

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI**

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică
Departamentul Rezistența Materialelor

REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

Research on the design and development of a bionic prosthetic lower limb controlled with a neural headset

Autor: ing. Marius-Valentin DRĂGOI

Coordonatori științifici: Prof. dr. ing. Anton HADĂR,
Prof. dr. ing. Nicolae GOGA

București
2023

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

Cuvinte cheie: proteză membru inferior, printare 3D, interfața creier-computer, electroencefalografia, cerințe funcționale și non-funcționale ale protezelor de picior, încercare la tracțiune, încercare la compresiune, încercare la încovoiere, analize cu metoda elementelor finite, validarea numerică a modelului cu elemente finite, durere membru fantomă, tulburare de stres posttraumatic, terapia prin desensibilizare și reprocesare a mișcării oculare.

CUPRINS

INTRODUCERE	4
1 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR	6
1.1 Evoluția protezelor	6
1.1.1 Istoric al protezelor	6
1.1.2 Rol funcțional, avantaje și dezavantaje ale protezelor	6
1.2 Materiale utilizate în confecționarea protezelor	6
1.3 Tehnologii de fabricare a protezelor	7
1.3.1 Printarea 3D	7
1.3.2 Tehnologii de printare 3D	7
1.4 Necesitatea ajutorului specializat al persoanelor care utilizează o proteză	7
1.5 Metode de control al protezelor bionice	7
1.6 Utilizarea interfeței creier-computer în controlul protezei membrului inferior protetic bionic	8
1.7 Concluzii	8
2 OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI	9
2.1 OBIECTIVELE TEZEI	9
2.2 ORGANIZAREA TEZEI	9
3 DETERMINAREA CERINȚELOR UTILIZATORILOR PENTRU UN SISTEM INTELIGENT CU SCOPUL CONTROLĂRII PRIN INTERMEDIUL MINȚII A UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR	12
3.1 Utilizarea tehnologiei BCI bazată pe EEG	12
3.2 Despre chestionar și eșantionare	12
3.3 Analiza rezultatelor obținute	13
3.4 Cerințele sistemului	13
3.5 Concluzii	14
4 CARACTERIZAREA ELASTICĂ ȘI MECANICĂ A MATERIALULUI UTILIZAT LA REALIZAREA PICIORULUI BIONIC	15
4.1 Încercări experimentale	15
4.1.1 Echipamente utilizate	15
4.1.2 Încercarea epruvetelor la tracțiune	15
4.1.3 Încercarea epruvetelor la compresiune	16
4.1.4 Încercarea epruvetelor la încovoiere	16
4.1.5 Tehnica de corelare digitală a imaginilor	16

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

4.2	Concluzii	16
5	PROIECTAREA ȘI IMPLEMENTAREA UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR ȘI CONTROLAREA SA FOLOSIND SEMNALELE ELECTRICE PROVENITE DE LA CREIER 17	
5.1	Componentele sistemului	17
5.1.1	Proteza membru inferior	17
5.2	Implementarea sistemului	17
5.3	Testarea sistemului	17
5.1	Concluzii	17
6	ANALIZA COMPORTAMENTULUI MECANIC AL UNUI PICIOR BIONIC AFLAT ÎN REGIM DINAMIC	18
6.1	Sisteme care oferă o cinematică eficientă	18
6.2	Materiale și metode	18
6.2.1	Tehnologia realizării protezei picior	18
6.2.2	Cinematica	19
6.2.3	Simularea cu metoda elementelor finite	19
6.3	Concluzii	19
7	IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM EFICIENT EMDR PENTRU TRATAREA TRAUMELOR PERSOANELOR CARE UTILIZEAZĂ UN MEMBRU PROTETIC INFERIOR 20	
7.1	Terapia cu EMDR	20
7.2	Materiale și implementarea sistemului	20
7.3	Concluzii	20
8	CONCLUZII FINALE	21
8.1	Considerații generale	21
8.2	Concluzii finale	21
8.3	Contribuții și perspective	24
	BIBLIOGRAFIE	26

INTRODUCERE

ACTUALITATEA SUBIECTULUI TEZEI

Din cele mai vechi timpuri, oamenii au substituit un membru lipsă cu un obiect, care să-i ajute la treburile obișnuite și să prezinte un aspect apropiat de membrul natural. Primele scrieri în care este sugerată utilizarea unor proteze apar în mitologia aztecă, în secolul X î.e.n. [1]. Prima proteză membru inferior a fost descoperită în anii 1800, aceasta fiind fabricată din lemn, având o vechime de aproximativ 3000 de ani [2].

Evoluția tehnologiei a adus nenumărate beneficii omenirii. Obținerea unor materiale biocompatibile compozite, care să fie ușoare și rezistente, împreună cu proiectarea unor proteze mioelectrice ergonomice au ridicat enorm standardul pentru fabricarea unor proteze eficiente și estetice. De asemenea, evoluția dispozitivelor utilizate în chirurgie pentru fixarea unei proteze a ajuns la nivelul în care o procedură de allotransplant compozit vascularizat poate să-i redea pacientului o viață cât mai apropiată de normalitate. Avantajele și dezavantajele utilizării unor anumite proteze constau în cost și în disponibilitatea pacienților de a urma anumite proceduri chirurgicale complexe.

Biomaterialele reprezintă un tip de material natural sau sintetic, care poate fi folosit pentru înlocuirea unui organ al corpului uman. Spre exemplu, acidul polilactic (PLA) reprezintă un biomaterial care, în zilele noastre, este des folosit în fabricarea unei proteze membru inferior.

Modul de fabricare a unei proteze a ținut pasul cu evoluția tipurilor de material. Prima imprimantă 3D a fost realizată în 1984 de către Charles W. Hull [3]. În prezent, printarea 3D este utilizată în mod frecvent pentru fabricarea protezelor sau a unor componente ale acestora. Utilizarea unei imprimante 3D și a unui biomaterial pentru printarea componentelor unei proteze membru inferior are avantaje și dezavantaje. Este un plus faptul că materialul selectat pentru fabricarea componentelor și procesul de imprimare au un preț redus, însă acest procedeu vine și cu unele limitări legate de dimensiunea sau de aspectul pieselor.

Modul de control al unei proteze echipate electronic corespunzător poate fi:

- invaziv - prin implantarea unor senzori pe mușchii rămași în membrul rezidual sau amplasarea unor senzori pe neuroni;
- neinvaziv - prin atașarea unor senzori pe membrul rezidual pentru captarea activității mușchilor rămași sau prin atașarea unor senzori pe scalp pentru captarea activității neuronale care comandă mișcarea piciorului.

Controlarea unei proteze care să substituie un membru inferior utilizând activitatea neuronală reprezintă un proces nou în studiile de cercetare curente.

În literatura de specialitate există lucrări în care se utilizează semnalele electrice provenite de la creier (Electroencephalography - EEG) pentru controlarea unei proteze membru inferior integrale [4] sau parțiale [5], fiecare dintre sistemele propuse având anumite avantaje și dezavantaje.

Sistemul conceput și prezentat în această lucrare de doctorat acoperă golurile actualelor sisteme prezentate în publicațiile internaționale, prin faptul că, prin unicitatea sistemului creat operează mișcarea genunchiului și a gleznei protezei piciorului, având și avantajul de a fi accesibil din punct de vedere financiar.

În momentul de față, controlul unei proteze membru inferior prin intermediul activității cerebrale, fără a necesita o intervenție chirurgicală, a unei proteze construite de la zero (proiectare, fabricare, asamblare și echipare electronică a protezei), reprezintă un prim studiu realizat în România.

IMPORTANȚA SUBIECTULUI TEZEI

Persoanele care au suferit cel puțin o amputație de membru inferior necesită sprijin fizic și psihologic. Trauma suferită de către o persoană în urma unei amputații are, de cele mai multe ori, efect devastator asupra sănătății psihologice. Cele mai multe dintre persoanele care au suferit o astfel de traumă acuză dureri la nivelul membrului fantomă (Phantom Limb Pain - PLP), chiar și după o perioadă îndelungată de timp trecută de la pierderea suferită [6].

Pe lângă ajutor în tratarea traumei asociate, persoanele care au suferit o amputație au nevoie de ajutor fizic, mai ales pentru activitățile esențiale: schimbarea hainelor, igiena corporală zilnică, deplasare etc.

Aproximativ 0,5% din populația mondială utilizează sau necesită o proteză sau o orteză. Întrucât, ar trebui ca persoanele respective să poată continua să aibă o viață cât mai normală cu ajutorul protezelor pe care le utilizează, este necesară identificarea unor soluții cât mai bune privind proiectarea, fabricarea și utilizarea protezelor [7].

Datorită avantajelor generate de proprietățile superioare ale materialelor biocompatibile din zilele noastre, prin imprimarea 3D a componentelor unei proteze membru inferior, pot fi obținute componente rezistente, ușoare și flexibile.

Pentru evitarea unor intervenții chirurgicale complexe și costisitoare, o parte importantă dintre persoanele care au suferit amputații preferă să adopte o soluție neinvazivă referitoare la modul de controlare a protezei pe care o au în folosință. În urma unei amputații, mușchii rămași în membrul rezidual pot fi afectați în așa fel încât să nu mai poată oferi semnale care să poată fi utilizate ulterior în controlul protezei. În acest sens, se evidențiază utilizarea semnalelor electrice provenite de la creier pentru controlarea protezei membrului inferior. Captarea semnalelor cerebrale se poate efectua utilizând o cască neuronală dedicată, care să aibe senzorii necesari captării activității electrice a creierului uman.

