea celei dezvoltate de un subiect uman fără dizabilități locomotorii fapt pentru care se confirmă îmbunătățirea sistemelor exo-protetice destinate protezării membrului inferior uman pentru amputări realizate de deasupra genunchiului.

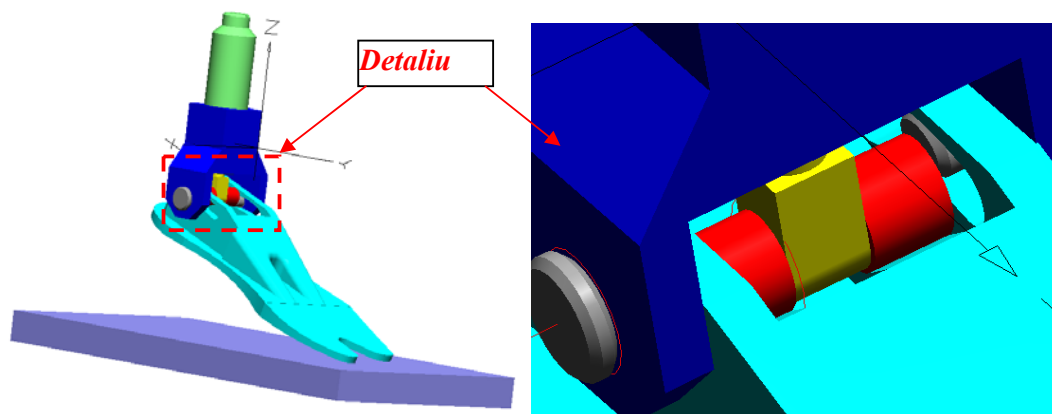


Figura 20. Modelul exo-protetic virtual propus spre realizare practică (vedere de ansamblu și detaliu asupra mecanismului cu camă)

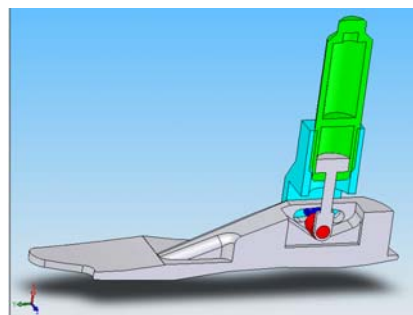


Figura 21. Modelul exo-protetic virtual propus spre realizare practică (vedere secționată pentru vizualizarea mecanismului cu camă)



Figura 22. Sistemul exo-protetic realizat în vederea testării experimentale



Figura 23. Ansamblul exo-protetic realizat în timpul testării experimentale

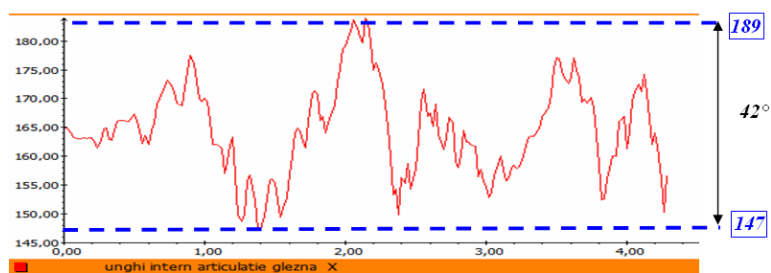


Figura 24. Amplitudinea unghiulară a sistemului exo-protetic înlocuitor al articulației gleznei pentru activitatea de pășire (etapa finală): unghiul-flexie dorsală, deplasări unghiulare în funcție de timp [grade]

Lucrarea va fi încheiată prin Capitolul IX intitulat „Considerații generale contribuții originale și noi direcții de cercetare” în care sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile originale aduse în cercetarea unor sisteme mecanice aplicabile în medicină, dar și noi direcții de cercetare ce pot fi dezvoltate ulterior pe baza prezentei lucrări.

Se constată în cadrul primului capitol, aducerea la cunoștință a unor date legate de unitățile robotice utilizate în cadrul unor intervenții chirurgicale. Pe baza acestui stadiu actual legat de aceste unități robotice a căror structură are la bază o coloană flexibilă formată din vertebre, a fost elaborat și un model experimental al unei unități robotice asemănătoare acestora. Aceasta are în structură trei module flexibile cu posibilitate de realizare a unei raze de curbură pe trei direcții simultan. În figura 25, este prezentat modelul virtual al unei asemenea unități poliarticulate.

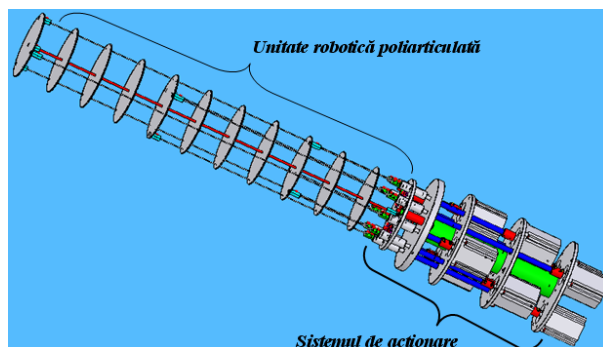


Figura 25. Modelul virtual al unității robotice poliarticulate

Pe parcursul elaborării tezei de doctorat s-a consultat un număr de peste **106** referințe bibliografice ce cuprind cărți, teze de doctorat, lucrări științifice, participări în cadrul desfășurării unor contracte de cercetare, ale căror tematici au la bază domeniul interdisciplinar al biomecanicii, pagini web, atlase și cataloage. **De asemenea teza de doctorat a fost elaborată pe baza unui contract de finanțare de către CNCSIS de tip TD nr.597/2007, cu titlul „Cercetări privind sisteme mecanice aplicabile în medicină”.**

S-au realizat 3 programe de calcul procesate cu ajutorul soft-ului MAPLE, 12 programe de analiză cinematică experimentală dezvoltată cu ajutorul soft-ului și echipamentului SIMI Motion, și numeroase simulări virtuale pe sisteme endo/exo-protetice realizate cu ajutorul soft-ului NASTRAN.