Pentru controlarea unei proteze este necesară echiparea electronică adecvată a acesteia. Gândurile captate prin casca neuronală și convertite în comenzi specifice vor comanda mișcarea protezei membrului inferior.

Utilizarea căștii neuronale pentru setarea unor comenzi specifice, în vederea mișcării protezei, necesită o serie de sesiuni de antrenament. Întrucât, pierderea unui membru inferior provoacă traume, persoanele care au suferit amputații pot necesita tratament psihologic de specialitate în vederea reducerii traumei, pentru a putea antrena casca neuronală. Un tratament adecvat poate fi realizat utilizând o metodă de Desensibilizare și Reprocesare a Mișcării Oculare (EMDR). În lucrarea de față este descris un sistem de asistent virtual EMDR bazat pe actuator, care poate fi utilizat pentru tratamentul participanților cu amintiri traumatice, în cazul nostru, persoane cu traume cauzate de pierderea (parțială) a unui membru.

EMDR este o terapie psihologică creată pentru a trata suferința emoțională cauzată de un eveniment traumatic din trecut, cel mai frecvent în tratamentul tulburării de stres post-traumatic. În cazul de față, această procedură ajută persoanele care au suferit amputații să poată urma un tratament de sine stătător de reducere a traumei, prin utilizarea unei aplicații care nu necesită suportul fizic al unui medic specialist.

Actualitatea subiectului tezei constă și în utilizarea biomaterialelor pentru fabricarea, asamblarea și echiparea electronică a unei proteze membru inferior, în vederea controlării acesteia, folosind o cască neuronală dedicată.

Este primul studiu din România în care este proiectată și implementată o proteză membru inferior, controlată prin puterea gândurilor.

1 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

1.1 Evoluția protezelor

În acest subcapitol se prezintă anumite aspecte generale privind protezele utilizate în substituirea membrilor lipsă. În pas cu evoluția biomaterialelor sintetice utilizate în proiectarea și fabricarea protezelor, a evoluat și tehnologia prin care o proteză poate fi controlată de către aparținător. De la apariția fibrelor de carbon și a protezelor mioelectrice și până la implantul unui membru sintetic fabricat special pentru o anumită persoană a fost doar un pas.

Dispozitivele, precum căștile neuronale, pot fi utilizate în controlarea unui membru protetic bionic pentru evitarea unei intervenții chirurgicale. Interfața Creier - Calculator (Brain Computer Interface - BCI) poate fi utilizată pentru conectarea directă a sistemului nervos central cu proteza bionică, fără a fi necesară o conectare la nervii periferici ai pacientului. Costul redus și mentenanța ușoară a pachetului cască neuronală - proteză bionică reprezintă o alternativă de luat în calcul de către pacienții care au un buget modest.

1.1.1 Istoric al protezelor

De-a lungul istoriei, viața oamenilor a fost supusă unor grele încercări, din cauza schimbărilor climatice sau a confruntărilor sângeroase. Umanitatea a suferit cel mai mult din cauza războaielor, care nu s-au oprit nici în zilele noastre. Prima proteză este menționată în mitologia aztecă și aparține zeului răzbunării și al creației, Tezcatlipoca, acesta fiind ilustrat ca un bărbat în armură, având anumite membre ale corpului înlocuite cu diverse materiale [1].

1.1.2 Rol funcțional, avantaje și dezavantaje ale protezelor

În anii 80', îmbunătățirea materialelor, prin dezvoltarea tehnologiei, a permis proiectarea unor proteze mai ușoare și mai ergonomice, iar alimentarea acestora a evoluat de la utilizarea gazului comprimat, la utilizarea bateriilor reîncărcabile, realizate din nichel-cadmium.

Protezele mioelectrice au adus un confort ridicat, în comparație cu protezele cu acționare corporală, prin faptul că acestea nu aveau cabluri.

Cercetările realizate de către specialiștii în știința materialelor au dus la realizarea fibrelor de carbon, acestea fiind materiale biocompatibile, sintetice care au intrat în structura unor materiale compozite, foarte ușoare și foarte rezistente, care au contribuit la realizarea protezelor mioelectrice „high-tech” [8].

1.2 Materiale utilizate în confecționarea protezelor

În antichitate, protezele erau confecționate din lemn, fier sau piele, acestea fiind grele și deloc confortabile. Trecerea la utilizarea materialelor biocompatibile în fabricarea protezelor a fost îmbrățișată de către toate persoanele care necesită protezarea membrilor lipsă.

Biomaterialele reprezintă orice substanță sau orice combinație de substanțe, de origine naturală sau sintetică, în măsură să poată fi folosită pe o perioadă de timp bine determinată, ca un întreg sau ca o parte componentă a unui sistem care tratează sau înlocuiește un țesut, organ sau o

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

funcție a organismului uman. Un biomaterial este un material neviabil, utilizat ca un dispozitiv medical, astfel încât să interacționeze cu un sistem biologic [9].

Proteza membrului inferior, care reprezintă obiectul acestei teze de doctorat, va fi produsă cu o imprimantă 3D, folosind un design al acesteia într-o aplicație dedicată.

1.3 Tehnologii de fabricare a protezelor

1.3.1 Printarea 3D

Prototiparea rapidă a cunoscut o răspândire și o utilizare tot mai largă după anul 2000, odată cu dezvoltarea printării 3D prin metoda FDM (Fused Deposition Modeling). Primul studiu cu privire la tehnologia de printare 3D a fost publicat în anul 1981, de către Hideo Kodama, iar în 1984 Charles W. Hull a realizat prima imprimantă 3D, însă acest mod de printare a devenit tot mai popular odată cu reducerea prețului pentru procurarea sa și a apariției de noi tehnologii de printare 3D [10].

Totuși, pe lângă avantajele pe care le aduce printarea 3D, aceasta are și unele limitări, precum faptul că piesele produse prin această metodă sunt, în general, de dimensiune redusă, iar pentru obținerea unor rezultate vizuale cât mai bune privind aspectul acestora sunt necesare operațiuni suplimentare de prelucrare [11].

1.3.2 Tehnologii de printare 3D

Potrivit Standardului ASTM F2792 există șapte mari categorii de tehnologii de printare 3D [12]:

- pulverizarea de liant
- depunerea energiei direcționate
- extrudarea de material
- pulverizarea de material
- fuziunea straturilor de pulbere
- laminarea foilor
- fotopolimerizarea

1.4 Necesitatea ajutorului specializat al persoanelor care utilizează o proteză

Protezele realizate pentru substituirea membrilor lipsă sau pentru substituirea unor părți lipsă ale membrilor unei persoane au ținut pasul cu evoluția tehnologiei.

Pentru a fabrica în zilele noastre o proteză, se realizează proiectarea la cel mai mic detaliu a pieselor utilizate la asamblarea produsului final. Mai mult decât atât, protezele pot fi controlate folosind o cască neuronală dedicată, în cazul în care o persoană decide să nu apeleze la chirurgie pentru substituirea unui membru lipsă.

Alegerea tipului de proteză și a modului de control al protezei are propriile avantaje și dezavantaje.

1.5 Metode de control al protezelor bionice

O mare parte dintre metodele actuale de control al unei proteze sunt invazive (este necesară o intervenție chirurgicală). Aceste metode utilizează răspunsul mușchilor rămași în bont (mușchi proximali care pot fi reinervați) pentru controlarea protezei bionice prin convertirea răspunsului mușchilor în semnal de control adaptat pentru proteză. Astfel spus, comenzile neuronale sunt amplificate biologic de către mușchi, ele fiind apoi preluate de către senzor [13].

Tema aleasă pentru cercetare presupune utilizarea unei metode neinvazive pentru controlul unui membru inferior protetic bionic.

Electroencefalografia (EEG) este o metodă neinvazivă de înregistrare a unei electrograme a activității electrice generate de creierul uman. Semnalele electrofiziologice din creier sunt captate prin utilizarea unor electrozi amplasați pe scalp [14].

Metoda EEG stă la baza funcționalității tehnologiei „Interfața Creier-Calculator” (BCI), tehnologie care este utilizată pentru a controla un membru protetic bionic.

1.6 Utilizarea interfeței creier-computer în controlul protezei membrului inferior protetic bionic

Scopul inițial al dezvoltării tehnologiei „Interfața Creier-Calculator” (BCI) a fost acela de a studia utilitatea folosirii semnalelor cerebrale într-un dialog om-calculator. Totodată, acest scop a generat un instrument nou pentru studiul fenomenelor neurofiziologice care guvernează producerea și controlul evenimentelor neuroelectrice observabile [15]. Pentru a capta semnalele electrice generate de către creier sunt utilizați electrozi care pot fi amplasați direct pe creier sau pe scalp.

Metoda neinvazivă care face obiectul acestei lucrări de doctorat, este metoda în care electrozii sunt fixați pe scalp, însă semnalul captat are o intensitate mai mică în comparație cu semnalul captat prin metoda invazivă.

1.7 Concluzii

Pierderea membrelor sau a unor părți ale acestora produce un dezechilibru oamenilor, atât din punct de vedere funcțional, cât și psihic. Pentru a contracara efectele acestor pierderi, încă din cele mai vechi timpuri oamenii au încercat să înlocuiască membrele sau părțile lipsă, astfel încât să își poată continua meseria și viața cu o pierdere de funcționalitate cât mai mică.

De la dispozitive rudimentare confecționate din lemn, fier sau piele, a căror funcționalitate era minimă, ca urmare a progresului științific protezarea a cunoscut o dezvoltare și o îmbunătățire continuă, atât prin prisma funcționalității protezelor, cât și în ceea ce privește estetica acestora.

În zilele noastre, folosind tehnologia EEG, interfața BCI poate fi utilizată pentru a controla proteze bionice ale membrelor superioare sau inferioare.

Pentru captarea semnalelor electrice generate la nivelul creierului poate fi utilizat un echipament dedicat EMOTIV™ Insight, care convertește semnalul captat în comenzi, care pot fi transmise ulterior către proteza bionică substituentă a unui membru inferior.

2 OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI

2.1 OBIECTIVELE TEZEI

Obiectivul principal al tezei de doctorat îl reprezintă proiectarea și implementarea unei proteze bionice membru inferior și cercetarea modului de control al acesteia, folosind o cască neuronală dedicată. Prin folosirea tehnologiei BCI și având la bază metoda EEG pentru controlarea unei proteze membru inferior, pot fi utilizate gândurile captate de către senzorii încapsulați în casca neuronală. În acest mod, activitatea neuronală poate fi captată sub formă de semnale, care vor fi convertite ulterior în comenzi specifice. Pentru utilizarea cu succes a căștii neuronale se impune realizarea unor sesiuni de antrenament de către beneficiarul protezei.

Obiectivul secundar al tezei de doctorat îl reprezintă realizarea unei aplicații software, care să poată fi utilizată în mod independent de către persoanele care necesită reducerea traumelor suferite ca urmare a amputării unui membru inferior, pentru a putea antrena ulterior casca neuronală, în vederea controlării protezei unui picior.

Obiectivele specifice urmărite sunt următoarele:

- Studiul evoluției: materialelor utilizate în fabricarea protezelor membru inferior, a modurilor de fabricare a protezelor picior și a modurilor de control al acestor proteze de-a lungul timpului.
- Realizarea unui chestionar cantitativ pentru a determina principalele îmbunătățiri care pot fi aduse unei proteze membru inferior.
- Caracterizarea elastică și mecanică a materialului utilizat în confecționarea protezei membru inferior.
- Proiectarea și implementarea unei proteze picior având în vedere rezultatele obținute în urma chestionarului realizat anterior și implementarea sistemului de control al protezei prin intermediul unei căști neuronale.
- Evidențierea comportamentului dinamic al protezei membrului inferior bionic, echipat cu actuatori electrice, care să permită mișcarea de rotație a genunchiului și a gleznei protezei unui picior.
- Reducerea traumei suferite de către persoanele cărora li se poate aplica terapia cu EMDR, în ceea ce privește antrenarea căștii neuronale.

2.2 ORGANIZAREA TEZEI

Această teză de doctorat este organizată în opt capitole, realizate prin urmărirea obiectivelor specifice definite mai sus, cu scopul de atingere a obiectivului principal, în vederea demonstrării unui concept insuficient cercetat în România.

În această lucrare au fost utilizate 182 de referințe, majoritatea lor fiind parte a unei literaturi de specialitate de strictă actualitate.

CAPITOLUL 1 - STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR, conține un istoric al materialelor utilizate în fabricarea protezelor membru inferior, a metodelor de fabricare a protezelor și a metodelor de control ale acestora de-a lungul timpului. În acest capitol sunt analizate și comparate: tipurile de materiale biocompatibile compozite care pot fi utilizate la confecționarea

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

unei proteze picior, metodele de realizare a componentelor din configurația protezei și tipurile de control ale protezelor.

Dintre materialele compozite biocompatibile, pentru fabricarea protezei membru inferior a fost ales PLA-ul, în vederea printării 3D a acesteia.

Dintre metodele de control al unei proteze membru inferior, pentru a evita o intervenție chirurgicală și pentru a nu depinde de nivelul de funcționare a mușchilor rămași în membrul rezidual, a fost aleasă tehnologia BCI, bazată pe metoda EEG.

CAPITOLUL 2 - OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI, conține o descriere a obiectivelor urmărite. În acest capitol sunt prezentate, în mod succint, cercetările realizate pentru implementarea unui sistem în care o proteză membru inferior este controlată cu ajutorul unor semnale electrice cerebrale emise de către utilizatorul protezei.

CAPITOLUL 3 - DETERMINAREA CERINȚELOR UTILIZATORILOR PENTRU UN SISTEM INTELIGENT CU SCOPUL CONTROLĂRII PRIN INTERMEDIUL MINTII A UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR, reprezintă un studiu realizat pentru a afla cerințele funcționale și cele non-funcționale ale sistemului propus spre implementare.

La acest studiu au participat atât persoane care au suferit amputații, cât și persoane care nu au prezentat probleme medicale. Rezultatele obținute în urma studiului realizat au fost utilizate pentru a fabrica o proteză membru inferior ușoară, care să nu necesite o mentenanță costisitoare și care să fie ușor de gestionat.

CAPITOLUL 4 - CARACTERIZAREA ELASTICĂ ȘI MECANICĂ A MATERIALULUI UTILIZAT LA REALIZAREA PICIORULUI BIONIC, descrie realizarea epruvetelor, testarea acestora la tracțiune, compresiune și încovoiere în trei puncte.

Pentru a putea caracteriza materialul din punct de vedere elastic și mecanic s-a folosit o tehnică de actualitate - DIC (Digital Image Correlation), care presupune captarea de imagini pe parcursul testului și evaluarea deformațiilor rezultate. Pe baza acestor date se poate obține o serie de rezultate, evidențiate în acest capitol.

Practic, testele efectuate au contribuit la determinarea proprietăților elastice și mecanice ale materialului printat 3D - PLA.

CAPITOLUL 5 - PROIECTAREA ȘI IMPLEMENTAREA UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR ȘI CONTROLAREA SA FOLOSIND SEMNALELE ELECTRICE PROVENITE DE LA CREIER, descrie proiectarea, fabricarea și echiparea hardware a unei proteze membru inferior. Echiparea protezei a fost realizată prin utilizarea unor componente care să permită controlul de la distanță al acesteia, folosind o cască neuronală dedicată.

Au fost realizate mai multe teste, pe un participant sănătos clinic, prin antrenarea căștii neuronale în vederea folosirii acesteia pentru a mișca proteza picior, durata unei sesiuni de antrenament fiind de aproximativ 20-30 minute. În urma relizării profilului utilizatorului căștii neuronale, acesta a controlat cu succes proteza membru inferior folosind semnalele electrice cerebrale.

Scopul general al lucrării de față a fost acela de a studia posibilitatea de control al unei proteze picior prin utilizarea gândurilor, motiv pentru care proteza proiectată nu a fost printată 3D la scala unui adult.

CAPITOLUL 6 - ANALIZA COMPORTAMENTULUI MECANIC AL UNUI PICIOR BIONIC AFLAT ÎN REGIM DINAMIC, descrie utilizarea metodelor de analiză cinematică și dinamică adecvate piciorului bionic implementat și prezintă simularea comportamentului mecanic în regim dinamic al acestuia, realizată prin intermediul metodei elementelor finite.

Urmare a modului de printare 3D a componentelor protezei membru inferior, în ceea ce privește gradul de umplere a acestora, rezultatele mecanice obținute indică un comportament diferit al materialului, în funcție de solicitările la care este supusă o asemenea proteză.

Pentru modelul experimental realizat au fost determinate solicitările dinamice apărute în timpul mișcării piciorului, calculul numeric cu elemente finite evidențiind apariția unor tensiuni mecanice inferioare rezistenței admisibile a materialului protezei.

CAPITOLUL 7 - IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM EFICIENT EMDR PENTRU TRATAREA TRAUMELOR PERSOANELOR CARE UTILIZEAZĂ UN MEMBRU PROTETIC INFERIOR, conține descrierea implementării unei aplicații software, având ca scop reducerea traumei persoanelor care au suferit o amputație. Această aplicație implementează terapia cu EMDR, care poate fi autoadministrată de către un participant, fără supravegherea unui specialist în psihologie. Antrenarea căștii neuronale impune un psihic stabil al utilizatorilor, de unde apare și necesitatea utilizării terapiei EMDR, pentru reducerea traumei suferite.

Testarea aplicației a fost realizată prin colaborarea cu un ONG (Organizație Non Guvernamentală), unde participanții au fost instruiți și supravegheați de către personal clinic specializat. Rezultatele obținute în urma autoadministrării terapiei cu EMDR au fost de un real succes, trauma pacienților reducându-se în urma procesului EMDR susținut.

De asemenea, toate rezultatele au fost interpretate de către psihologi, care au confirmat reducerea traumei, ulterior fiind publicat un articol științific în care au fost detaliate procedurile urmate în implementarea și în testarea aplicației responsabile de autoadministrarea terapiei cu EMDR.

CAPITOLUL 8 - CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE, este capitolul în care sunt prezentate concluziile principale obținute pe parcursul implementării sistemului descris în această teză de doctorat. Tot aici, sunt menționate atât contribuțiile originale ale autorului lucrării, cât și noile direcții de extindere a cercetărilor științifice, axate pe tematica abordată în această teză de doctorat.

3 DETERMINAREA CERINȚELOR UTILIZATORILOR PENTRU UN SISTEM INTELIGENT CU SCOPUL CONTROLĂRII PRIN INTERMEDIUL MINȚII A UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR

3.1 Utilizarea tehnologiei BCI bazată pe EEG

În acest capitol este prezentat un chestionar cantitativ pentru a determina cerințele funcționale și non-funcționale ale utilizatorilor, precum și pentru a afla modul în care aceștia doresc să interacționeze cu sistemul de membre inferioare protetice. Răspunsurile participanților vor fi considerate ca bază pentru proiectarea sistemului.

Scopul acestui chestionar cantitativ este de a construi o proteză bionică de picior funcțională, ușoară și inteligentă, la un cost redus, care să îndeplinească cerințele funcționale și non-funcționale ale utilizatorului. Acest sistem va fi controlat prin comenzi mentale, utilizând o cască neuro dedicată.

Unele dintre dezavantajele protezelor pentru membrele inferioare utilizate în prezent sunt costul ridicat, masa mare a unor materiale și dificultatea de controlare a acestora. Protezele ar putea ajuta multe persoane care au suferit amputații ale membrelor inferioare să-și recâștige anumite funcționalități, pentru a-și îndeplini activitățile zilnice. Cu toate că arată din ce în ce mai atrăgătoare, protezele oferă mai puțin de jumătate din capacitatea unui picior uman. Din cauza ineficienței acestor activități protetice, beneficiarii le resping adesea, urmare a stresului cognitiv ridicat, ceea ce duce la epuizare și la frustrare [16].

În cercetarea cantitativă, soluțiile și observațiile sunt transformate în date numerice și apoi sunt analizate și interpretate prin procese de analiză statistică.

Descoperirile acestor studii sunt adesea utilizate pentru a concluziona elemente importante și de interes ale unor persoane, cum ar fi parametrii care indică legături între idei teoretice sau impactul semnificativ al experimentelor și practicilor [17].

Pentru a identifica și a evalua cerințele funcționale și non-funcționale ale utilizatorului pentru un sistem inteligent de proteze picior, care urmează a fi construit, acest studiu reprezintă o cercetare cantitativă. Rezultatele analizei răspunsurilor sunt folosite pentru a determina nevoile utilizatorului.

3.2 Despre chestionar și eșantionare

Chestionarul a fost creat pentru a defini cerințele funcționale și non-funcționale ale amputaților, pentru a le satisface toate nevoile în controlul unei proteze bionice membru inferior. Acest chestionar a vizat patru categorii de persoane: tehnicieni de proteze, ingineri, medici și persoane care au suferit o amputație de membru inferior.

Pentru a ne asigura că este cât mai cuprinzător și precis posibil, chestionarul a fost trimis unui număr ridicat de respondenți. Au participat 40 de persoane și toți au răspuns la întrebările din cadrul unuia dintre cele trei seturi. Fiecare set conține întrebări cu alegere multiplă și cu răspuns scurt:

- în primul set, este determinat istoricul cunoștințelor participanților;
- al doilea set conține întrebări doar pentru amputații de picior;
- al treilea set conține întrebări utilizate pentru a identifica cerințele funcționale și cele non-funcționale ale unui utilizator.

3.3 Analiza rezultatelor obținute

În acest studiu s-a recurs la o abordare exploratorie cantitativă, pentru a verifica cerințele funcționale și non-funcționale ale utilizatorului, pentru utilizarea membrilor inferioare protezate controlate de minte. Interesele și sugestiile utilizatorilor au fost luate în considerare, împreună cu sugestiile specialiștilor și cu concluziile din lucrări similare.

A. Istoricul cunoștințelor participanților

În ceea ce privește ocupațiile participanților, 58,5% erau ingineri, 9,8% erau persoane care au suferit amputații de cel puțin un membru inferior, 7,3% erau tehnicieni de proteze, 4,9% erau medici, în timp ce 19,5% erau din alte profesii. 66% dintre participanți sunt români, 29% irakieni și 5% turci, conform naționalităților lor.

În ceea ce privește vârsta, 2,4% dintre respondenții la sondaj aveau sub 18 ani, 24,4% erau între 18 și 30 de ani, 46,3% erau între 31 și 40 de ani, 14,6% erau între 41 și 50 de ani, 7,3% erau între 51 și 60 de ani, iar 4,9% aveau peste 60 de ani. 26,8% au un doctorat, 31,7% au un masterat, 31,7% au o licență, 4,9% au un diplomă de specialitate/vocațională, 2,4% au un diploma de liceu, iar 2,4% au o altă specializare.

3.4 Cerințele sistemului

Cerințele funcționale și non-funcționale ale utilizatorului au fost determinate pe baza analizei rezultatelor chestionarului.

Implementarea design-ului sistemului pentru prototipul membrilor inferioare protetice controlate prin minte, ar trebui să ia în considerare aceste nevoi.

Specificațiile utilizatorului pentru prototipul membrilor inferioare protetice controlate prin minte sunt următoarele:

- Construirea protezei membru inferior folosind materiale ușoare;
- Utilizarea tehnologiei wireless pentru controlarea protezei membru inferior
- Implementarea piciorului protetic astfel încât acesta să poată simula mișcările clasice ale unui picior uman;
- Oferirea antrenamentului necesar persoanelor care au suferit amputații, pentru a putea controla proteza membru inferior prin intermediul unei căști neuronale dedicate;
- Cerințele de siguranță ar trebui incluse în prototip;
- Creșterea preciziei și a vitezei sistemului;
- Cerințele de utilizare, fiabilitate, flexibilitate și întreținere ar trebui incluse în sistem.

Pe baza opiniilor respondenților, cele mai importante cerințe funcționale sunt: mișcările clasice ale piciorului uman și utilizarea materialelor ușoare în sistemul care urmează să fie construit.

Conform plângerilor persoanelor care au pierdut un membru inferior, sistemul ar trebui construit din materiale ușoare având în vedere și alte caracteristici precum:

- flexibilitatea;
- biocompatibilitatea;
- durabilitatea;

- rezistența la:
 - uzură;
 - temperaturi ridicate;
 - impact mare.

În ceea ce privește cerințele non-funcționale, este necesar să se construiască un prototip cu o precizie bună și un timp bun de răspuns.

Referitor la cerințele de fiabilitate, este necesar să se reducă eșecurile în performanța sistemului prin construirea unui sistem fiabil.

Prototipul ar trebui să fie ușor de învățat, operat și interacționat de către orice persoană care a pierdut un membru inferior, indiferent de nivelul educației pe care îl are, pentru a asigura cerințele de utilizare a sistemului.

Prin luarea în considerare a flexibilității sistemului, acesta ar trebui să fie configurat și ușor de adaptat la diferite medii, în funcție de așteptările persoanelor care au suferit o amputație.

Sistemul ar trebui să fie ușor de îmbunătățit și de reparat într-un timp cât mai scurt, având în vedere durata de viață a bateriei. Software-ul utilizat de sistem ar trebui să fie sigur, evitându-se erorile.

3.5 Concluzii

Controlul aplicațiilor folosind tehnologia BCI, bazată pe EEG, reprezintă o nouă zonă de cercetare, în care se pot realiza multe studii valoroase, în special în domeniul medical.

Scopul acestui sondaj este de a raporta rezultatele unui chestionar de cercetare cantitativ, dezvoltat pentru a determina și pentru a verifica nevoile funcționale și non-funcționale ale proiectării și construcției anticipate a unei proteze membru inferior controlată mental de către beneficiar.

Chestionarul a fost publicat online, iar 40 de participanți (persoane care au suferit amputații, ingineri, medici și tehnicieni din domeniul proteticii membrilor) au răspuns la întrebările adresate.

Răspunsurile participanților au fost analizate și au fost reprezentate grafic. Aceste răspunsuri au relevat unele dezavantaje și unele probleme ale protetizărilor actuale ale membrilor inferioare, probleme precum: masa mare a protezelor, dificultatea realizării mișcărilor și controlului protezelor etc.

Majoritatea respondenților au propus îmbunătățirea controlului și mișcării protezei picior, deoarece, analiza rezultatelor a arătat faptul că, marea majoritate a persoanelor care au suferit amputații ale membrilor inferioare, nu sunt mulțumite de protetica membrilor actuale, din diverse motive.

Acest chestionar este foarte util în privința aflării nevoilor reale ale utilizatorilor, pentru a putea fi luate în considerare în cadrul procesului de proiectare, de realizare și de control al unei proteze membru inferior coordoantă mental.

4 CARACTERIZAREA ELASTICĂ ȘI MECANICĂ A MATERIALULUI UTILIZAT LA REALIZAREA PICIORULUI BIONIC

4.1 Încercări experimentale

4.1.1 Echipamente utilizate

Ținând cont de informațiile prezentate în subcapitolul 1.2, legate de realizarea unei proteze membru inferior și fără a pierde din vedere informațiile obținute în urma aplicării chestionarului cantitativ descris în capitolul 3, s-a decis ca elementele componente ale piciorului să fie realizate prin metoda printării 3D, din PLA [18], [19], acesta fiind un biopolimer bioabsorbabil, produs din materie primă regenerabilă, netoxică [20]. Soluția aleasă, în ceea ce privește materialul ales pentru confecționarea piciorului bionic a ținut seama și de faptul că, PLA este considerat un material bun pentru aplicațiile medicale [21]. Într-o etapă ulterioară de dezvoltare a piciorului bionic, acest material va intra în contact cu organismul uman, obiectivul principal al acestei teze de doctorat fiind concentrat pe cercetarea științifică la nivel general a unei metode moderne și eficiente de control neuronal al protezei membru inferior bionic studiat.

Întrucât, proteza membru inferior este solicitată în mod prioritar la tracțiune, la compresiune și la încovoiere în timpul mersului, s-a considerat ca fiind necesară efectuarea unor încercări experimentale la toate aceste trei solicitări mecanice, generatoare și de informații utile modelării numerice cu elemente finite (caracteristici elastice ale PLA).

Pentru imprimarea epruvetelor necesare încercărilor mecanice a fost utilizată imprimanta 3D PRUSA i3 MK3S+.

Pentru determinarea proprietăților elastice și mecanice ale materialului menționat (PLA) au fost realizate trei tipuri de epruvete, specifice solicitărilor la tracțiune, la compresiune și la încovoiere conform standardelor aferente.

Pentru realizarea încercărilor la tracțiune și la compresiune a fost utilizată mașina universală de încercat INSTRON 8872, din Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității Naționale de Științe și Tehnologie Politehnica București [22].

În cazul încercărilor la compresiune, sistemul INSTRON 8772 a necesitat utilizarea unor adaptoare de compresiune.

Pentru realizarea încercărilor la încovoiere a fost folosit sistemul INSTRON 8801, considerat ideal, datorită accesoriilor prezente în bacurile hidraulice acestuia.

Corelarea digitală a imaginilor (DIC) obținute în urma testelor de tracțiune, de compresiune și de încovoiere, a fost realizată prin utilizarea sistemului Dantec Q400.

Toate testele mecanice au fost efectuate cu viteza de 1 mm/min.

4.1.2 Încercarea epruvetelor la tracțiune

În cazul celor 10 epruvete tipărite pentru încercarea la tracțiune, s-a considerat axa X pe direcția solicitării (direcție uniaxială), respectându-se standardul ASTM D3039 [23], adecvat pentru încercarea la întindere a materialelor de acest tip (considerate materiale ortotrope).

Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală

Faptul că materialul supus testului la tracțiune s-a rupt în zona îngustă a epruvetelor, secțiunea gătită fiind poziționată la o distanță corespunzătoare față de prinderea bacurilor mașinii hidraulice, ne arată că testele efectuate au fost corecte.

A fost utilizat sistemul de încercări Bluehill 3, în calitate de software aflat în configurația mașinilor de tip INSTRON.

4.1.3 Încercarea epruvetelor la compresiune

Pentru încercarea la compresiune au fost realizate tot 10 epruvete, în conformitate cu cerințele standardelor în vigoare.

Prin încercarea la compresiune sunt determinate următoarele proprietăți: modulul de elasticitate la compresiune și tensiunea echivalentă la compresiune.

Determinarea modulului de elasticitate la compresiune al materialului studiat s-a realizat în mod asemănător modulului de elasticitate la tracțiune, calculând panta porțiunii liniar - elastice a curbei caracteristice.

4.1.4 Încercarea epruvetelor la încovoiere

Pentru acest tip de test au fost realizate 10 epruvete.

Încercarea la încovoiere se realizează fie până când deformația specifică liniară a acesteia ajunge la valoarea de 0,05 mm/mm (potrivit standardelor), fie până când epruveta se rupe.

4.1.5 Tehnica de corelare digitală a imaginilor

Sistemului Dantec Q400 a permis studierea celor trei tipuri de epruvete supuse încercărilor experimentale (tracțiune, compresiune, încovoiere), cu ajutorul metodei corelării digitale a imaginilor. Comparând imagini ale epruvetelor, captate de către camerele sistemului, acest sistem oferă posibilitatea de a observa și analiza un câmp 3D, printr-o abordare optică fără contact, în vederea măsurării deformațiilor specifice, a tensiunilor și a vibrațiilor, pentru aproape orice material [24].

4.2 Concluzii

În acest capitol sunt determinate, pe cale experimentală, caracteristicile elastice (modulul de elasticitate și coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui Poisson)) și cele mecanice ale materialului (PLA) avut în vedere pentru realizarea practică și pentru analiza numerică a piciorului bionic care face obiectul acestei lucrări.

Urmare a realizării și a testării mecanice la întindere, la compresiune și la încovoiere în trei puncte, a câte 10 epruvete (printate 3D) pentru fiecare tip de încercare mecanică, se poate considera că a fost efectuată o caracterizare completă și corectă, din punct de vedere elasto-mecanic, a materialului investigat.

Prin utilizarea tehnologiei DIC s-a putut observa modul în care materialul cedează, pentru fiecare epruvetă testată, precum și modul în care se localizează deformațiile și tensiunile, ca apoi acestea să cedeze.

5 PROIECTAREA ȘI IMPLEMENTAREA UNEI PROTEZE MEMBRU INFERIOR ȘI CONTROLAREA SA FOLOSIND SEMNALELE ELECTRICE PROVENITE DE LA CREIER

5.1 Componentele sistemului

Această secțiune prezintă design-ul, materialele utilizate, hardware-ul folosit și implementarea sistemului propus.

Piciorul protetic a fost implementat utilizând rezultatele obținute din chestionarul calitativ, însă nu este conceput pentru a fi utilizat de un om. Este doar o dovadă a conceptului de prototip al sistemului pentru scopuri de cercetare ulterioară.

În această lucrare pot fi observate mai multe teste, care pot fi efectuate pe acest picior protetic prin crearea unui suport special, pentru a măsura modul în care piciorul reacționează la diferite forțe exercitate asupra sa.

5.1.1 Proteza membru inferior

După analiza realizată în subcapitolul 3.1, utilizând aplicația dedicată SolidWorks (aplicație CAD - Computer Aided Design), s-a proiectat un sistem protetic care conține trei elemente: picior, gambă și genunchi.

5.2 Implementarea sistemului

Sistemul propus este format din mai multe părți, care sunt conectate după cum urmează: cască neuronală EMOTIV Insight este conectată la computer prin Bluetooth, computerul este conectat la Raspberry Pi 4 prin SSH (Secure Shell Protocol) și Raspberry Pi 4 este conectat la membrul inferior protetic prin pini GPIO.

5.3 Testarea sistemului

Testarea sistemului a fost efectuată folosind semnale EEG, provenite și înregistrate de la un subiect masculin sănătos. Pentru a permite subiectului să controleze membrul inferior protetic, subiectul trebuie să poarte setul cu cască și să antreneze două comenzi, pentru a oferi controlul necesar mișcărilor. Sesiunea de antrenament a durat aproximativ 20 de minute.

După antrenament, subiectul a fost rugat să controleze proteza membru inferior și să facă mișcările de flexie, extensie, flexie plantară și flexie dorsală ale membrului inferior protetic folosind gândurile sale.

5.1 Concluzii

Utilizarea metodei BCI bazată pe EEG este o direcție relativ nouă de cercetare, în special în domeniul medical. Această lucrare prezintă proiectarea și implementarea unui prototip de membru inferior protetic controlat de minte. Materialele utilizate pentru realizarea dispozitivului protetic sunt atât materiale robuste, cât și ușoare.

6 ANALIZA COMPORTAMENTULUI MECANIC AL UNUI PICIOR BIONIC AFLAT ÎN REGIM DINAMIC

6.1 Sisteme care oferă o cinematică eficientă

Scopul acestei cercetări este de a evidenția caracteristicile de dinamicitate ale unei proteze a membrului inferior, ca o alternativă la sistemele pasive sau mixte existente. Sistemul propus este realizat, la nivel de model experimental de laborator.

Proteza are în componență un genunchi acționat de un servomotor și o gleznă acționată la rândul ei tot de către un servomotor. Proteza (care urmează să fie dezvoltată pe viitor) se dorește a fi utilizată pentru persoanele al căror membru inferior (de la genunchi în jos) a fost amputat, sau pentru a echipa un robot umanoid de dimensiuni medii. Pentru a-l pune în mișcare, a fost realizat un sistem/cadru, care are un motor pas cu pas pentru deplasarea în direcție longitudinală. De asemenea, s-a efectuat o acționare asupra celor două servomotoare, cu ajutorul unei căști neuronale. Intenția primară este aceea de a realiza o proteză protetică, în măsură să poată fi acționată cu ajutorul undelor cerebrale.

6.2 Materiale și metode

Testările experimentale realizate în prezenta cercetare au constat în determinarea deplasării protezei pe axul longitudinal al bancului de testare și a vibrațiilor în două puncte de pe laba piciorului.

6.2.1 Tehnologia realizării protezei picior

Elementele componente ale protezei bionice, ulterior fazei de proiectare, au fost procesate în limbaj specific pentru imprimanta 3D PRUSA i3 MK3.

Din punct de vedere constructiv/asamblare avem:

1. Piciorul (denumit colocvial și „laba piciorului”):
 - a. Laba piciorului (piesă monobloc din PLA);
 - b. Bucșa de prindere cu motorul, poziționată în dreptul gleznei (aluminium);
 - c. Șuruburi de prindere între bucșă și laba piciorului (oțel).
2. Gamba:
 - a. Gamba (piesă monobloc din PLA);
 - b. Servomotor de acționare a tălpii (considerat din aluminium);
 - c. Șuruburi de prindere a servomotorului (oțel);
 - d. Bucșa de prindere cu motorul, poziționată în dreptul genunchiului (aluminium);
 - e. Șuruburi de prindere între bucșă și gambă (oțel).
3. Genunchiul:
 - a. Genunchi (piesă monobloc din PLA);
 - b. Servomotor de acționare a gambei (considerat din aluminium);
 - c. Șuruburi de prindere a servomotorului (oțel).

Interiorul gambei și al labei piciorului au fost tipărite cu o umplere de 30% iar pereții exteriori cu o grosime de 1 mm. Datorită acestui aspect, cele două componente au fost modelate geometric separat.

6.2.2 Cinematica

Pentru estimarea forțelor din articulațiile piciorului s-au impus servomotoarelor legi de mișcare liniare pentru unghiul de rotație al arborelui de ieșire. Astfel, într-un interval de 5 secunde arborele fiecărui servomotor se rotește cu un unghi de 20 de grade. Cinematica rezultată este simplă, dacă se adoptă o schematizare adecvată. Potrivit acestei schematizări, se determină vitezele și accelerațiile componentelor protezei.

Pentru a putea evidenția mișcarea descrisă de legile de mai sus s-au utilizat accelerometre pe trei direcții (PCB Piezotronics 356A43 S/N LW348378). Accelerometrele au fost atașate piciorului în două poziții: pe talpă și pe axa articulației dintre gambă și talpă.

6.2.3 Simularea cu metoda elementelor finite

Pentru modelarea cu ajutorul metodei elementelor finite s-a utilizat softul ANSYS. Modelările s-au realizat pentru un regim tranzitoriu, folosind modulul Transient Structural.

Contactele utilizate între aceste componente sunt:

- pentru talpă:
 - de tip „frictionless” pentru contactul dintre laba piciorului și bușa de prindere cu servomotorul;
 - de tip „bound” pentru restul contactelor.
- pentru gambă:
 - de tip „frictionless” pentru contactul dintre gambă și bușa de prindere cu servomotorul din genunchi și pentru contactul dintre servomotorul de acționare al labei piciorului cu gamba;
 - de tip „bound” pentru restul contactelor.
- pentru genunchi:
 - de tip „frictionless” pentru contactul dintre genunchi și servomotorul de acționare al gambei;
 - de tip „bound” pentru restul contactelor.

Între picior și gambă și respectiv, între gambă și genunchi, s-au definit legături de tip „revolute” între axul servomotoarelor și bușele de legătură.

6.3 Concluzii

Scopul dispozitivelor protetice este de a reproduce profilul unghiular-cuplu apt al unui om sănătos în timpul locomoției. O articulație ușoară și eficientă din punct de vedere energetic este capabilă să scadă puterea de vârf a actuatorului și/sau consumul de energie pe ciclul de mers, îndeplinind în același timp în mod adecvat constrângerile de potrivire a profilului.

În acest capitol sunt evidențiate caracteristicile de dinamicitate ale unui picior bionic cu actuator electric cu mișcare de rotație. Pentru realizarea acestuia s-a utilizat tehnologia de printare 3D, iar pentru articulații s-au folosit servomotoare. Pentru deplasarea în plan orizontal s-a utilizat un motor pas cu pas.

Din analiza rezultatelor obținute se poate concluziona că proteza rezistă în regim dinamic, fără probleme.

7 IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM EFICIENT EMDR PENTRU TRATAREA TRAUMELOR PERSOANELOR CARE UTILIZEAZĂ UN MEMBRU PROTETIC INFERIOR

7.1 Terapie cu EMDR

Dintre pacienții care au suferit o amputație, aproximativ 80% au raportat o durere la nivelul membrului fantomă (Phantom Limb Pain - PLP) [6], [25]. Aproape jumătate dintre pacienții cu PLP semnaleză faptul că simt dureri zilnice [26]. Cu toate că un tratament împotriva durerii ar fi cel mai indicat, studiile de specialitate au arătat că acționarea asupra durerii nu ajută, în cele mai multe cazuri [27]. S-au găsit corelații semnificative între intensitatea PLP și factorii centrali, cum ar fi remodelarea corticală și formarea amintirilor somatosenzoriale [28]–[30].

EMDR este o terapie psihologică în opt faze, concepută pentru a trata stresul emoțional cauzat de evenimente traumatice din trecut, cel mai frecvent în PTSD. Studiile de specialitate au arătat că terapia EMDR este eficientă în tratamentul PLP [31]–[35].

În timpul terapiei EMDR, clinicianul folosește diversi stimuli laterali, precum o lumină care își schimbă poziția, alternanța sunetelor între difuzoare sau vibrația dispozitivelor ținute de client în mâini, pentru a ajuta clientul să proceseze o experiență supărătoare.

7.2 Materiale și implementarea sistemului

Sistemul propus oferă o implementare multi-actuator a protocolului EMDR:

- Stimul video, folosind o minge redată pe un afișaj grafic;
- Stimul audio, care simulează o sursă de sunet în mișcare;
- Stimulare tactilă, folosind motoare de vibrație - plasate pe utilizator (folosind brățări stimulii sunt sincronizați pentru a maximiza eficacitatea);
- Un chatbot pentru comunicarea cu utilizatorul, conform protocolului EMDR, permițând sistemului să funcționeze autonom, adică în absența unui terapeut.

Sistemul propus este compus din următoarele module: video, audio, tactil și chatbot, care pot funcționa independent sau împreună, în funcție de preferințele utilizatorului și de opțiunile de implementare.

7.3 Concluzii

În acest capitol a fost descris un sistem virtual EMDR bazat pe dispozitive video, tactile și audio utilizate pentru a trata anxietatea, suferința și emoțiile negative asociate cu amintirile traumatice. Pe baza rezultatelor obținute, o intervenție EMDR autonomă este posibilă.

Studiul prezentat evidențiază eficacitatea unei intervenții EMDR pentru cei care nu pot avea acces la suport psihologic imediat, permițându-le astfel autonomia. Mai mult, protocolul stabilit a fost testat și confirmat pozitiv în oferirea îndrumărilor necesare pentru o administrare eficientă. Ca rezultat, ar putea fi considerat un instrument de auto-susținere pentru persoanele care se confruntă cu simptome ușoare de PTSD.

În urma acestei cercetări, persoanele care au suferit amputații pot urma o sesiune de tratamente EMDR, pentru a putea antrena ulterior o cască neuronală dedicată, în vederea controlării unei proteze membru inferior.

8 CONCLUZII FINALE

8.1 Considerații generale

Teza de doctorat intitulată „*Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală*” are ca principal obiectiv cercetarea modului de control al unei proteze membru inferior, prin utilizarea unei căști neuronale, având rolul interpretării gândurilor utilizatorului, în vederea mișcării protezei.

În această lucrare s-a urmărit proiectarea și implementarea unei proteze membru inferior, realizată dintr-un material cu masă redusă, având o rezistență la rupere adecvată. Dacă inițial, demonstrarea conceptului de față nu părea să aibă sorti de izbândă, în urma unor cercetări științifice cu grad înalt de interdisciplinaritate s-a arătat faptul că, o proteză a unui picior poate fi controlată neuronal (mental), fără a fi necesară o intervenție chirurgicală asupra utilizatorului.

Pentru a ajunge în acest punct final, a fost necesară aprofundarea mai multor cunoștințe interdisciplinare, precum: rezistența materialelor, robotică, mecanică, mecanisme, știința materialelor, tehnologia materialelor, metode experimentale, metode numerice de calcul, calculatoare și tehnologia informației, electronică, protetică, psihologie etc.

8.2 Concluzii finale

În *capitolul 1 - „Stadiul actual al cercetărilor”* a fost prezentată situația actuală a informațiilor din literatura de specialitate, referitoare la modurile și la materialele utilizate în realizarea unei proteze de picior. În urma unei sinteze a acestui capitol, pot fi conturate următoarele concluzii:

1. Amputațiile de orice fel creează dezechilibru fizic și mental unei persoane, fapt pentru care oamenii au încercat înlocuirea membrilor lipsă, pentru a putea avea o viață cât mai apropiată de normalitate.
2. Inițial, protezele au fost confecționate din lemn, piele sau fier, fiind realizate în special pentru funcționalitatea lor, partea estetică fiind pe plan secund.
3. Evoluția omenirii și-a pus amprenta asupra metodelor de confecționare a unei proteze și asupra materialelor utilizate în fabricarea acestora.
4. Cercetările realizate de-a lungul timpului au scos la lumină biomaterialele, care aduc numeroase avantaje în utilizarea lor pentru confecționarea protezelor de picior: rezistență mecanică ridicată, rezistență la expunerea în diferite medii, masă redusă, flexibilitate și, nu în ultimul rând, un aspect estetic mult mai apropiat de cel al membrilor naturale.
5. Apariția imprimantelor 3D a reprezentat un pas important în fabricarea protezelor, prin: creșterea vitezei de producție, obținerea de piese (structuri) cu un grad mare de complexitate, costuri reduse etc.
6. Aproximativ 0,5% din populația mondială necesită o proteză sau o orteză (conform unui studiu al OMS), în vederea exercitării activităților zilnice.
7. Evoluția protezelor a ajuns într-un punct în care acestea au un aspect cât mai apropiat de un membru normal - prin utilizarea allograft-ului (un compozit vascularizat), totodată îmbunătățindu-se considerabil funcționalitatea membrului lipsă, astfel încât, persoana care a suferit o amputație poate avea o viață activă, firească, prin intermediul protezelor.

8. Controlarea protezelor se poate realiza invaziv (prin utilizarea nervilor rămași în membrul rezidual, nervi care ar trebui reinervați în urma unor intervenții chirurgicale) sau neinvaziv (prin utilizarea semnalelor electrofiziologice din creier).
9. Utilizarea semnalelor electrice provenite de la creierul uman, prin evitarea unei intervenții chirurgicale costisitoare și primejdioase (necesare pentru amplasarea unor senzori pe creier), se poate realiza prin folosirea unei căști neuronale dedicate, care conține senzori atașați pe cap, necesari pentru a capta activitatea cerebrală a beneficiarului.
10. Alegerea soluției utilizării unei căști neuronale, prin intermediul căreia ar putea fi controlată o proteză membru inferior bionic, printată 3D, reprezintă scopul esențial al cercetărilor realizate în cadrul acestei teze de doctorat.

Capitolul 2 - „Obiectivele și organizarea tezei” înglobează obiectivele generale și cele specifice, definite pentru elaborarea prezentei teze de doctorat. De asemenea, a fost realizată o descriere sumară a fiecărui capitol în parte.

Capitolul 3 - „Determinarea cerințelor utilizatorilor pentru un sistem inteligent cu scopul controlării prin intermediul minții a unei proteze membru inferior” cuprinde un studiu realizat online, pentru a determina cerințele funcționale și non-funcționale ale sistemului propus spre implementare. Sondajul a fost efectuat prin consultarea a 40 de respondenți, din diferite medii (persoane care au suferit amputații, ingineri, medici și tehnicieni de membre protetice). Rezultatele obținute în urma realizării chestionarului cantitativ, permit conturarea următoarelor concluzii:

11. Tehnologia BCI, bazată pe EEG, este relativ nouă în zona de cercetare științifică, fiind foarte utilă, mai ales în domeniul medical.
12. Evidențierea nevoilor funcționale și non-funcționale ale unei proteze membru inferior bionic.
13. Toate răspunsurile participanților la sondaj au fost analizate și reprezentate în mod grafic, obținându-se astfel reliefarea unor avantaje și, mai ales, a unor dezavantaje ale prototipurilor actuale ale membrilor inferioare: masă ridicată, dificultate în mișcare și control, fiabilitate redusă etc.
14. Majoritatea participanților au specificat necesitatea îmbunătățirii controlului și mișcării unei proteze picior.
15. Răspunsurile obținute în urma acestui sondaj au conturat materialul din care poate să fie printată 3D proteza membru inferior, în vederea implementării sistemului conceput de către doctorand.

Capitolul 4 - „Caracterizarea elastică și mecanică a materialului utilizat la realizarea piciorului bionic” descrie testele mecanice realizate pe epruvete printate 3D, realizate din PLA și prezintă rezultatele obținute în urma acestor teste (tracțiune, compresiune și încovoiere în trei puncte).

Din acest capitol pot fi desprinse următoarele concluzii:

16. În urma testului la tracțiune s-au obținut proprietățile elastice și cele mecanice ale materialului PLA, printat 3D și a putut fi observat modul de cedare a epruvetelor.
17. Testele la compresiune au evidențiat modul de deformare a epruvetelor și au permis aflarea proprietăților elastice și mecanice ale acestora.

18. Încovoierea în trei puncte a reliefat modul de rupere a peretelui lateral al epruvetei solicitate și a contribuit la determinarea proprietăților elastice și a celor mecanice ale materialului folosit la realizarea practică a modelului la scară al unui picior bionic.
19. Cunoașterea proprietăților elastice și ale celor mecanice ale materialului printat 3D poate ajuta la o mai bună proiectare a componentelor utilizate în realizarea piciorului bionic.
20. Proprietățile elastice și cele mecanice obținute în acest capitol sunt necesare la simularea numerică a comportamentului în mișcare a piciorului bionic.

Capitolul 5 - „Proiectarea și implementarea unei proteze membru inferior și controlarea sa folosind semnalele electrice provenite de la creier” descrie proiectarea și implementarea unei proteze membru inferior bionic, echiparea hardware corespunzătoare a acestei proteze și controlarea sa prin utilizarea unei căști neuronale dedicate.

În acest capitol, accentul a fost pus pe echiparea hardware și pe controlarea protezei, lăsând pentru capitolul următor descrierea detaliată a proiectării și a printării 3D a protezei picior.

Concluziile cele mai relevante ale acestui capitol sunt următoarele:

21. Fiind o direcție relativ nouă în zona de cercetare, metoda BCI, bazată pe EEG, are o deschidere tot mai mare la persoanele care au suferit amputații, întrucât, acestea nu ar mai necesita intervenții chirurgicale periculoase și costisitoare.
22. Prototipul membru inferior bionic printat 3D, din materialul PLA, are două grade de libertate, fiind suficient pentru mișcările de flexie, extensie, flexie plantară și flexie dorsală.
23. Pentru realizarea mișcărilor protezei picior, aceasta a fost echipată hardware, astfel: Raspberry Pi 4, două servomotoare, modul driver de motor, sursă de alimentare externă (această variantă fiind suficientă pentru a demonstra conceptul de control neuronal al protezei), iar pentru controlarea protezei cu puterea minții a fost utilizată o cască EMOTIV Insight (aceasta fiind responsabilă cu captarea semnalelor electrice provenite de la creier, iar computer-ul este responsabil cu convertirea lor în comenzi specifice, care să poată fi utilizate ulterior în controlul protezei membrului inferior bionic).
24. Testarea sistemului implementat a fost realizată de către un participant sănătos, de sex masculin, care a utilizat casca neuronală pentru a antrena două comenzi necesare mișcării protezei picior.
25. În comparație cu alte căști avansate, care conțin mulți electrozi, performanța sistemului este relativ bună, în ceea ce privește semnalul EEG obținut de la casca neuronală EMOTIV Insight, deoarece, asigură decodarea și procesarea dorită pentru semnalele creierului.

Capitolul 6 - „Analiza comportamentului mecanic al unui picior bionic aflat în regim dinamic” are ca scop studierea comportamentului dinamic al unui picior bionic, prevăzut cu actuatoare electrice cu mișcare de rotație, de aici putându-se desprinde următoarele concluzii:

26. Este evidențiată existența unor vibrații în cadrul sistemului mecanic (atât din rezultatele experimentale, cât și din modelul cu elemente finite), apărute în timpul mișcării, vibrațiile fiind produse la trecerea protezei picior din starea de echilibru, în starea de mișcare, prin accelerarea servomotoarelor înglobate în proteză, la viteza de rotație de 0,069 rad/s.
27. Pentru diminuarea vibrațiilor va fi necesară o cercetare a comportamentului la oboseală a componentelor realizate din PLA prin tipărire 3D, vibrațiile putând fi parțial reduse din hardware.

28. Controlul componentelor protezei membru inferior poate fi îmbunătățit prin folosirea unor senzori de deplasare unghiulară (encodere), fiind astfel redus și efortul comparării datelor experimentale cu cele analitice sau numerice.

Capitolul 7 - „Implementarea unui sistem eficient EMDR pentru tratarea traumelor persoanelor care utilizează un membru protetic inferior” cuprinde o descriere a unui sistem virtual EMDR, util în tratarea anxietății, a suferinței și a emoțiilor negative asociate cu amintirile traumatice, folosind dispozitive video, tactile și audio. În urma rezultatelor obținute se pot menționa următoarele concluzii:

29. Sistemul bazat pe EMDR a fost implementat pentru a putea fi autoadministrat de către un utilizator care suferă de PTSD, protocolul stabilit fiind testat cu succes pe 31 de participanți.
30. Funcționalitatea sistemului respectă cele opt faze esențiale ale EMDR, chatbot-ul bazat pe inteligență artificială fiind ideal în utilizarea sistemului în mod autonom, acest chat reprezentând avantajul prototipului față de alte aplicații realizate pentru administrarea terapiei cu EMDR.
31. Un alt avantaj al prototipului implementat este dat de accesibilitatea utilizării procedurii EMDR de către persoanele cu dizabilități, datorită diferitelor metode de stimulare (vizuală, audio, tactilă) înglobate în sistem.
32. Sistemul prezentat în acest capitol are abilitatea de a personaliza interacțiunea cu pacientul, în funcție de caracteristicile acestuia.
33. Persoanele care au suferit amputații ale membrilor au rămas cu traume care pot afecta antrenarea unei căști neuronale dedicate, cască necesară în controlarea protezei membrului lipsă. Așadar, sistemul care oferă posibilitatea unei auto-administrații cu terapia EMDR este necesar pentru reducerea traumei persoanelor care au suferit amputații.

8.3 Contribuții și perspective

Obiectivul principal al tezei de doctorat intitulată „*Cercetări privind conceperea și dezvoltarea unui membru inferior protetic bionic, controlat cu o cască neuronală*” a fost acela de a studia modalitatea de control al unei proteze membru inferior bionic, proiectat și printat 3D, controlat prin intermediul unei căști neuronale dedicate.

Contribuțiile personale aduse în dezvoltarea sistemului protetic implementat, atât la nivel teoretic, cât și la nivel practic, pot fi considerate următoarele:

- a) Realizarea unei cercetări amănunțite a bibliografiei de specialitate, în vederea studierii tipului de material, a modului de fabricare a protezelor și a modului de control al unei proteze membru inferior bionic.
- b) Realizarea unui chestionar cantitativ, care să reliefeze problemele protezelor membru inferior utilizate în zilele noastre, rezultatele obținute stând la baza alegerii materialului utilizat în confecționarea protezei picior.
- c) Caracterizarea cât mai completă din punct de vedere elastic și mecanic a materialului utilizat la realizarea practică, la scară, a unui model de picior bionic.
- d) Proiectarea - prin utilizarea unei aplicații software dedicate și fabricarea unei proteze picior (la scară redusă) - prin utilizarea unei imprimante 3D.
- e) Echiparea hardware corespunzătoare a protezei unui membru inferior (picior bionic), în vederea controlării acesteia prin intermediul gândurilor utilizatorului, activitatea cerebrală

fiind captată cu ajutorul unei căști neuronale dedicate, la bază fiind tehnologia BCI, bazată pe EEG.

- f) Abordarea pe cale analitică a cinematicii piciorului bionic, potrivit unei schematizări adecvate a acestuia, în vederea determinării vitezelor și a accelerațiilor componentelor protezei.
- g) Aflarea pe cale experimentală a accelerațiilor piciorului bionic, cu ajutorul a două accelerometre (montate pe talpă și pe axa articulației dintre gambă și talpă) și compararea rezultatelor obținute cu cele de natură analitică.
- h) Abordarea pe cale analitică a dinamicii piciorului bionic, în vederea determinării reacțiilor din articulații. Pentru estimarea lor s-au impus servomotoarelor legi de mișcare liniare pentru unghiul de rotație al arborelui de ieșire.
- i) Realizarea unei modelări și a unei simulări numerice în regim dinamic a întregii proteze, folosind metoda elementelor finite, pentru a determina starea de deformație și de tensiune din aceasta, apărută în timpul mișcării și pentru a afla reacțiunile din articulația genunchiului.
- j) Analiza numerică locală, pe o substructură a protezei, aflată în zona genunchiului, în vederea determinării stării de tensiune și de deformație din toate elementele constitutive ale zonei considerate (jug, bucușe și șuruburi), luând în seamă, drept încărcări, reacțiunile aflate în analiza anterioară.
- k) Implementarea unui sistem autonom de administrare a terapiei cu EMDR, pentru reducerea traumei persoanelor care au suferit amputății ale membrilor, cu scopul de a putea ulterior să antreneze o cască neuronală dedicată, pentru a putea controla cu succes o proteză membru inferior bionic.

Ținând cont de rezultatele obținute în această teză de doctorat, pe viitor pot fi luate în seamă următoarele **perspective de cercetare** (numerică, software, hardware și experimentală), în vederea optimizării sistemului actual:

- a) Îmbunătățirea design-ului protezei actuale, prin adăugarea degetelor și a unui țesut de allograft extern protezei, pentru a obține un aspect al acesteia cât mai apropiat de cel al unui membru natural.
- b) Înlocuirea sursei de alimentare externe cu un dispozitiv pe baterii, care să fie înglobat în gamba protezei picior.
- c) Utilizarea mai multor servomotoare, pentru ca proteza membru inferior bionic să aibă mai multe grade de libertate.
- d) Eliminarea computerului din sistem, atunci când Cortex API va accepta sistemul de operare Linux, lucru care îi va permite dispozitivului Raspberry Pi să gestioneze toate părțile de procesare și să controleze acțiunile protezei picior.
- e) Realizarea unei proteze picior la scară umană, pentru a putea fi testată pe o persoană care a suferit o amputație de membru inferior.
- f) Utilizarea unor servomotoare cu dublu ax, care să permită o articulație cilindrică pe ambele părți ale jugului și realizarea unei articulații pasive coaxiale cu axul servomotorului, pe partea opusă jugului, pentru a crește astfel rigiditatea ansamblului și pentru a reduce nivelul de vibrații apărute în timpul mișcării.

BIBLIOGRAFIE

- [1] T. E. of E. Britannica, „Tezcatlipoca Aztec god”, *Encyclopedia Britannica*, 2017. <https://www.britannica.com/topic/Tezcatlipoca> (accessed Feb. 01, 2023).
- [2] K. Deamer, „3,000-Year-Old Wooden Toe Prosthetic Discovered on Egyptian Mummy”, *www.Livescience.com*, 2017. <https://www.livescience.com/59581-ancient-prosthetic-toe-found-in-egyptian-grave.html> (accessed Feb. 01, 2023).
- [3] C. W. Hull, „Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereo Photography, Patent.(1984) 16”.
- [4] H. Gao *et al.*, „EEG-based volitional control of prosthetic legs for walking in different terrains”, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 530–540, 2019, doi: 10.1109/TASE.2019.2956110.
- [5] M. Yasin, A. Arifin, and M. H. Fatoni, „Ankle Prosthesis With Brain Computer Interface Commands Based on Electroencephalograph for Transtibial Amputees”, in *2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2022, pp. 36–41.
- [6] T. S. Jensen, B. Krebs, J. Nielsen, and P. Rasmussen, „Immediate and long-term phantom limb pain in amputees: incidence, clinical characteristics and relationship to pre-amputation limb pain”, *Pain*, vol. 21, no. 3, pp. 267–278, 1985.
- [7] World Health Organization, „Standards for prosthetics and orthotics Part 1:Standards”, *apps.who.int*. pp. 1–84, 2017. Accessed: Mar. 28, 2023. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259209/9789241512480-part1-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] K. J. Zuo and J. L. Olson, „The evolution of functional hand replacement: From iron prostheses to hand transplantation”, *Plast. Surg.*, vol. 22, no. 1, pp. 44–51, 2014.
- [9] D. F. Williams and D. F. Williams, „The Williams dictionary of biomaterials”, Liverpool University Press, pp. 1–368, 1999.
- [10] F. Calignano, M. Galati, L. Iuliano, and P. Minetola, „Design of additively manufactured structures for biomedical applications: A review of the additive manufacturing processes applied to the biomedical sector”, *J. Healthc. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [11] A. Manero *et al.*, „Implementation of 3D printing technology in the field of prosthetics: past, present, and future”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 9, pp. 1–15, 2019.
- [12] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, „An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications”, *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019.
- [13] W. M. Grill, S. E. Norman, and R. V. Bellamkonda, „Implanted neural interfaces: biochallenges and engineered solutions”, *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 11, pp. 1–24, 2009.
- [14] S. Siuly, Y. Li, and Y. Zhang, „EEG signal analysis and classification”, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 11, pp. 141–144, 2016.
- [15] J. J. Vidal, „Toward direct brain-computer communication”, *Annu. Rev. Biophys. Bioeng.*, vol. 2, no. 1, pp. 157–180, 1973, doi: 10.1146/annurev.bb.02.060173.001105.
- [16] J. V. V. Parr, S. J. Vine, M. R. Wilson, N. R. Harrison, and G. Wood, „Visual attention, EEG alpha power and T7-Fz connectivity are implicated in prosthetic hand control and can be optimized through gaze training”, *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 2019.
- [17] J. R. Edwards, „The peaceful coexistence of ethics and quantitative research”, *J. Bus. Ethics*, vol. 167, no. 1, pp. 31–40, 2020.
- [18] M. S. Lopes, A. L. Jardini, and R. Maciel Filho, „Poly (lactic acid) production for tissue

- engineering applications”, *Procedia Eng.*, vol. 42, pp. 1402–1413, 2012.
- [19] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, „Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review”, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367–392, 2016.
- [20] A. J. R. Lasprilla, G. A. R. Martinez, B. H. Lunelli, A. L. Jardini, and R. Maciel Filho, „Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—A review”, *Biotechnol. Adv.*, vol. 30, no. 1, pp. 321–328, 2012.
- [21] R. M. Rasal, A. V. Janorkar, and D. E. Hirt, „Poly (lactic acid) modifications”, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 35, no. 3, pp. 338–356, 2010.
- [22] Instron®, „8872 SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING SYSTEM”, <https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2012/10/8872-servo-hydraulic-fatigue-testing-system.pdf> (accessed Jul. 20, 2023).
- [23] “ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, https://www.astm.org/d3039_d3039m-08.html (accessed Jul. 31, 2023).
- [24] M. Kujawinska, M. Malesa, K. Malowany, A. Piekarczyk, L. Tymińska-Widmer, and P. Targowski, „Digital image correlation method: a versatile tool for engineering and art structures investigations”, in *22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World*, 2011, vol. 8011, pp. 2599–2606.
- [25] L. Nikolajsen and T. S. Jensen, „Phantom limb pain”, *Curr. Rev. Pain*, vol. 4, no. 2, pp. 166–170, 2000.
- [26] C. M. Kooijman, P. U. Dijkstra, J. H. B. Geertzen, A. Elzinga, and C. P. Van der Schans, „Phantom pain and phantom sensations in upper limb amputees: an epidemiological study”, *Pain*, vol. 87, no. 1, pp. 33–41, 2000.
- [27] J. Halbert, M. Crotty, and I. D. Cameron, „Evidence for the optimal management of acute and chronic phantom pain: a systematic review”, *Clin. J. Pain*, vol. 18, no. 2, pp. 84–92, 2002.
- [28] H. Flor, „Painful memories”, *EMBO Rep.*, vol. 3, no. 4, pp. 288–291, 2002.
- [29] J. Katz and R. Melzack, „Pain ‘memories’ in phantom limbs: review and clinical observations”, *Pain*, vol. 43, no. 3, pp. 319–336, 1990.
- [30] H. Flor, „Cortical reorganisation and chronic pain: implications for rehabilitation”, *J. Rehabil. Med.*, vol. 41, no. 41, pp. 66–72, 2003.
- [31] J. Schneider, A. Hofmann, C. Rost, and F. Shapiro, „EMDR and phantom limb pain: Theoretical implications, case study, and treatment guidelines”, *J. EMDR Pract. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–45, 2007.
- [32] M. Wilensky, „Eye movement desensitization and reprocessing (EMDR) as a treatment for phantom limb pain”, *J. Br. Ther.*, vol. 5, no. 1, pp. 31–44, 2006.
- [33] R. H. Tinker and S. A. Wilson, „The Phantom Limb Pain Protocol. EMDR Solutions: Pathways to Healing”, New York: Norton WW, 2005.
- [34] J. Schneider, A. Hofmann, C. Rost, and F. Shapiro, „EMDR in the treatment of chronic phantom limb pain”, *Pain Med.*, vol. 9, no. 1, pp. 76–82, 2008.
- [35] M. C. Russell, „Treating traumatic amputation-related phantom limb pain: A case study utilizing eye movement desensitization and reprocessing within the armed services”, *Clin. Case Stud.*, vol. 7, no. 2, pp. 136–153, 2008.